

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

---

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE  
TRANSFORMAÇÃO DE CHUVA EM VAZÃO COM  
SUPORTE DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES  
GEOGRÁFICAS (SIG)**

**GUSTAVO BRASILEIRO COELHO**

**Orientador: Prof. Dr. José Luiz Portugal**

**Dissertação de Mestrado**

Recife, 2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**Gustavo Brasileiro Coelho**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO  
DE CHUVA EM VAZÃO COM SUPORTE DE SISTEMA DE  
INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Cartografia e Sistemas de Geoinformação defendida e aprovada no dia 01 de junho de 2006.

**Orientador: Prof. Dr. José Luiz Portugal**

Recife

2006

**C672a**      **Coelho, Gustavo Brasileiro.**

Análise e simulação do processo de transformação de chuva em vazão com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG). – Recife: O Autor, 2006.

81 folhas. : il. ; fig., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, 2006.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia cartográfica. 2. Sistema de Informações Geográficas (SIG). 3. Chuva – Vazão - Análise. 4. Bacia Hidrográfica do rio Salgado – Ceará, NE. 5. Tecnologia da Geoinformação. I. Título.

526 CDD (22.ed.)

UFPE  
**BCTG/2006-89**

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE  
TRANSFORMAÇÃO DE CHUVA EM VAZÃO COM  
SUPORTE DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES  
GEOGRÁFICAS (SIG)**

POR

**GUSTAVO BRASILEIRO COELHO**

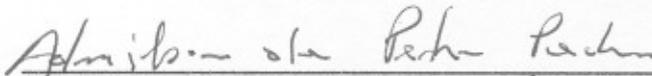
Dissertação defendida e aprovada em 01.06.06.

Banca Examinadora:



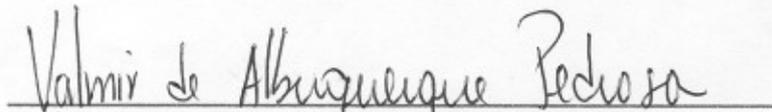
---

**Prof. Dr. JOSÉ LUIZ PORTUGAL (Orientador)**  
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



---

**Prof. Dr. ADMILSON DA PENHA PACHÉCO**  
Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



---

**Prof. Dr. VALMIR DE ALBUQUERQUE PEDROSA**  
Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de Alagoas

## DEDICATÓRIA

À minha maravilhosa e amada família, Papai, Mamãe, Nanim, Pingote, Vovó e minha Loirinha, que são as pessoas mais importantes do mundo.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha noiva Ilana, pela paciência e força nas horas difíceis.

A todos os meus amigos e companheiros de mestrado, pelas horas de estudos e de diversão também.

Ao meu orientador professor Portugal, as professoras Lucilene Antunes e Ana Lúcia Candeias, pela ajuda dada sempre que precisei, e a todos os professores do Mestrado.

Aos meus gurus da engenharia Henrique Lima e José de Ribamar Sousa, pelo incansável incentivo na pesquisa e por sempre acreditar no meu potencial.

À minha amiga Renata Luna pela ajuda na aquisição dos dados da pesquisa.

À Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, por disponibilizar dados importantes para a pesquisa.

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 – OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3 – EMBASAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
3.1 – A NATUREZA DOS RECURSOS HÍDRICOS .....	4
3.2 – MODELOS HIDROLÓGICOS .....	8
3.2.1 – <i>Considerações Iniciais</i> .....	8
3.2.2 – <i>Classificação dos Modelos</i> .....	10
3.2.3 – <i>Determinação dos Parâmetros dos Modelos</i> .....	11
3.3 – MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUÍDOS .....	15
3.4 – SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICA .....	17
3.4.1 – <i>Bases Conceituais</i> .....	17
3.4.2 – <i>Modelo Digital do Terreno (MDT)</i> .....	19
3.4.2.1 – <i>Métodos Globais e Locais de Interpolação Espacial</i> .....	20
3.4.2.2 – <i>Obtenção da Malha Triangular Irregular (TIN)</i> .....	22
3.4.2.3 – <i>Obtenção de Grade Regular</i> .....	24
3.4.2.4 – <i>Aplicação do MDT em Estudos Hidrológicos</i> .....	26
3.5 – INTEGRAÇÃO DOS SISTEMAS DE GEOINFORMAÇÃO E ESTUDOS HIDROLÓGICOS .....	29
<b>4 – METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>35</b>
4.1 – ESTRUTURAÇÃO DO SIG PROPOSTO.....	35
4.2 – ORGANIZAÇÃO DOS PLANOS DE INFORMAÇÃO .....	39
4.2.1 – <i>Determinação do PI de Chuva</i> .....	39
4.2.2 – <i>Determinação do PI de Solo</i> .....	40
4.2.3 – <i>Determinação do PI da Altimetria</i> .....	40
4.3 – TRATAMENTO DOS PLANOS DE INFORMAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	41
4.4 – VALIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO.....	44
4.5 – IMPLEMENTAÇÃO DO SIG .....	45
<b>5 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	46
5.1.1 – <i>Série Histórica de Vazão</i> .....	48
5.1.2 – <i>Série Histórica de Chuva</i> .....	49
5.1.3 – <i>Altimetria</i> .....	51
5.1.4 – <i>Dados de Solo</i> .....	52
5.2 – METODOLOGIA .....	53
5.2.1 – <i>Definição da Bacia Hidrográfica</i> .....	53
5.2.2 – <i>Organização dos Dados de Chuva</i> .....	58
5.2.3 – <i>Tratamento dos Dados</i> .....	61
5.2.4 – <i>Calibração e Validação dos Parâmetros</i> .....	62
5.3 – IMPLEMENTAÇÃO DO SIG .....	66
<b>6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>73</b>

## RESUMO E PALAVRAS CHAVE

A pesquisa teve com principal foco utilizar as tecnologias dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para analisar e simular o processo de transformação de chuva em vazão. Para tanto foi estabelecida uma metodologia para implementação de um SIG que simula a transformação de chuva em vazão, baseada nos modelos hidrológicos distribuídos e no cruzamento de planos de informação no formato *raster*. Trabalhou-se com um modelo hidrológico distribuído simplificado, baseado na equação do método racional, onde todas as perdas sofridas pela água no ciclo hidrológico foram expressas por um único coeficiente. Foram utilizados dados de chuva, capacidade de escoamento superficial do solo e altimetria para calibrar e validar o modelo de transformação de chuva-vazão. Foi utilizada álgebra de mapas para organizar e determinar os parâmetros necessários do modelo. A validação da metodologia foi realizada na bacia hidrográfica do rio Salgado, localizada ao sul do Estado do Ceará. Os coeficientes do modelo foram calibrados de acordo com a realidade dessa região estudada, diferentemente da grande maioria dos modelos que utilizam coeficientes de literaturas oriundos de experiências em outras regiões, em laboratórios ou por formulações matemáticas e estatísticas. A metodologia implantada foi validada através do coeficiente de determinação  $R^2$ .

**Palavras-Chaves:** SIG, Simulação Hidrológica, Álgebra de Mapas, MDT

## **ABSTRACT AND KEYWORDS**

The research had with main focus to use the technologies of the Geographical Information Systems (GIS) to analyze and to simulate the process of transforms of rainfall in runoff. For in such, a way was established a methodology for implements a SIG that simulates the transformation of rain in run-off based in the distributed hydrologic model and the crossing of plans of information in raster format. It worked with a simple distributed hydrologic model, based in equation of rational model, where all the losses suffered in hidrologic cycle had been express for one coefficient. Were used the rain data, capacity of superficial draining of the ground and altimetry to calibrate and to validate the model of transforms rainfall-runoff. Was used maps algebra to organize and to determine the necessary partes of the model. The validation from the methodology went achieved at the basin from the Salgado river, located to the south from the Ceará Estate. The coefficients had been calibrated in accordance with the reality of the region of the research, differently of the great majority of the models that use deriving coefficients of literatures of experience in others regions. The methodology was validated with coefficient of determination  $R^2$ .

**Keywords:** GIS, Hidologic Simulation, Maps Algebra, MDT

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ILUSTRAÇÃO DO CICLO HIDROLÓGICO .....	5
FIGURA 2 – ILUSTRAÇÃO DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA .....	6
FIGURA 3 – MODELAGEM DO MUNDO REAL ATRAVÉS DO SIG .....	18
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DAS ESTRUTURAS VETORIAL E RASTER .....	19
FIGURA 5 – PRINCIPAIS ESTRUTURAS DE DADOS DOS MDT .....	19
FIGURA 6 – POLÍGONOS DE VORONOI E TRIANGULAÇÃO DE DELAUNAY .....	24
FIGURA 7 – DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO AGREE .....	27
FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO DO GRADIENTE E DO ASPECTO DE UM MDT .....	27
FIGURA 9 – DETALHAMENTO DO ASPECTO DE UM MDT .....	28
FIGURA 10 – ILUSTRAÇÃO DE UMA DEPRESSÃO NO MDT .....	28
FIGURA 11 – MODELO DE TRANSPORTE HÍDRICO (ADAPTADO MENDES E CIRILO, 2001) .....	29
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO DO MÓDULO HIDROGRAFIA DO ARCHYDRO .....	32
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO DO MÓDULO REDE DO ARCHYDRO .....	32
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO DO MÓDULO CANAL DO ARCHYDRO .....	32
FIGURA 15 – REPRESENTAÇÃO DO MÓDULO DRENAGEM DO ARCHYDRO .....	33
FIGURA 16 – REPRESENTAÇÃO DO MODELO NWIS .....	33
FIGURA 17 – TRATAMENTO DO PI DE CHUVA .....	42
FIGURA 18 – TRATAMENTO DO PI DE SOLOS .....	42
FIGURA 19 – CRUZAMENTO PI DE CHUVA E PI DE SOLOS .....	43
FIGURA 20 – ESTRUTURA DAS EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO .....	44
FIGURA 21 – ESTRUTURA DAS EQUAÇÕES DE VALIDAÇÃO .....	44
FIGURA 22 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DA APLICAÇÃO .....	46
FIGURA 23 – ESPACIALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA BACIA DO RIO SALGADO .....	48
FIGURA 24 – DADOS DA SÉRIE HISTÓRICA DE VAZÃO .....	49
FIGURA 25 – ESPACIALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE CHUVA .....	51
FIGURA 26 – ESPACIALIZAÇÃO DAS CARTAS TOPOGRÁFICAS .....	52
FIGURA 27 – TIPOS DE SOLO DA ÁREA .....	53
FIGURA 28 – DETALHE DA TRANSFORMAÇÃO DAS CURVAS DE NÍVEL EM PONTOS .....	54
FIGURA 29 – MDT GERADO PELA INTERPOLAÇÃO .....	55
FIGURA 30 – GRÁFICO DOS RESULTADOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA .....	56
FIGURA 31 – PONTO DO MDT QUE APRESENTARAM ERRO MAIOR QUE 20 METROS .....	56
FIGURA 32 – MDT SEM DEPRESSÕES .....	57
FIGURA 33 – DIREÇÃO DO FLUXO .....	57
FIGURA 34 – FLUXO ACUMULADO .....	58
FIGURA 35 – SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	58
FIGURA 36 – BACIA HIDROGRÁFICA CONTRIBUINTE DA ESTAÇÃO SÍTIO LAPINHA .....	58
FIGURA 37 – ESTAÇÕES UTILIZADAS PARA INTERPOLAÇÃO DO ANO DE 1985 .....	59
FIGURA 38 – ESTAÇÕES UTILIZADAS PARA INTERPOLAÇÃO DO ANO DE 2002 .....	60
FIGURA 39 – CHUVA JAN/85 .....	60

FIGURA 40 – CHUVA FEV/85 .....	60
FIGURA 41 – CHUVA MAR/85 .....	60
FIGURA 42 – CHUVA ABR/85 .....	61
FIGURA 43 – CHUVA MAI/85.....	61
FIGURA 44 – CHUVA JUN/85.....	61
FIGURA 45 – CHUVA JUL/85.....	61
FIGURA 46 – CHUVA NOV/85.....	61
FIGURA 47 – CHUVA DEZ/85 .....	61
FIGURA 48 – ILUSTRAÇÃO DA ÁLGEBRA DE MAPAS PARA DETERMINAÇÃO DA CHUVA PARA SOLO TIPO 1 .....	61
FIGURA 49 – ILUSTRAÇÃO DA ÁLGEBRA DE MAPAS PARA DETERMINAÇÃO DA CHUVA PARA SOLO TIPO 2 .....	62
FIGURA 50 – ILUSTRAÇÃO DA ÁLGEBRA DE MAPAS PARA DETERMINAÇÃO DA CHUVA PARA SOLO TIPO 3 .....	62
FIGURA 51 – COMPARAÇÃO ENTRE VAZÃO CALIBRADA E VAZÃO OBSERVADA .....	64
FIGURA 52 – COMPARAÇÃO ENTRE VAZÃO DA VALIDAÇÃO E VAZÃO OBSERVADA .....	64
FIGURA 53 – HISTOGRAMAS DOS DADOS DE VAZÃO.....	65
FIGURA 54 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS .....	66
FIGURA 55 – ILUSTRAÇÃO DO CRUZAMENTO DOS PLANOS DE INFORMAÇÃO .....	67
FIGURA 56 – VAZÃO ACUMULADA DA BACIA .....	67

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EXEMPLOS DE MODELOS UTILIZADOS NO GERENCIAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS (ADAPTADA DE TUCCI, 1998) .....	10
TABELA 2 – COORDENADAS (X,Y) E ATRIBUTO (Z) .....	21
TABELA 3 – ESTAÇÕES DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SALGADO.....	47
TABELA 4 - ESTAÇÕES DE CHUVA EXISTENTES NA PROXIMIDADE DA ESTAÇÃO SÍTIO LAPINHA.....	49
TABELA 4 - ESTAÇÕES DE CHUVA EXISTENTES NA PROXIMIDADE DA ESTAÇÃO SÍTIO LAPINHA (CONT.) .....	50
TABELA 5 – CARTAS TOPOGRÁFICAS DA REGIÃO DE INTERESSE .....	51
TABELA 6 – RESULTADOS DO ERRO ALTIMÉTRICO.....	55
TABELA 7 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS ENCONTRADOS PELO ALGORITMO.....	63
TABELA A.1 – QUANTIDADE DE CHUVA POR TIPO DE SOLO.....	73
TABELA A.2 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	78
TABELA A.3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO MODELO COM ÉPOCA.....	80

## 1 – INTRODUÇÃO

O recurso natural água sempre foi visto como essencial à vida, desde as comunidades primitivas. Os registros históricos apontam a fixação dos homens às margens de rios, onde surgiram as grandes cidades. Naquelas épocas, no entanto, a água se constituía em um bem abundante na natureza, dada a diminuta população mundial frente ao montante hídrico do planeta, bastando, portanto, postar-se em regiões providas do recurso. Com o passar do tempo, embora tenha ocorrido acelerado crescimento populacional, industrial e tecnológico, que acarretou um incremento substancial na demanda por água bruta, o pensamento acerca da pseudo-infinita oferta hídrica prolongou-se por anos.

Apenas no século passado, já tendo sido observadas e registradas as conseqüências do uso indiscriminado dos recursos hídricos, começou-se a tomar consciência sobre a real disponibilidade da água e fragilidade da população humana perante a escassez da mesma. Assim, inúmeros estudos começaram a ser desenvolvidos e profissionais a se especializarem, sempre no intuito de buscar formas de ampliar a oferta hídrica e, mais recentemente, gerenciá-la de forma mais adequada.

As preocupações da sociedade com problemas ligados ao uso e ao manejo das águas levaram ao debate e a inovações nas últimas décadas. Expressões como gerenciamento de recursos hídricos, gestão de águas e uso racional das águas passaram a fazer parte do dia-a-dia das pessoas e dos meios de comunicação. A maneira de abordá-las, de entendê-las, e principalmente, de praticá-las varia de pessoa para pessoa e, mesmo, de técnico para técnico. Apesar das diferenças de entendimento, há algo novo nascendo na sociedade: a aceitação de que a maneira de tratar os recursos hídricos deve mudar, conservando-os para as futuras gerações. Essa mudança de atitude decorreu, principalmente, de desastres ecológicos que resultaram na poluição de corpos hídricos e também da ocorrência de secas com graves conseqüências para alguns segmentos da sociedade.

O estudo da hidrologia é essencial para as análises e gerenciamento dos recursos hídricos. Uma tarefa importante da hidrologia é a quantificação das vazões

resultantes da chuva precipitada sobre uma bacia hidrográfica, ou seja, quantificação do processo de transformação de chuva em vazão. A complexidade desse processo tem sido simplificada teoricamente por meio de modelos matemáticos, os quais têm finalidade de representar o processo de maneira relativamente simples, fornecendo resultados compatíveis com os observados através de medições de chuvas e vazões. As descrições matemáticas dos modelos perdem a variabilidade espacial dos dados, na medida em que são utilizadas as médias como artifício para distribuir os dados para toda a região, comprometendo o melhor entendimento dos processos hidrológicos.

Com a finalidade de detectar variações locais nos processos hidrológicos, visualiza-se como pertinente o emprego dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Assim essa pesquisa utilizou-se das tecnologias dos SIGs para analisar e simular o processo de transformação de chuva em vazão, a partir de dados de chuva, solo e altimetria para simular a vazão distribuída ao longo de uma bacia hidrográfica. Para tanto foi utilizada técnica de interpolação espacial para estimar a distribuição da chuva na bacia, a derivada direcional e o gradiente, para descrever o caminho das águas, e álgebra de mapas para cruzar os planos de informação e calcular a vazão.

Foi estabelecida uma metodologia para implementação de um SIG que simula a transformação de chuva em vazão, baseada nos modelos hidrológicos distribuídos e no cruzamento de planos de informação no formato *raster*. O modelo proposto do SIG foi calibrado e validado através da comparação da vazão calculada a partir da associação de dados de chuva e solo, com a vazão observada. A qualidade do ajuste do modelo foi verificada através do coeficiente de determinação  $R^2$ .

## **2 - OBJETIVOS**

### **2.1 – Objetivo Geral**

Estabelecer uma metodologia para implementação de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para analisar e simular o processo de transformação de chuva em vazão.

### **2.2 – Objetivos Específicos**

- a) Modelar o caminho percorrido pela água em uma bacia hidrográfica;
- b) calibrar e validar o SIG através da associação dos dados locais de chuva e solo; e
- c) calcular um plano de informação que apresente o valor da vazão distribuída ao longo da bacia hidrográfica;

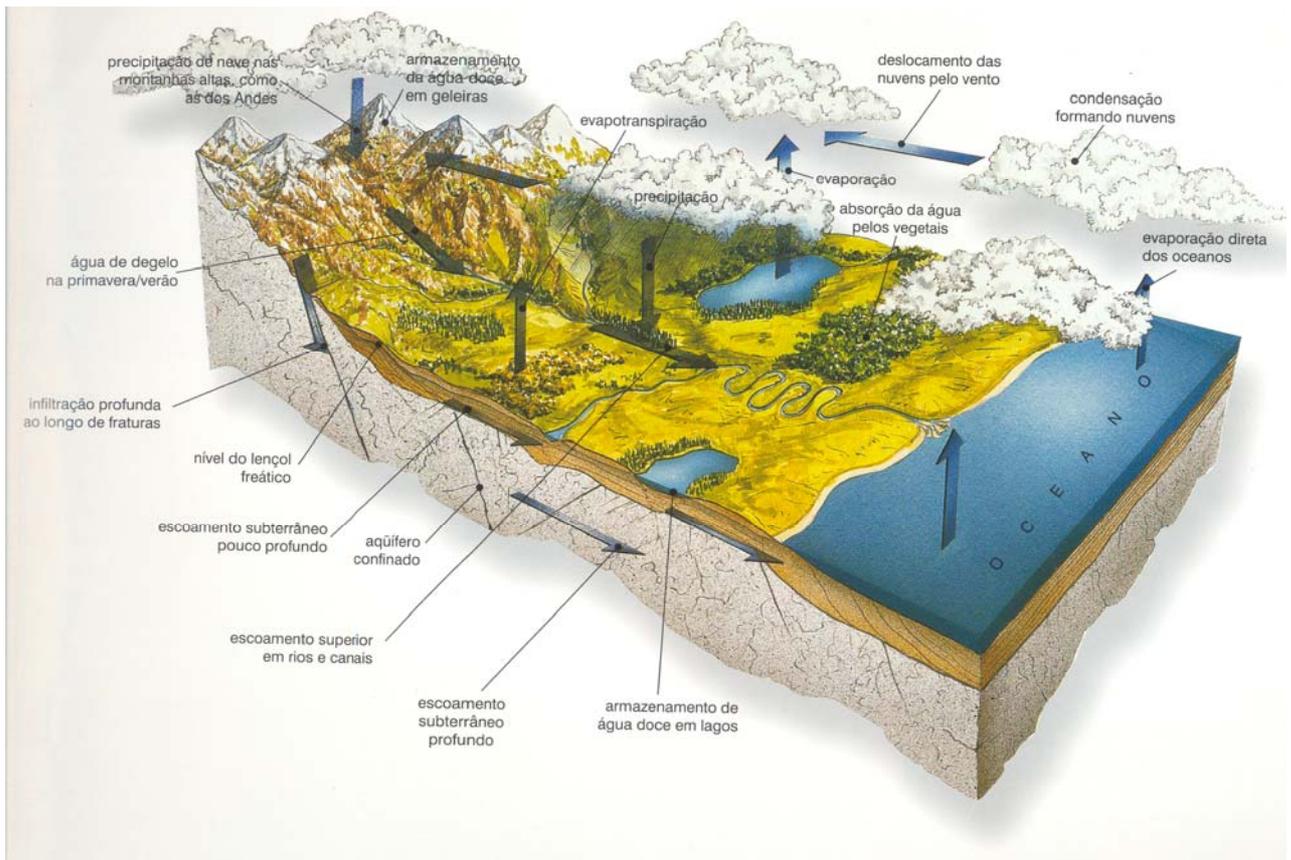
## 3 – EMBASAMENTO TEÓRICO

### 3.1 – A Natureza dos Recursos Hídricos

A palavra Hidrologia é originária das palavras gregas *Hydor*, que significa água e *Logos*, que significa ciência, ou seja, é a ciência que estuda toda a manifestação de água na natureza, sua ocorrência, distribuição, circulação, propriedades físico-químicas, o seu efeito sobre o meio ambiente e sobre os seres vivos. A hidrologia está relacionada ao estudo das precipitações e do escoamento, à associação destes eventos com o meio físico e as alterações deste sobre o meio, como o dimensionamento de obras estruturais, ou seja, abastecimento de água, controle de inundações, drenagem, projetos de barragens etc.

O processo hidrológico em que se consideram as constantes movimentações da água no planeta, passando pelos seus diversos estados físicos, denomina-se ciclo hidrológico ou ciclo da água. Não há determinado um início ou fim para o processo ininterrupto de movimentação das massas de água no planeta. O ciclo hidrológico é o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, detenção e escoamento superficial, infiltração, percolação da água no solo e nos aquíferos, escoamentos fluviais e interações entre esses componentes. A Figura 1 ilustra os componentes do ciclo hidrológico. É importante destacar alguns tópicos deste ciclo, quais sejam:

- a) Sob condições favoráveis a água condensada nas nuvens precipita (sob forma de neve, granizo ou chuva), podendo ser dispersa das seguintes maneiras: retenção temporária no solo próximo de onde caiu, escoamento sobre a superfície do solo ou através do solo para os rios e penetração no solo profundo;
- b) as depressões superficiais, porventura existentes, retêm a água precipitada temporariamente. Essa água poderá retornar para compor as fases seguintes do ciclo pela evaporação e transpiração das plantas, pela infiltração, ou ainda pelo escoamento superficial;
- c) os escoamentos superficial e subterrâneo decorrem da ação da gravidade, podendo parte desta água ser evaporada ou infiltrada antes de atingir o curso de água;

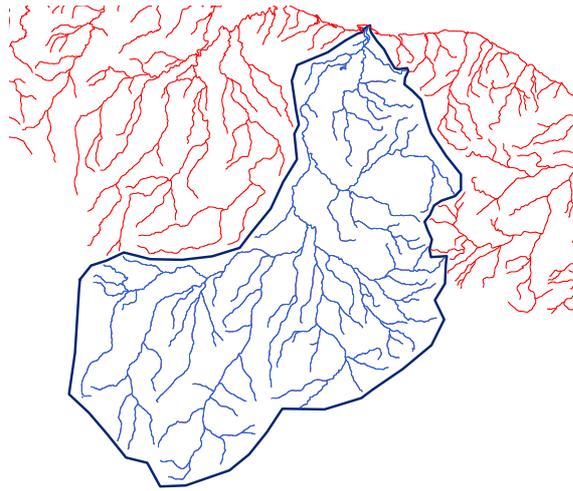


**Figura 1 – Ilustração do Ciclo Hidrológico**

- d) parte da água precipitada se presta ao suprimento do lençol subterrâneo. O trajeto da água se inicia com a infiltração seguida de percolação ao encontrar a zona saturada que é o aqüífero. O lençol freático se prestará a alimentação de cursos de água suprindo deficiência em períodos de estiagem. Uma parcela da água ainda prossegue penetrando no solo, agora mais vagorosamente, para prover aqüíferos confinados;
- e) atingindo os corpos hídricos, a água prossegue seu caminho de volta ao oceano, completando o ciclo;
- f) a evaporação acompanha o ciclo hidrológico em quase todas as suas fases, seja durante a precipitação, seja durante o escoamento superficial.

Dentro do interesse mais restrito da hidrologia destaca-se a chamada "parte terrestre do ciclo hidrológico", onde a atmosfera e os oceanos são substituídos por condições de contorno adequadas. A principal vantagem desse método é que se pode voltar a atenção para uma extensão limitada de terra, uma bacia hidrográfica, que constitui a unidade espacial natural da hidrologia (RIGHETTO 1998).

Define-se como bacia hidrográfica de um rio, em um dado ponto, a superfície limitada por um contorno, dentro do qual toda a água precipitada, quando não é evaporada, infiltrada ou retida, escoam para aquele ponto (SANTOS et al., 2001). No Brasil, a Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos considera a bacia hidrográfica como unidade territorial básica para a gestão dos Recursos Hídricos.



**Figura 2 – Ilustração de uma Bacia Hidrográfica**

Em razão de sua relevância para o presente trabalho são detalhados a seguir os processos de precipitação, infiltração e escoamento.

Precipitação, em Hidrologia, é o termo geral dado a todas as formas de água depositadas na superfície terrestre, oriundas do vapor de água na atmosfera, tais como neblina, geada, neve, granizo e chuva. Comumente o termo precipitação é utilizado como chuva, pois no Brasil é incomum neve, e as outras formas de água contribuem pouco para a vazão dos rios. A forma mais utilizada para quantificar a chuva precipitada é através das estações de medições chamadas de estações pluviométricas, as quais utilizam o equipamento conhecido como pluviômetro para fazer as medições de chuva.

O pluviômetro é um aparelho dotado de uma superfície de captação horizontal delimitada por um anel metálico e de um reservatório para acumular a água recolhida, ligado a essa área de captação. A quantidade de chuva é medida em milímetro (onde  $1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2$ ), que geralmente é calculada pela relação entre o volume de água recolhido no aparelho e a sua área de captação. As precipitações acumuladas em 24 horas e observadas antes do meio dia devem

ser atribuídas ao dia anterior, pois a maior parte do período transcorrido entre as observações ocorreu neste período. A ausência de precipitação é também um valor observado e não pode ser confundida com falha de observação.

Denomina-se infiltração o fenômeno de penetração da água nas camadas de solo próximas à superfície do terreno, movendo-se para baixo, através dos vazios, sob a ação da gravidade, até atingir uma camada de suporte, que a retém, formando então a água do solo. O espaço vazio entre os grãos que compõem a estrutura do solo é o espaço disponível para a água se acumular e se movimentar no meio poroso. A porosidade do solo, definida pela relação entre o volume de vazios e o volume da amostra de solo é um parâmetro que permite especificar a máxima capacidade de retenção de água no solo.

Para RIGHETTO (1998) não existem critérios eficientes para a escolha de uma determinada equação de infiltração. Os especialistas têm uma tendência de escolher equações que tenham suporte teórico e estejam amparadas por um grande número de experimentos em condições diversas em relação ao tipo de solo, a heterogeneidade etc.

O escoamento superficial em uma bacia hidrográfica é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida. Quando a bacia tem cobertura vegetal, o escoamento sofre influência dessa cobertura e grande parte desse escoamento se infiltra no solo; esse é o caso de bacias rurais. Nas bacias urbanas o escoamento é regido pela interferência do homem através de superfícies impermeáveis e sistemas de águas pluviais.

O comportamento do escoamento depende essencialmente da cobertura, da declividade e dos corpos hídricos da bacia. O escoamento superficial é resultado da água da chuva que não foi interceptada pela cobertura vegetal, não ficou retida em depressões, e não se infiltrou no solo. Essa água chega até um dreno melhor definido através dos caminhos de maior declividade e menor obstrução. A representação desse escoamento é difícil devido à heterogeneidade espacial das bacias hidrográficas.

## 3.2 – Modelos Hidrológicos

### 3.2.1 – Considerações Iniciais

Os estudos hidrológicos utilizam a bacia hidrográfica como unidade territorial, onde são feitas as análises do comportamento do ciclo hidrológico da região estudada. Para essas análises são utilizados modelos matemáticos para simular os processos envolvidos no ciclo hidrológico.

É importante lembrar que a bacia hidrográfica constitui um sistema físico extremamente complexo, em geral com diferentes propriedades físicas, heterogêneo e variável no tempo. Qualquer tentativa de representá-la através de um modelo matemático, por mais complexo e detalhado que seja, constitui sempre uma aproximação da realidade. A sua adequação ao problema estudado só pode ser julgada pelo confronto dos resultados calculados com as observações de campo (SANTOS et al., 2001).

Nos últimos anos, os modelos matemáticos têm estado presentes no desenvolvimento de diversas áreas do conhecimento humano, científico e das ciências naturais, como na física, astronomia, biologia, agricultura e hidrologia. Os modelos matemáticos podem obter relações de causa e efeito, sem que com isso tenha-se efetivamente realizado alguma ação sobre o modelo físico real (TUCCI 1998).

O modelo tem como objetivo entender um sistema e buscar suas respostas para diferentes entradas, ou seja, é uma representação do comportamento do sistema. No caso da hidrologia, o sistema é o ciclo hidrológico que ocorre em uma bacia. Esse sistema busca representar no todo ou em partes o comportamento de um processo hidrológico ou conjunto de processos, em um dado instante ou intervalo de tempo. Assim, nos modelos hidrológicos, o sistema físico real que geralmente é representado é cada um dos componentes do ciclo hidrológico, no âmbito da bacia hidrográfica.

Entre os modelos mais simples em hidrologia destaca-se a chamada equação do balanço hídrico, sobre um determinado intervalo de tempo, para uma dada bacia hidrográfica. O mesmo é representado pela seguinte equação:

$$P - ET = D + \Delta S$$

(Equação 1)

onde **P** é a precipitação, **ET** é a evapotranspiração, **D** é o deflúvio e  $\Delta S$  é a variação do armazenamento (superficial ou subterrâneo).

Para o perfeito entendimento e utilização do balanço hídrico, fica evidente a necessidade de medir uma série de variáveis hidrológicas e meteorológicas para permitir o conhecimento das características hidrológicas e para possibilitar a aplicação dos modelos matemáticos que permitem prever ou estimar estas variáveis.

Basicamente, as limitações dos modelos hidrológicos são: i) a quantidade e qualidade dos dados hidrológicos; ii) a dificuldade de formular matematicamente alguns dos processos; e iii) a simplificação do comportamento espacial de algumas variáveis e fenômenos. O processo de utilização do modelo hidrológico para estimar uma resposta num sistema hidrológico a partir de dados de entrada é definido como simulação hidrológica. No caso da presente pesquisa estudou-se a simulação hidrológica do processo de transformação de chuva em vazão. A simulação hidrológica percorre geralmente as seguintes fases: i) estimativa ou ajuste, onde os parâmetros são calibrados e determinados; ii) verificação, onde se analisa a validade dos parâmetros determinados pelo ajuste do modelo; e iii) previsão, que quantifica as respostas de diferentes entradas, simulando-se o modelo com parâmetros ajustados.

A estimativa dos parâmetros do modelo depende da disponibilidade e da qualidade dos dados históricos, do tamanho das amostras e das características físicas do sistema. O ajuste dos parâmetros é obtido principalmente por tentativa ou por otimização. A tentativa é caracterizada quando, onde existindo valores de entrada e saída, determinam-se os parâmetros que melhor representam os valores observados através do modelo utilizado. A otimização é caracterizada quando os mesmos dados do processo por tentativa são utilizados em formulações matemáticas, procurando-se minimizar (ou maximizar) uma função objetivo que retrata a relação entre os dados observados e calculados pelo modelo.

A verificação é a fase da simulação em que o modelo é verificado com dados diferentes dos utilizados na fase de estimativa. Essa fase também pode ser entendida como validação, onde os dados de saída são utilizados somente para observar se o modelo simula o sistema adequadamente.

A previsão pode ser entendida como a fase da simulação onde o modelo, depois de ajustado e verificado, é utilizado para situações desconhecidas. A qualidade da previsão depende da representatividade dos períodos utilizados no ajuste e na verificação, da discretização do sistema, das condições de contorno do sistema e da capacidade do modelo em simular as alternativas escolhidas.

### 3.2.2 – Classificação dos Modelos

Segundo TUCCI (1998) os modelos hidrológicos podem ser classificados em:

- a) Contínuo e Discreto, dependendo da forma de representação dos dados;
- b) Concentrado e Distribuído, quanto à variabilidade espacial das variáveis utilizadas;
- c) Estocástico e Determinístico; se o modelo segue ou não as leis da estatística;
- d) Conceitual e Empírico; dependendo se as funções utilizadas na sua elaboração levam ou não em consideração os processos físicos.

Devido ao grande número de alternativas existentes no planejamento dos recursos hídricos, considerando seus usos, disponibilidade e preservação, é necessário utilizar modelos que melhor quantifiquem os processos hidrológicos, permitindo analisar alternativas que auxiliem no processo de decisão. A Tabela 1 apresenta alguns modelos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos.

**Tabela 1 – Exemplos de Modelos Utilizados no Gerenciamento dos Recursos Hídricos (adaptada de TUCCI, 1998)**

Nome do Modelo	Classificação	Características	Principais Usos
Chuva-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Calcula a vazão de uma bacia a partir da chuva	Extensão de séries de vazão; dimensionamentos; avaliação do uso da terra
Vazão-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazão; dimensionamentos; previsão de cheias
Geração Estocástica de Vazão	Estocástico	Calcula a vazão com base nas características das séries históricas	Dimensionamento do volume de um reservatório
Fluxo Saturado	Determinístico	Determina a vazão potencial de águas subterrâneas	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; iteração rio-aquífero, etc.
Hidrodinâmico	Determinístico	Sintetiza vazões em rios e rede de canais	Simulação de alterações no sistema; efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de Água de Rios e Reservatórios	Determinístico	Simula a concentração de parâmetros de qualidade de água	Impactos de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais
Planejamento e Gestão de Sistemas Múltiplos	Estocástico; Determinístico	Simula condições de projeto e operação de sistemas	Reservatórios, canais, estações de tratamento; irrigação; navegação fluvial

O método racional é bastante utilizado em estudos hidrológicos, a despeito de sua denominação, este método envolve simplificações, seu mérito está na facilidade de obtenção dos elementos envolvidos. A formulação desse método é a seguinte:

$$Q = C \times i \times A \quad \text{(Equação 2)}$$

onde, Q é a vazão (m<sup>3</sup>/s), C é um coeficiente que depende da natureza da superfície que a água está escoando (adimensional), i é a intensidade da chuva sobre toda a bacia (mm/h) e A é a área da bacia (km<sup>2</sup>).

### 3.2.3 - Determinação dos Parâmetros dos Modelos

Na simulação hidrológica, quando se deseja ajustar um modelo a uma determinada bacia hidrográfica, procura-se determinar os valores dos parâmetros que melhor representem o comportamento físico da bacia. Esses parâmetros podem ser obtidos com o uso de técnicas iterativas de otimização. A otimização é a procura do valor de uma variável ou n variáveis, que definam o melhor resultado para uma função dependente destas variáveis, dentro de um objetivo e obedecidas às devidas restrições.

A função objetivo é uma das partes fundamentais na otimização dos modelos hidrológicos. É necessário adotarem-se critérios estabelecendo uma função que otimize o objetivo desejado, já que normalmente não é possível estabelecer uma função que seja explícita com relação as variáveis a serem otimizadas. No caso da simulação hidrológica o produto da simulação é a vazão calculada pelo modelo, que é comparada com a vazão observada, assim sendo, a função objetivo deve buscar medir a discrepância entre os valores dessas vazões, para que possa ser minimizada. As principais funções-objetivo, normalmente utilizadas, são as seguintes (TUCCI, 1998).

- a) Função Quadrática, que dá um peso maior para as vazões maiores. No ajuste de um período contínuo de vazões a tendência do ajuste será o de ajustar melhor as enchentes;

$$F_1 = \sum_{i=1}^N (QO_i - QC_i)^2 \quad \text{(Equação 3)}$$

onde  $QO_i$  são as vazões observadas;  $QC_i$  são vazões calculadas.

- b) Função Módulo, também dá maior peso aos valores maiores, apesar de buscar minimizar as diferenças, não garante a preservação da diferença mínima no volume;

$$F_2 = \sum_{i=1}^N |QO_i - QC_i| \quad \text{(Equação 4)}$$

- c) Função Inversa, onde o peso maior é dado a vazões menores; e

$$F_3 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{QO_i} - \frac{1}{QC_i} \right)^2 \quad \text{(Equação 5)}$$

- d) Função Relativa, essa função procura retirar o peso excessivo dados aos valores absolutos da função quadrática.

$$F_4 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{QO_i - QC_i}{QO_i} \right)^2 \quad \text{(Equação 6)}$$

Segundo o mesmo autor as principais limitações das técnicas de otimização são as seguintes.

- A função objetivo nem sempre retrata o comportamento esperado das curvas, apresentando anomalias na vizinhança da solução;
- a solução pode convergir para parâmetros inconsistentes, já que existem infinitas soluções matemáticas possíveis, mas irreais do ponto de vista físico;
- o mínimo obtido pode ser local e não global, pois depende muito do ponto de partida;
- quando a quantidade de parâmetro cresce muito, por exemplo quando a bacia é dividida em um grande número de sub-bacias, e a série simulada envolve muitos intervalos de tempo, o processo pode ser lento e o usuário perde a noção do desejo ótimo;
- quando existem muitas incertezas nos dados observados, essas incertezas são transferidas para o ajuste, o que pode provocar resultados absurdos; e
- existência de descontinuidades da função objetivo devido as características da estrutura do modelo.

Eventualmente alguns modelos hidrológicos são denominados de chuva-vazão, já que são aplicados com o objetivo de simular a resposta da bacia em termos de vazão para uma determinada seção fluvial de interesse, a partir de uma precipitação (chuva) conhecida (ROSA, 2002).

A estrutura dos modelos chuva-vazão é baseada nos seguintes elementos:

- a) **Discretização da Bacia Hidrográfica:** a discretização está relacionada aos critérios utilizados para sub-divisão espacial para representar a bacia, que podem ser:
  - a.1) Concentrado, onde é utilizada precipitação média e variáveis concentradas no espaço para toda a bacia. É geralmente utilizado em bacias pequenas, onde a distribuição espacial dos parâmetros e das variáveis, não compromete os resultados do estudo;
  - a.2) Distribuído por Sub-Bacia, nesse caso a bacia é dividida em sub-bacias conforme rede de drenagem; essa divisão se baseia normalmente na disponibilidade de dados, nos locais de interesse e na variabilidade de parâmetros físicos da bacia;
- b) **Variável de Entrada:** a variável de entrada tem como principal elemento a precipitação, embora as incertezas existentes em seus valores medidos sejam uma das principais fontes de erros do uso dos modelos.
- c) **Aquisição de dados Físicos:** a grande variabilidade das características naturais e do uso do solo resulta numa grande quantidade de informações a serem transferidas para os modelos, principalmente para os modelos distribuídos onde existem mais relações entre características físicas e os parâmetros dos modelos.
- d) **Determinação dos Parâmetros:** os modelos têm parâmetros estimados baseados nas características físicas da bacia, e outros que devem ser ajustados com base nos dados observados das variáveis de entrada e saída.

Os modelos chuva-vazão realizam, basicamente, um balanço hídrico em que a entrada é a chuva e a evapotranspiração, e as saídas são expressas pelas vazões. Os dados de entrada devem ter uma série suficientemente longa para

permitir a extensão da série de vazões no local de interesse (TUCCI, 1998). Pode-se ajustar um modelo chuva-vazão em uma seção fluviométrica objetivando maior precisão no ajuste para vazões médias e mínimas, já que estas são as mais importantes para o gerenciamento. Os parâmetros ajustados para esta seção poderão ser relacionados com as características da bacia, para, a partir da caracterização da bacia do local sem dados, efetuar a transferência de parâmetros para o uso do modelo (CRUZ, 2001).

As limitações ao uso de modelos chuva-vazão podem ser relativas a: disponibilidade de dados de chuva representativos da região (incerteza espacial) e clima (incerteza temporal); representatividade da estimativa da evapotranspiração; incerteza de conexão de aquíferos ao rio, nas caracterizações do tipo de solo e na definição da curva chave (dos dados de ajuste, quando existirem); simplificações do processo assumidas na elaboração do modelo, isto é, na capacidade que o modelo tem de captar as principais informações referentes ao processo e incerteza na transferência de parâmetros do modelo, função que pode ser não linear, desconhecida e complexa.

ROSA (2002) propôs a utilização da tecnologia SIG, juntamente com modelos chuva-vazão, para fins de determinação da influência do processo de urbanização na ação catalisadora dos grandes eventos de cheias. A metodologia proposta é a obtenção dos parâmetros do referido modelo através de SIG e a conseqüente integração destes dados ao modelo hidrológico chuva-vazão, como subsídios para a fase de simulação.

Pelo método tentativa e erro, o usuário testa diferentes conjuntos de parâmetros, prosseguindo nesta operação, até alcançar um vetor de parâmetros que quando utilizado no modelo possa, tanto quanto possível, representar a resposta natural da bacia àquela precipitação. Este método é suscetível à experiência do usuário, onde usuários mais experientes por uma correta interpretação dos parâmetros podem convergir para valores coerentes com a precisão almejada mais rapidamente.

Pelo método automático busca-se um vetor adequado de parâmetros, através de formulações matemáticas de otimização, onde é feita minimização (ou maximização) de uma função objetivo que mede o desvio entre as séries de vazão

observada e simulada. A função objetivo é a representação matemática desta diferença, e a calibração busca um vetor de parâmetros representativo, capaz de achar o ponto ótimo da função. A cada passo, o algoritmo calcula novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção do valor ótimo para a função objetivo, quando então verifica-se a convergência e encerra-se o processo iterativo. O processo termina ao ser encontrado um ponto ótimo da função

Os resultados de um modelo hidrológico chuva-vazão aplicado a uma bacia do Rio Grande do Sul com área de 38.000 km<sup>2</sup>, foram analisados por MENDES e CIRILO (2001) através do coeficiente de determinação R<sup>2</sup>, onde foi analisada a correlação entre os valores de vazão observados em 12 estações de medição ao longo de 12 meses, e os valores calculados pelo modelo. O resultado encontrado do R<sup>2</sup> foi 0,92.

### **3.3 – Modelos Hidrológicos Distribuídos**

Grande parte do conhecimento atual sobre o processo físico da hidrologia já existia até a década de 60. A evolução dos computadores permitiu a formulação de modelos hidrológicos na forma de programas computacionais que foram aumentando com o passar do tempo.

A necessidade de resposta em diferentes pontos da região estudada, a heterogeneidade dos processos físicos da natureza, a disponibilidade de informações sobre a superfície terrestre através das tecnologias de Sensoriamento Remoto e SIG, e o avanço da informática, criaram as condições ideais para o desenvolvimento de Modelos Hidrológicos Distribuídos. Na literatura os modelos SHE (Sistema Hidrológico Europeu), TOPMODEL, VIC-2L e LARSIM são citados constantemente, quando se refere aos modelos hidrológicos distribuídos.

O modelo SHE trabalha com a bacia hidrografia dividida em células na forma de grade, cuja discretização varia de 50 x 50 m a 500 x 500 m na horizontal. Segundo COLLISCHONN (2001) esse modelo exige uma grande quantidade de dados que, teoricamente, podem ser medidos em laboratório ou experimentos na bacia.

O modelo TOPMODEL baseia-se na hipótese de que é possível representar a

heterogeneidade da bacia analisando-se a sua topografia, onde a predisposição de uma área elementar (célula) da bacia gerar escoamento horizontal, seja superficial ou sub-superficial, depende da área que contribui para esta área elementar e da declividade da área elementar.

Os modelos VIC-2L e LARSIM (*Large Area Runoff Simulation Model*) foram desenvolvidos ao longo da década de 90. Esses permitiam a simulação com intervalos de tempo de um dia ou menos. O modelo VIC-2L subdivide a bacia em grades regulares de células de dimensões entre 0,1 e 1 grau. O balanço de água no solo é realizado para cada uma das células e, em cada célula para um determinado número de blocos, de acordo com a cobertura vegetal. A capacidade de infiltração da água no solo varia entre os blocos, segundo valores determinados de acordo com o tipo de solo e a cobertura vegetal.

O modelo LARSIM também subdivide a bacia em uma grade regular de células quadradas e cada uma das células é subdividida em blocos que combinam uso do solo e cobertura vegetal. No modelo são descritos os seguintes processos hidrológicos: Interceptação; Acumulação, compactação e derretimento de neve e gelo; Evapotranspiração; Armazenamento no solo com drenagem rápida, lenta e muito lenta; Escoamento; Translação e retenção nos rios e Retenção em lagos e reservatórios.

COLLISCHONN (2001) desenvolveu um modelo hidrológico distribuído, para simulação de grandes bacias, baseado nos modelos VIC-2L e LARSIM. O modelo é composto pelos seguintes módulos:

- a) **Balanço de água no solo:** onde a bacia é dividida em células quadradas de tamanho suficiente para que se possa considerar que o transporte da água entre as células ocorra apenas por escoamento ao longo dos principais rios (na pesquisa Collischonn utilizou células de 10 x 10 km). Cada célula é dividida em blocos definidos pela cobertura vegetal e pela capacidade de armazenamento do solo. Para o balanço hídrico do solo são utilizados os seguintes parâmetros: Precipitação, menos a interceptação; Evapotranspiração da água no solo; Drenagem superficial; Drenagem sub-superficial; e Drenagem subterrânea.
- b) **Escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo:** como o escoamento

não atinge instantaneamente a rede de drenagem, o modelo representa esse efeito pela passagem do escoamento por reservatórios lineares;

- c) **Escoamento na rede de drenagem:** cada célula escoar para uma de suas oito vizinhanças. O modelo diferencia células fontes e células com curso de água, onde nas células fonte é realizada a propagação apenas na célula, e nas células com curso de água além da propagação na célula é realizada a propagação na rede de drenagem.

SILVA (2002) desenvolveu um modelo que permite a predição da vazão máxima e do volume escoado para qualquer posição de uma bacia hidrográfica mesmo para condições de umidade diferentes da saturação. Considera os processos de precipitação, evapotranspiração, interceptação pela cobertura vegetal, armazenamento superficial, infiltração da água no solo e escoamento superficial, utilizando o modelo de ondas cinemáticas, a partir do modelo digital de elevação do terreno.

Os modelos hidrológicos estão se tornando cada vez mais globais, tanto em escala espacial como nível de detalhamento. A globalização da hidrologia se manifesta nos seguintes caminhos (SINGH e FIORENTINO, 1996): modelos hidrológicos distribuídos estão crescendo cada vez mais; a utilização dos modelos hidrológicos compostos de modelos de circulação global e modelos oceânicos está sendo mais necessária devido as freqüentes mudanças climáticas no planeta; os estudos hidrológicos estão integrando todas as suas antigas divisões artificiais, como por exemplo, escoamento superficial e escoamento subterrâneo. Essa globalização requer uma grande quantidade de dados e sofisticadas técnicas de gerenciamento e processamento desses dados. As tecnologias de sensoriamento remoto, sistema de posicionamento global e sistemas de geoinformação têm constantemente auxiliado a suprir as demanda provenientes da globalização dos estudos hidrológicos.

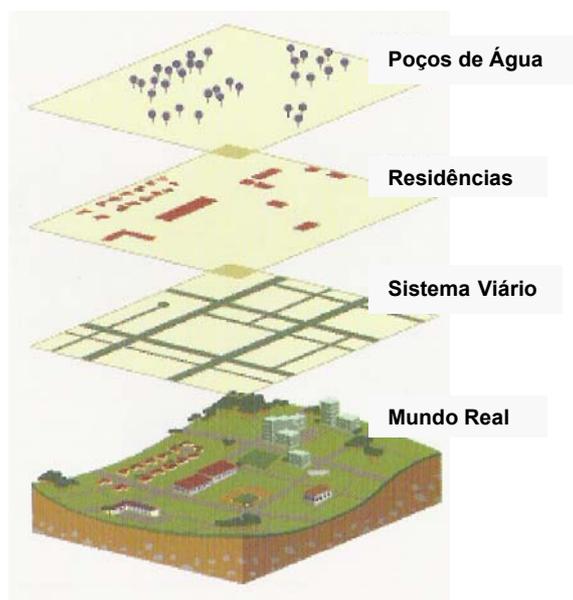
### **3.4 – Sistemas de Informações Geográfica**

#### **3.4.1 – Bases Conceituais**

O termo Sistema de Informação Geográfica tem sua origem na década de sessenta. Esse termo vem do inglês *Geographic* ou *Geographical Information System* – GIS. Especula-se que os SIGs tiveram suas primeiras atuações através de duas

aplicações, uma no Canadá e outra nos Estados Unidos (SINGH e FIORENTINO, 1996). A primeira utilizada no mapeamento das informações para o inventário das terras do Canadá, onde foram estimadas as áreas de diversos usos da terra. Nos Estados Unidos foram analisados e representados em um mapa diversos tipos de informações, as quais foram utilizadas em modelos de transporte de larga escala (COPPOCK e RHIND, 1991).

GOODCHILD (1993) afirma que a tecnologia SIG desempenha várias tarefas, tais como: processamento de uma grande quantidade de dados armazenados em locais adequados; análise e calibração de modelos, previsões e estimativas; pós-processamento dos resultados através da tabulação e mapeamento dos dados. Os SIGs podem simplesmente ser definidos com a idéia de base dados espaciais (LANG, 2000). Isso significa que localizações geográficas da superfície do globo terrestre podem ser armazenadas em sistemas computacionais através de sistemas de coordenadas. A tecnologia SIG permite a visualização simultânea de diferentes camadas de dados, bem como a análise e a simulação desses dados. Uma informação quantitativa pode ser conectada ao dado geográfico através do SIG, e assim possibilitar a modelagem do mundo real de uma forma mais aproximada. A Figura 3 ilustra as camadas de dados utilizadas pela tecnologia do SIG para representar determinada abstração do mundo real.



**Figura 3 – Modelagem do Mundo Real através do SIG**

Existem dois tipos de estrutura de dados gráficos no SIG: estrutura vetorial e estrutura *raster* (ARONOFF, 1995 e BURROUGH e McDONNELL, 1998). Na estrutura

vetorial os objetos do mundo real são representados através de pontos, linhas e polígonos, onde a posição de cada objeto é definida para um sistema de coordenadas. Na estrutura *raster* o espaço é dividido em células, a posição geográfica do objeto é definida através de linhas e colunas. A Figura 4 a seguir ilustra os objetos na representação vetorial e *raster*.

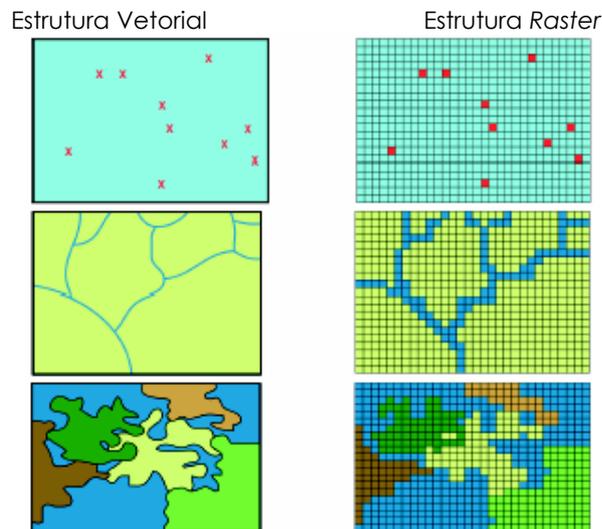


Figura 4 – Representação das Estruturas Vetorial e Raster

### 3.4.2 - Modelo Digital do Terreno (MDT)

Para BORROUGH (1986), o MDT é uma representação digital das variações do relevo da superfície terrestre. Um MDT é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre (CÂMARA et al., 2004). Segundo MENDES e CIRILO (2001) o MDT é um *grid* (matriz) de números que representam a distribuição geográfica de elevação do terreno com relação ao nível médio dos mares.

As estruturas de dados dos MDT mais utilizadas são grades regulares, onde o modelo se aproxima da superfície através de um poliedro de faces retangulares; e grades triangulares, onde o poliedro possui faces triangulares. Essas estruturas estão ilustradas na Figura 5.

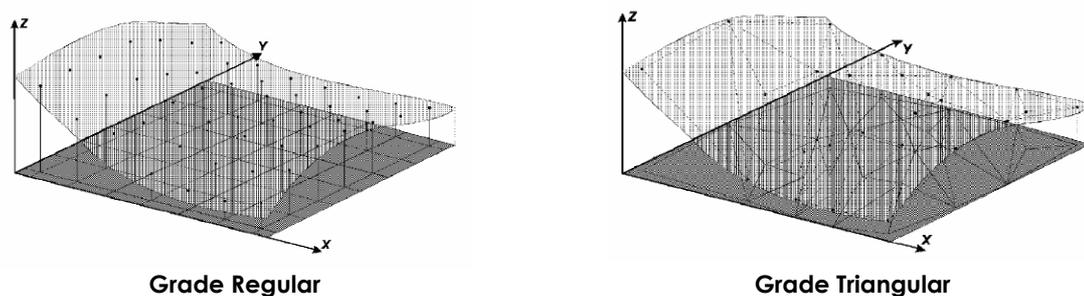


Figura 5 – Principais Estruturas de Dados dos MDT

### 3.4.2.1 – Métodos Globais e Locais de Interpolação Espacial

As grades regulares e triangulares são obtidas por interpolação espacial a partir de uma amostra de dados. Interpolação espacial é um procedimento que tem por finalidade estimar valores de pontos desconhecidos a partir de pontos conhecidos, dentro de uma área previamente delimitada. Entenda-se “ponto” como uma feição geométrica identificada por suas coordenadas, num sistema cartesiano perfeitamente definido.

As técnicas de interpolação são geralmente classificadas em métodos globais e métodos locais. A diferença entre elas reside no modo como os pontos com valores conhecidos, também chamados de pontos de controle ou amostra, são manipulados.

Os interpoladores globais envolvem toda a amostra para a estimativa. São normalmente empregados para análise exploratória, citando-se como exemplo os modelos de regressão e as superfícies de tendência.

Dos interpoladores globais somente será mencionado a superfície de tendência, uma vez que esse assemelha-se a um modelo de regressão com duas variáveis. A superfície de tendência se baseia no fato de que se um atributo ocorre continuamente num espaço bi-dimensional, é possível modelá-la segundo uma superfície matematicamente suavizada.

O princípio do método é adaptar uma superfície à amostra, de modo a minimizar a soma dos quadrados dos resíduos (valor observado – valor estimado). Essa superfície é identificada por um polinômio de ordem  $p$ . Assume-se que as coordenadas  $(x,y)$  são as variáveis independentes e que o atributo de interesse  $z$  é a variável dependente normalmente distribuída. Em duas dimensões tem-se um

polinômio da forma  $f(x,y) = \sum_{r+s \leq p} (b_{rs} \cdot x^r \cdot y^s)$ , onde  $x$  e  $y$  são as coordenadas da superfície e  $p$  sua ordem.

Como exemplos de superfícies citam-se:

- a)  $f(x,y) = b_0$  para um plano horizontal (ordem zero);
- b)  $f(x,y) = b_0 + b_1x + b_2y$  para um plano inclinado (ordem um);

c)  $f(x,y) = f(x,y) = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2$  para superfície quadrática (ordem dois).

Existem  $P = (p+1)(p+2)/2$  coeficientes que são calculados de modo a minimizar  $\sum_{i=1}^n (z(x_i) - f(x_i))^2$ , onde  $x$  é o vetor notação de  $(x,y)$ .

Observa-se que a superfície de tendência é uma técnica de fácil entendimento, no que diz respeito ao modo como as superfícies são calculadas. Por possuir poder de suavização, raramente passa pelos pontos que lhe deram origem, a não ser que se trabalhe com polinômios de ordem elevada.

O principal emprego desse interpolador é servir de base à análise exploratória, de modo a identificar ruídos na amostra.

Detalha-se um exemplo prático desse interpolador. Suponha que se deseje estimar o atributo  $z$  de um ponto de coordenadas  $x = 17943.42$  e  $y = 24427.83$ , a partir dos dados mostrados na Tabela 2, empregando-se uma superfície de ordem 1.

**Tabela 2 – Coordenadas (x,y) e atributo (z)**

X	Y	Z
19366.08	25603.44	25.79
17798.37	25427.08	29.97
16606.16	24989.55	25.72
17943.42	24427.83	?
18553.51	23936.15	25.77
17261.20	23934.47	24.59

Montagem das equações:

$$b_0 + b_1 19366.08 + b_2 25603.44 = 25.79$$

$$b_0 + b_1 17798.37 + b_2 25427.08 = 29.97$$

$$b_0 + b_1 16609.16 + b_2 24989.55 = 25.72$$

$$b_0 + b_1 18553.51 + b_2 23939.15 = 25.77$$

$$b_0 + b_1 17261.20 + b_2 23934.47 = 24.59$$

### Solução do sistema

$$b_0 = -7.66$$

$$b_1 = -0.000201302$$

$$b_2 = 0.00151893$$

### Cálculo do valor estimado

$$\hat{z} = -7.66 - 0.000201302 \times 17943.42 + 0.00151893 \times 24427.83 = 25.83$$

Os interpoladores locais partem do princípio que somente parte da amostra, próxima ao ponto desconhecido é que deve ser empregada para estimá-lo.

Para que isso seja possível, as seguintes operações são necessárias:

- a) especificação de uma área de influência ou vizinhança em torno do ponto a ser estimado;
- b) busca dos pontos dentro dessa vizinhança;
- c) escolha de um modelo matemático para representar a variação sobre esse limitado número de pontos;
- d) cálculo do valor do ponto desconhecido.

Vale ressaltar que a superfície de tendência pode ser tratada como um interpolador local, desde que as operações acima se processem.

Os interpoladores locais empregam parte da amostra, geralmente selecionada por sua vizinhança física em relação ao ponto desconhecido. Esses interpoladores partem do princípio que existem flutuações randômicas de pequena amplitude, ou seja, os pontos mais próximos dos desconhecidos tem maior influência nestes que os mais afastados. Como exemplo citam-se a malha triangular irregular, o inverso da distância ponderada, Kernel, entre outros.

#### **3.4.2.2 – Obtenção da Malha Triangular Irregular (TIN)**

A malha triangular irregular é obtida tomando-se por base os conceitos matemáticos duais Triangulação de Delaunay e Polígonos de Voronoi.

Os Polígonos de Voronoi são assim definidos: Dado um conjunto finito de pontos  $D$  em um sub-domínio  $\Omega^n$  em um espaço  $n$  dimensional  $R^n$ , para cada ponto  $d_i \in D$  encontra-se o conjunto  $L_i$  ( $L_i \subset \Omega^n \subset R^n$ ) de todos os pontos de  $\Omega^n$  que estão mais perto de  $d_i$  que qualquer outro ponto de  $D$ .

$$L_i = \{x \mid x \in \Omega^n \wedge ||x - d_i|| < ||x - d_j|| \forall j \neq i\}$$

As regiões de Voronoi resultantes  $L_i$  formam uma rede em  $\Omega^n$ , representada por

$$\Omega^n = \bigcup_i L_i$$

A Triangulação de Delaunay (em duas dimensões) é facilmente obtida a partir dos polígonos de Voronoi e é assim definida: Dado um conjunto de pontos  $D$  num sub-domínio  $\Omega^n$  de um espaço  $n$ -dimensional  $R^n$ , identificam-se as arestas dos triângulos de Delaunay do seguinte modo: Dois pontos  $d_i$  e  $d_j$  são conectados por uma aresta se e somente se existe um ponto  $x \in \Omega^n$  que é equidistante de  $d_i$  e  $d_j$  e mais próximo de  $d_i$  que qualquer outro  $d_k \in \Omega^n$ .

$$d_i \text{ e } d_j \text{ são conectados} \Leftrightarrow \exists x \mid x \in \Omega^n \wedge ||x - d_i|| = ||x - d_j|| \wedge$$

$$||x - d_i|| < ||x - d_k|| \forall k \neq i, j.$$

Desta definição conclui-se que os triângulos de Delaunay são formados por 3 pontos  $d_i$ ,  $d_j$  e  $d_k$ , se e somente se, 3 arestas dos polígonos de Voronoi (que são bissetores perpendiculares das arestas dos triângulos de Delaunay) existem e são obtidas pelo seguinte critério:

$$\Delta d_i d_j d_k \text{ existe} \Leftrightarrow \exists x_c \mid x_c \in \Omega^n \wedge$$

$$||x_c - d_i|| = ||x_c - d_j|| = ||x_c - d_k|| \wedge$$

$$||x_c - d_i|| < ||x_c - d_m|| \forall m \neq i, j, k.$$

e este  $x_c$  é o centro círculo circunscrito ao triângulo  $d_i d_j d_k$  e  $||x_c - d_i||$  seu raio. Isso mostra que esse triângulo é um triângulo de Delaunay, se e somente se, não existir um ponto  $d_m$  de  $D$  no interior desse círculo.

Mais intuitivamente, registram-se as seguintes propriedades dos Polígonos de Voronoi e Triangulação de Delaunay:

- a) As regiões de Voronoi são aquelas áreas onde cada um de seus pontos é mais próximo a um ponto amostral do que a qualquer outro deste;
- b) As linhas retas que limitam os Polígonos de Voronoi são chamadas arestas de Voronoi e representam o conjunto de pontos a igual distância de 2 mais próximos pontos amostrais;
- c) Cada ponto amostral é associado a uma região de Voronoi;
- d) Dois pontos amostrais são vizinhos próximos e ligados por uma aresta de Delaunay quando seus polígonos de Voronoi são adjacentes, ou seja, quando eles compartilham uma aresta de Voronoi comum;
- e) As arestas de Voronoi são eixos de simetria de pares de pontos vizinhos.

A Figura 6 representa os Polígonos de Voronoi e Triangulação de Delaunay.

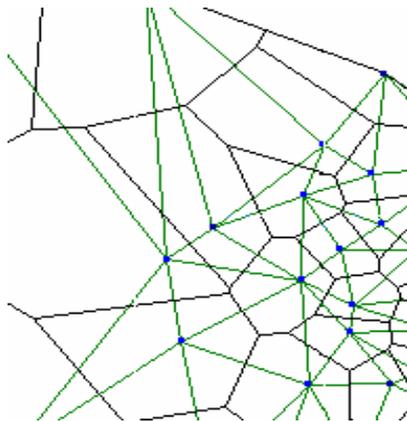


Figura 6 – Polígonos de Voronoi e Triangulação de Delaunay

### 3.4.2.3 – Obtenção de Grade Regular

#### Método Inverso da Distância Ponderada

O princípio desse método é assumir que o valor de um atributo  $z$  em um ponto desconhecido é obtido através de uma média móvel, ponderada pelas distâncias deste aos seus vizinhos.

A média móvel ponderada é definida pelo modelo  $\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i \cdot z(x_i))$  com  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ , onde os pesos  $\lambda_i$  são obtidos por uma função do tipo  $\Phi(d(x, x_i))$ . A forma mais comum dessa função é o inverso da distância ponderada, ou seja,  $\Phi(d(x, x_i))$

=  $d^{-r}$ . Desse modo o ponto desconhecido será estimado por  $\hat{z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{i,j}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{i,j}^{-r}}$ ,

onde  $x_j$  são os pontos desconhecidos e  $x_i$  são os pontos amostrais. Caso um ponto desconhecido seja o próprio ponto amostral, ocorrerá uma divisão por zero, indefinindo seu cálculo. Nesse caso, a operação não deve ser efetuada, atribuindo-se simplesmente o valor do ponto conhecido para o ponto tratado como desconhecido.

### Método Kernel

Originalmente esse interpolador trata de densidades. O princípio do método é associar cada ponto ou observação à uma função Kernel, que é expressa como uma função densidade de probabilidade bi-variada.

A função Kernel identifica uma janela, normalmente circular, com um raio variando de 0 (zero) até uma largura de banda previamente especificada. Todos os pontos amostrais que estiverem dentro dessa janela são considerados na estimativa. Deve-se observar que quanto maior a largura de banda, maior será a janela e maior o grau de suavização.

O modelo matemático do interpolador é dado por  $\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^d} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{1}{h}(x - x_i)\right)$

onde  $k(\ )$  é a função Kernel,  $h$  é a largura de banda,  $n$  o número de observações dentro da largura de banda e  $d$  a dimensão do dado.

Quando se trabalha em 2 dimensões ( $d=2$ ), a função Kernel normalmente empregada é  $k(x) = 3\pi^{-1}(1 - x^T x)^2$  se  $x^T x < 1$  e  $k(x) = 0$ , caso contrário. Nessa formulação  $\pi$  é uma constante,  $x$  a matriz com elementos de  $(x - x_i)$  e  $(y - y_i)$  ou seja, os desvios em  $X$  e  $Y$  entre o ponto  $x$  e as observações  $x_i$ , dentro de uma largura de banda e  $x^T$  a transposta de  $x$ .

Com base na função acima, o estimador Kernel toma a forma  $\hat{f}(x) = \frac{3}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{1}{h^2} \left((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2\right)\right)^2$ .

Caso o interesse seja estimar a quantidade do atributo  $z$ , por unidade de

área, pode-se empregar a fórmula  $f(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{3}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{1}{h^2} \left( (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right) \right)^2 z_i$ .

Caso o interesse seja estimar o valor médio do atributo, emprega-se a fórmula a seguir:

$$\hat{\mu}_i(s) = \frac{\frac{3}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{1}{h^2} \left( (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right) \right)^2 * z_i}{\frac{3}{nh^2\pi} \sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{1}{h^2} \left( (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right) \right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{1}{h^2} \left( (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right) \right)^2 * z_i}{\sum_{i=1}^n \left( 1 - \frac{1}{h^2} \left( (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 \right) \right)^2}$$

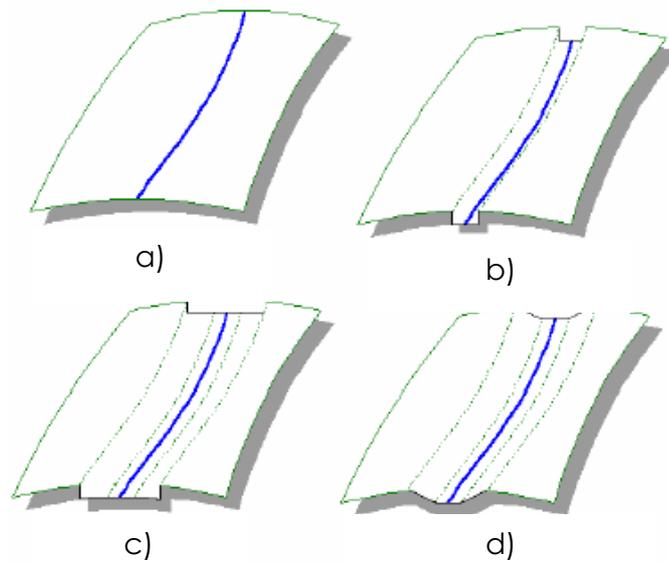
#### 3.4.2.4 – Aplicação do MDT em Estudos Hidrológicos

LIMA e LIMA (2000) compararam métodos de interpolação espacial e verificaram que de nada adianta aumentar a complexidade de processos matemáticos de interpolação se as características físicas do processo em estudo não forem incluídas e se não houver um perfeito entendimento da variabilidade espacial do processo.

Silva (2002) desenvolveu um modelo hidrológico que obteve o MDT através do software ArcView 3.2a ESRI®. Utilizando o comando *Fill Sinks*, presente no algoritmo *Spatial Analyst* do citado software, foram removidas depressões (células cercadas por outras com maiores elevações) que produzem a descontinuidade do escoamento superficial descendente para uma célula vizinha.

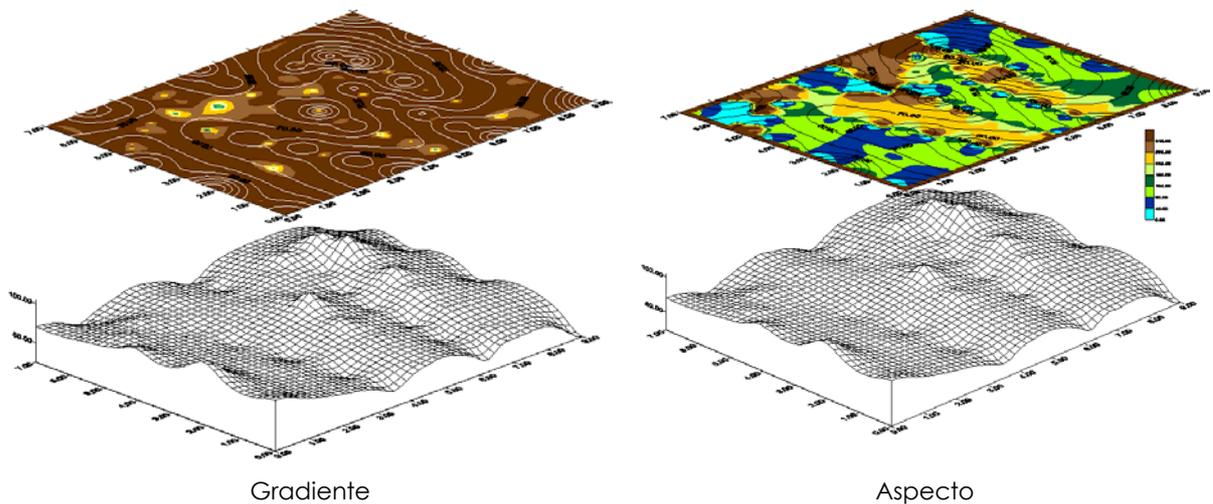
HELLWEGER (1997) desenvolveu um algoritmo, denominado *Agree*, de ajuste de consistência da superfície do MDT com relação à hidrografia da região. Segundo o autor a maioria das depressões encontradas nos MDT está localizada próxima à rede de drenagem, assim o algoritmo procura deixar o MDT mais consistente com a hidrografia. O algoritmo *Agree* desenvolve os seguintes passos para adequar a superfície do MDT à rede de drenagem, conforme Figura 7:

- a) Reconhecer a rede de drenagem para adequá-la a superfície do MDT;
- b) forçar a superfície do MDT baixar na região da rede de drenagem;
- c) fazer um "Buffer" da região baixada no passo anterior; e
- d) suavizar a região do "Buffer" forçando um caminho obrigatório para a rede de drenagem.

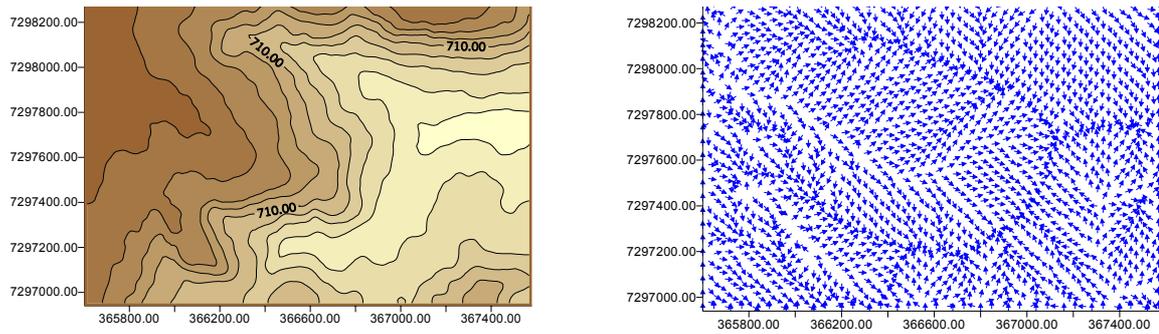


**Figura 7 – Desenvolvimento do Algoritmo Agree**

Segundo BURROUGH e MCDONNELL (1998), para analisar a rede de drenagem em um MDT é necessário determinar a direção do fluxo e remover as depressões do MDT. Para se determinar a direção do fluxo os algoritmos utilizam a declividade (gradiente) para quantificar a inclinação do terreno e o aspecto (derivada direcional) para definir a direção dessa declividade. As Figuras 8 e 9 ilustram o gradiente e o aspecto.



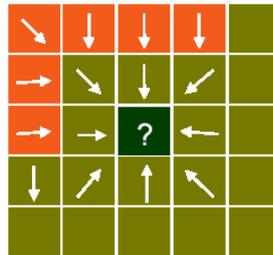
**Figura 8 – Ilustração do Gradiente e do Aspecto de um MDT**



**Figura 9 – Detalhamento do Aspecto de um MDT**

A direção de fluxo pode ser entendida como a direção preferencial da declividade da superfície terrestre, essa direção determina a cada célula de um MDT o fluxo para uma de suas oito possíveis vizinhas imediatas. Segundo MENDES e CIRILO (2001) a direção de fluxo é utilizada para o cálculo de área acumulada e é de grande valia quando utilizado com modelos hidrológicos distribuídos.

As depressões do MDT ocorrem quando uma célula tem valor menor que todas as suas vizinhas imediatas. Segundo MENDES e CIRILO (2001) uma depressão é a célula, ou grupo de células, que não encontram saída para o fluxo da água por gravidade, ou seja, estão cercadas por vizinhas imediatas mais elevadas em todo o seu contorno. A Figura 10 a seguir ilustra essa depressão.



**Figura 10 – Ilustração de uma depressão no MDT**

As depressões artificiais são comuns e normalmente ocorrem por uma insuficiência da resolução da grade de células para representar a superfície do terreno, e por deficiência da função interpoladora.

O modelo desenvolvido por SILVA (2002) foi realizado a partir da simulação do caminho preferencial de escoamento superficial sobre o MDT. Inicialmente obteve-se a acumulação advindo dos contribuintes, expressa em termos do número de células do modelo digital de elevação que contribuem com escoamento para cada célula do referido modelo digital, o que representa uma medida da área de drenagem de cada célula do MDT. Isto foi obtido pelo módulo *Flow accumulation* presente no algoritmo *Hydrologic Modeling*.

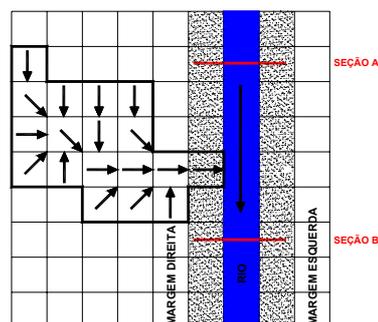
### 3.5 – Integração dos Sistemas de Geoinformação e Estudos Hidrológicos

A tecnologia SIG tem capacidade de capturar, armazenar, manipular, analisar e visualizar diversas formas de dados georreferenciados. Por outro lado, a Hidrologia tem uma forte ligação com os dados espaciais e os modelos hidrológicos necessitam de uma grande quantidade de dados. Assim a integração entre SIG e Hidrologia se dá de forma natural. De acordo com SINGH e FIORENTINO (1996) essa integração tem três componentes principais: manipulação dos dados espaciais, integração de modelos espaciais e interface SIG e modelos hidrológicos.

MENDES e CIRILO (2001) defendem que o sistema a ser simulado, utilizando-se de forma integrada a tecnologia SIG e modelos hidrológicos, seja composto por:

- a) **Modelo de Balanço Hídrico Local:** onde as propriedades envolvidas possam interagir no sentido de representar os diversos elementos do ciclo hidrológico em uma posição específica; e
- b) **Modelo de Transporte Hídrico:** onde os elementos do ciclo hidrológico se movimentam ao longo da bacia hidrográfica, baseados no MDT.

O modelo de transporte hídrico representa a movimentação da água nas vertentes da bacia hidrográfica e na rede de drenagem, através de dois algoritmos separados, quais sejam: Algoritmo 1 do fluxo bidimensional no terreno e Algoritmo 2 do fluxo unidimensional dentro do rio, conforme ilustrado na Figura 11.



**Figura 11 – Modelo de Transporte Hídrico (adaptado MENDES e CIRILO, 2001)**

No Algoritmo 1 inicialmente calcula-se o balanço vertical de água (basicamente chuva – evaporação) em cada posição da bacia hidrográfica, depois determina-se a transferência de água de um ponto qualquer até o canal principal mais próximo. Na Figura 11 o canal principal é o rio. O comportamento do

fluxo da água dependerá essencialmente da cobertura da bacia, de sua declividade e sua rede de drenagem.

O fluxo unidimensional dentro do rio (Algoritmo 2) ocorre devido a força gravitacional que provoca o escoamento de montante para jusante (da seção A para a seção B). A modelagem do escoamento é realizada através do cálculo da vazão na seção B. Esse cálculo é feito a partir da seção A combinado com os efeitos ao longo do trecho compreendido entre a seção A e a seção B.

COLLISCHONN (2001) utilizou tecnologia SIG para implementar um modelo de simulação hidrológica através dos seguintes passos:

- a) Digitalização e interpolação da topografia;
- b) classificação do uso do solo e cobertura vegetal;
- c) agregação de informações;
- d) remoção das depressões do MDT e determinação da direção de fluxo (rotina implementada);
- e) determinação da topologia (interligação entre as células), hierarquia, área de drenagem, e rede de drenagem (rotina implementada);
- f) combinação de informações espaciais e geração do arquivo de entrada principal (rotina implementada);
- g) execução do modelo hidrológico (rotina implementada);

Para interpolar os dados hidrometeorológicos do modelo, o autor desenvolveu um programa denominado INTERPLU, o qual dispõe de duas opções de métodos de interpolação: interpolação por polígonos de *Thiessen* ou vizinho natural e pelo método inverso da distância ponderada. O autor concluiu que o método inverso da distância ponderada é o mais adequado para interpolação, uma vez que o método de *Thiessen* atribui sempre, a uma grande área, a informação de um único posto de medição. Com isso esse método tende a aumentar a influência na bacia de chuvas intensas, porém localizadas, e tende a aumentar a influência de eventuais erros nos dados.

As pesquisas mais recentes desenvolvidas para integração entre a tecnologia SIG e os modelos hidrológicos estão sendo realizadas em dois ramos distintos, quais

sejam: as pesquisas voltadas para o desenvolvimento de Modelos de Dados Hidrológicos e as pesquisas de Modelos de Simulação Hidrológica. Enquanto os modelos de simulação hidrológicas representam os processos, os modelos de dados hidrológicos representam as propriedades e relacionamentos entre as classes geoespaciais e temporais dos dados hidrológicos. Os modelos de dados hidrológicos descrevem o meio ambiente da água, e os modelos de simulação hidrológica descrevem como a água se movimenta através desse meio ambiente (WHITEAKER, 2004).

MAIDMENT (2002) desenvolveu um modelo de dados de recursos hídricos, denominado *ArcHydro*, que utiliza a tecnologia SIG para modelar e gerenciar os principais dados hidrológicos, hidráulicos e de qualidade de água do meio ambiente. O *ArcHydro* foi desenvolvido com os seguintes módulos:

- a) **Hidrografia:** onde são representadas as características dos corpos hídricos, as quais são representadas pelas seguintes estruturas: *HydroPoint* (ponto genérico), *Bridge* (pontes), *Dam* (Barragem), *Structure* (outras estruturas hidras, tais como cachoeira), *WaterDischarge* (ponto de lançamento de efluente), *WaterWithdrawal* (ponto de captação de água), *MonitoringPoint* (estação de medição), *HydroLine* (corpo hídrico);
- b) **Rede:** utilizada para representar o fluxo da água através da rede de drenagem. As estruturas desse módulo são as seguintes: *HydroEdge* (características lineares do sistema), *HydroJunction* (ponto estratégico da rede de drenagem), *HydroNetwork\_Junctions* (junção genérica), *HydroLineEvent* (atributos lineares da rede de drenagem), *HydroPointEvent* (atributos pontuais da rede de drenagem);
- c) **Drenagem:** representa principalmente os produtos derivados do MDT, os mesmos são representados pelas seguintes estruturas: *Basin* (bacia hidrográfica oficial de uma região), *Watershed* (bacia hidrográfica definida pelo usuário), *Catchment* (sub-bacias hidrográficas), *DrainagePoint* (ponto para onde escoar toda a água da bacia);
- d) **Canal:** onde é representada a calha do rio e as seções transversais.

As Figuras 12 a 15 ilustram os módulos do *ArcHydro*.

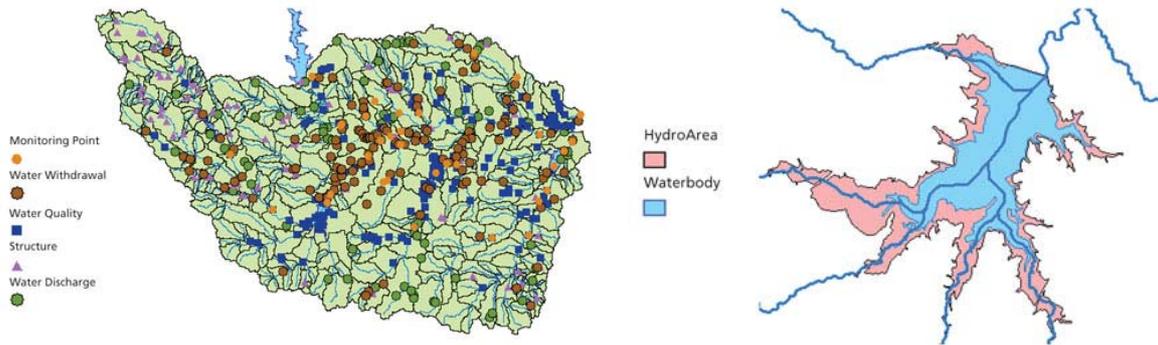
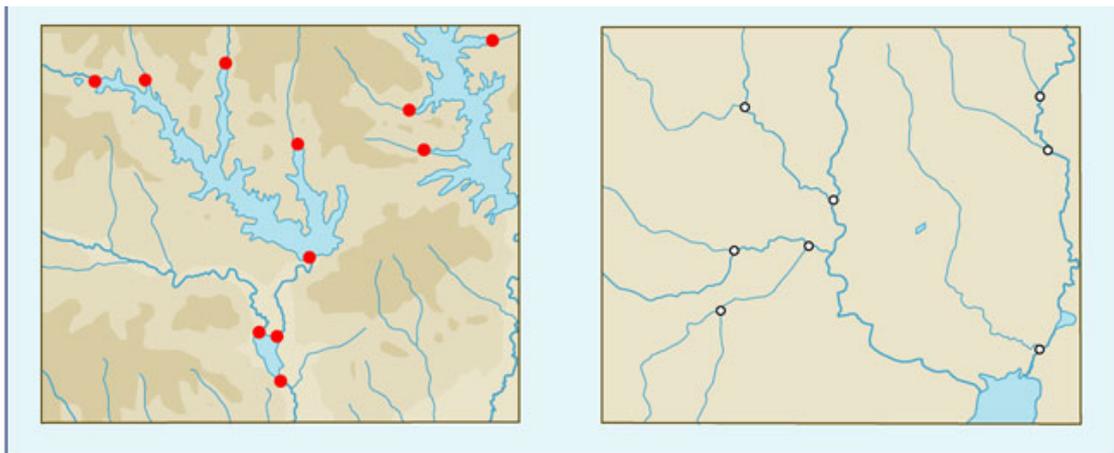


Figura 12 – Representação do Módulo Hidrografia do ArchHydro



— Hidrografia      ● Pontos de Medição      ○ Junções

Figura 13 – Representação do Módulo Rede do ArchHydro

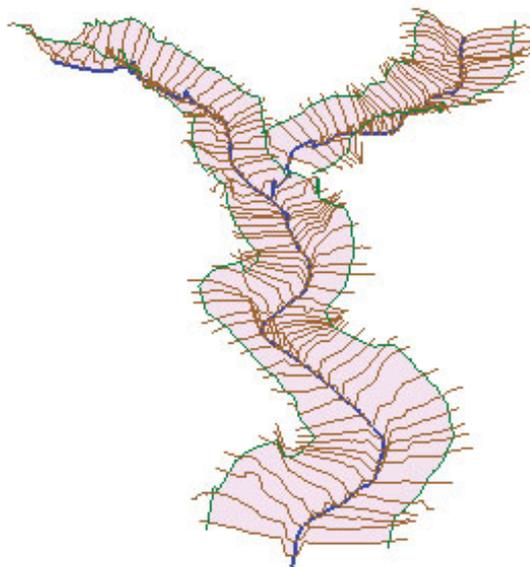
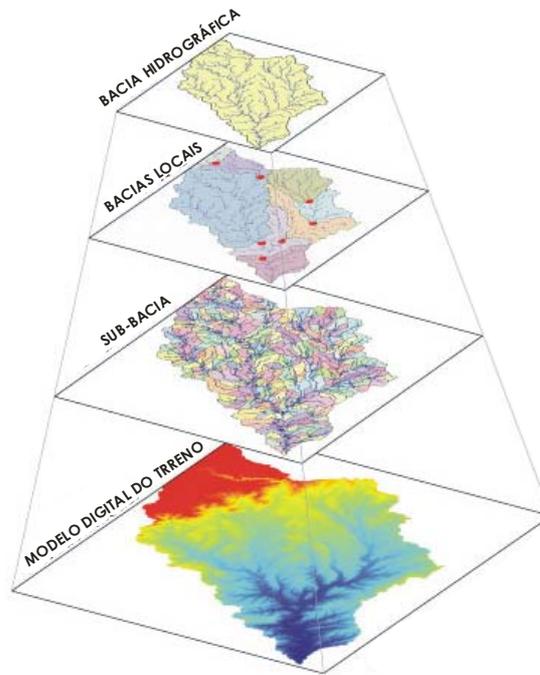
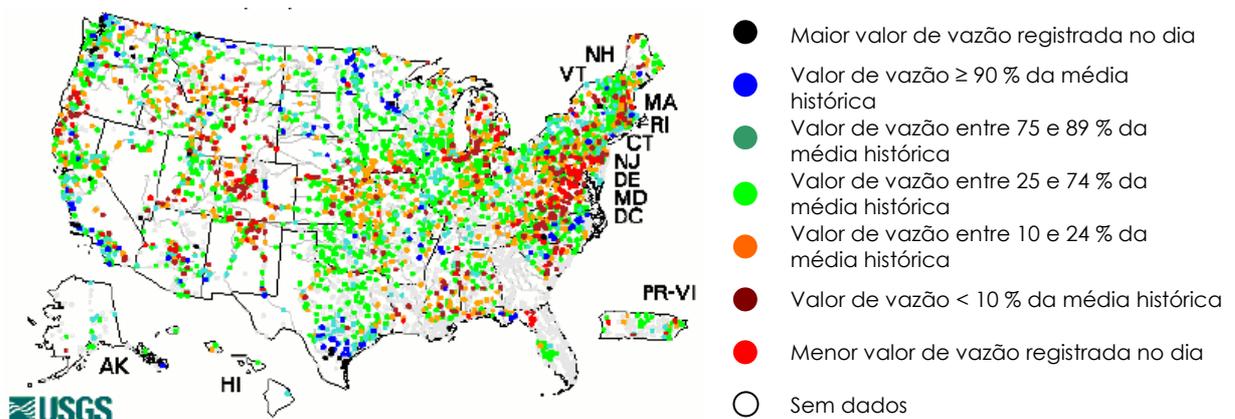


Figura 14 – Representação do Módulo Canal do ArchHydro



**Figura 15 – Representação do Módulo Drenagem do ArchHydro**

Outro modelo de dados hidrológicos é o Sistema Nacional de Informações Hidrológicas dos Estados Unidos (*USGS National Water Information System - NWIS*). O NWIS armazena e gerencia dados quantitativos e qualitativos das águas superficiais e subterrâneas. A Figura 16 representa o NWIS.



**Figura 16 – Representação do Modelo NWIS**

O modelo hidrológico HMS é um modelo concentrado desenvolvido pelo Centro de Engenharia hídrica dos Estados Unidos (*Hydrologic Engineering Center - HEC of United States Army Corps of Engineers - USACE*). O HMS oferece muitas opções de simular os processos físicos de uma bacia hidrográfica. O módulo de simulação de vazão do HMS baseia-se na concepção de unidades hidrográficas – UH (HEC, 2000).

Outro modelo encontrado na literatura é o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) desenvolvido pelo centro de pesquisas agrícolas dos Estados Unidos (*Agriculture Research Service - USDA-ARS*). O SWAT é um modelo de base física, que possibilita a simulação de todo o ciclo hidrológico em duas fases, quais sejam: fase onde são quantificados os dados de água, de nutrientes, sedimentos etc; e outra fase onde são simulados os movimentos dos dados ao longo da rede de drenagem (NEITSCH et. Al, 2000).

## 4 – METODOLOGIA PROPOSTA

A presente pesquisa consiste em estabelecer uma metodologia para implementação de um SIG que simule a transformação de chuva em vazão, baseada nos modelos hidrológicos distribuídos (que são modelos de simulação hidrológica) e no cruzamento de planos de informação no formato *raster*. O resultado que se pretende atingir, com a aplicação da metodologia, é obter um plano de informação que contenha o valor da vazão em cada célula desse plano, e assim obter uma distribuição espacial da vazão.

Na pesquisa trabalhou-se com um modelo hidrológico distribuído simplificado, onde os coeficientes são calibrados de acordo com a realidade da região estudada, diferentemente da grande maioria dos modelos que utilizam coeficientes de literaturas oriundos de experiências em outras regiões, em laboratórios ou por formulações matemáticas e estatísticas.

Resumidamente a metodologia proposta segue os itens apresentados a seguir:

- a) Organização dos Planos de Informação (PI)
- b) Tratamento dos Planos de Informação e Calibração do Modelo
- c) Validação e Avaliação do Modelo
- d) Implementação do SIG

A seguir descreve-se a estruturação do SIG proposto. Em seguida são detalhados os itens da metodologia da pesquisa.

### 4.1 – Estruturação do SIG Proposto

O SIG proposto baseia-se no modelo hidrológico distribuído de transformação de chuva em vazão. Seu princípio é o ciclo hidrológico que ocorre na natureza, ou seja, a chuva que precipita em uma bacia hidrográfica, escoar pelos caminhos determinados pela topografia do terreno até chegar ao ponto final da bacia. Nesse caminho a água sofre perdas influenciadas principalmente pela evaporação e infiltração no solo. Devido às perdas ao longo do escoamento a quantidade de água que chegará ao final da bacia sempre será menor que a quantidade de

água precipitada. O SIG irá determinar o valor da vazão em cada ponto da bacia hidrográfica, sabendo-se inicialmente o valor da chuva precipitada na bacia e as características do solo da região. Estende-se cada ponto da bacia, com sendo cada célula do *grid*, já que utiliza-se de dados no formato *raster*.

Outra forma de perda de água que se considera no ciclo hidrológico é a do armazenamento da chuva precipitada em açudes, lagos e lagoas. Adotou-se como hipótese que toda a parcela da chuva armazenada na bacia é totalmente consumida pela população da bacia, assim sendo, os reservatórios artificiais ou naturais não tem influência no modelo proposto.

O modelo hidrológico implementado no SIG é do tipo simplificado onde todas as perdas sofridas pela a água no ciclo hidrológico são expressas por um único coeficiente, denominado coeficiente de escoamento superficial ( $C_{ES}$ ), para cada tipo de solo da bacia. Assim sendo a formulação básica do modelo é a seguinte, a qual está baseada na equação do método racional.

$$Q_F = C_{ES} \times P \quad \text{(Equação 7)}$$

onde,  $Q_F$  – Vazão média no ponto mais a jusante da bacia ( $m^3/s$ );  $C_{ES}$  – Coeficiente de escoamento superficial (adimensional) e  $P$  – Chuva total precipitada ( $m^3/s$ ).

A chuva total precipitada é calculada pela seguinte equação:

$$P = \frac{Ch \times A_{grid}}{C_1} \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde,  $P$  é a chuva total precipitada ( $m^3/s$ );  $Ch$  é a chuva ( $m$ /período de tempo adotado – mês, dia, hora, etc);  $A_{grid}$  é a área da célula do *grid* ( $m^2$ ) e  $C_1$  é o coeficiente de transformação dos dados (adimensional).

Os coeficientes  $C_{ES}$  e a chuva total precipitada ( $P$ ) são referentes a cada célula do *grid*. Assim sendo, calcula-se a chuva total em cada célula do *grid* e depois é feito o somatório das células agrupadas pelo tipo de solo da região.

Determinou-se o  $C_{ES}$  pela capacidade de escoamento superficial de cada tipo solo. Essa capacidade de escoamento baseou-se na infiltração do solo, ou seja, quanto maior a infiltração no solo, menor a capacidade de escoamento

superficial e conseqüentemente menor será o seu  $C_{ES}$ . Nesse contexto solos muito arenosos terão menores coeficientes enquanto solos muito argilosos terão maiores coeficientes.

As calibrações dos  $C_{ES}$  são feitas através das séries históricas de dados existentes na área da bacia hidrográfica. Assim sendo necessita-se obter dados de chuva e vazão para um mesmo período de tempo e a partir desses dados montar equações de calibração dos coeficientes através da formulação a seguir:

$$Q_F = C_{ES1} \times P_1 + C_{ES2} \times P_2 + \dots + C_{ESn} \times P_n \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde,  $Q_F$  – Vazão média no ponto mais a jusante da bacia do período de tempo adotado ( $m^3/s$ );  $C_{ES1}$  a  $C_{ESn}$  – Coeficiente de cada tipo de solo da bacia (adimensional) e  $P_1$  a  $P_n$  – Chuva total precipitada em cada tipo de solo do período de tempo adotado ( $m^3/s$ ).

Optou-se em montar as equações para a calibração com o período de tempo mês, ou seja, utilizaram-se dados mensais das séries históricas das estações de medições. É claro que essa série histórica tem que coincidir os dados de chuva e vazão. Foram utilizados os dados mensais para minimizar o efeito temporal do ciclo hidrológico, ou seja, a chuva precipitada em uma bacia hidrográfica demora tempos diferentes para chegar ao final dessa bacia. Esse tempo dependerá da proximidade da ocorrência da chuva em relação ao final da bacia. Para calibração trabalhou-se com o somatório mensal da chuva precipitada na bacia e o valor médio mensal da vazão medida na estação de medição localizada no ponto mais a jusante da bacia hidrográfica.

Por exemplo, a montagem das equações de uma bacia que tenha dados históricos de um período compreendido pelos anos de 1970 a 2000 seria a seguinte:

$$Q_{F(\text{jan}/70)} = C_{ES1} \times P_{\text{SOLO}_1(\text{jan}/70)} + C_{ES2} \times P_{\text{SOLO}_2(\text{jan}/70)} + \dots + C_{ESn} \times P_{\text{SOLO}_n(\text{jan}/70)} \quad (\text{Janeiro 1970})$$

$$Q_{F(\text{fev}/70)} = C_{ES1} \times P_{\text{SOLO}_1(\text{fev}/70)} + C_{ES2} \times P_{\text{SOLO}_2(\text{fev}/70)} + \dots + C_{ESn} \times P_{\text{SOLO}_n(\text{fev}/70)} \quad (\text{Fevereiro 1970})$$

⋮

$$Q_{F(\text{nov}/00)} = C_{ES1} \times P_{\text{SOLO}_1(\text{nov}/00)} + C_{ES2} \times P_{\text{SOLO}_2(\text{nov}/00)} + \dots + C_{ESn} \times P_{\text{SOLO}_n(\text{nov}/00)} \quad (\text{Novembro 2000})$$

$$Q_{F(\text{dez}/00)} = C_{ES1} \times P_{\text{SOLO}_1(\text{dez}/00)} + C_{ES2} \times P_{\text{SOLO}_2(\text{dez}/00)} + \dots + C_{ESn} \times P_{\text{SOLO}_n(\text{dez}/00)} \quad (\text{Dezembro 2000})$$

Para a calibração dos coeficientes utilizou-se o algoritmo de análise hipotética denominado *Solver*, desenvolvido por Leon Lasdon, da Universidade do Texas em Austin e Allan Waren, da Universidade Estadual de Cleveland. Esse algoritmo possibilita localizar um valor ideal para uma fórmula em uma célula, chamada de célula de destino. Ele ajusta os valores nas células variáveis especificadas, chamadas de células ajustáveis, para produzir o resultado especificado na fórmula da célula de destino. O algoritmo permite aplicar restrições para os valores das células variáveis. Na pesquisa as células variáveis são os coeficientes de cada tipo de solo e a célula de destino é a função objetivo do valor mínimo da somatória dos erros das equações de calibração, onde o erro é a diferença entre o valor da vazão calculada e o valor da vazão medida na estação de medição.

Para que o algoritmo apresente resultados com lógica relacionada aos parâmetros físicos do solo, necessita-se fazer as seguintes restrições:

- a) Quanto maior a capacidade de escoamento do solo, maior deverá ser o seu coeficiente;
- b) os coeficientes deverão apresentar valores entre 0 e 1, pois reorganizando a formulação básica do modelo, tem-se que  $C_{ES} = \frac{Q_F}{P}$ , onde sabe-se que o valor da vazão no final da bacia ( $Q_F$ ) sempre será menor que o valor da chuva precipitada ( $P$ ), devido às perdas.

Os dados das séries históricas dos anos disponíveis para a bacia são divididos em anos para calibração e anos para validação. É importante que essa divisão leve em consideração a quantidade de anos chuvosos e não chuvosos, de tal forma que se tenha um balaço entre anos chuvosos e não chuvosos na calibração e na validação.

A avaliação dos resultados da calibração e da validação é feita através do coeficiente de determinação  $R^2$ , o qual irá relacionar a vazão calculada e a vazão observada.

Em suma, a estruturação do modelo proposto contém as seguintes premissas:

- a) Todas as perdas de água serão simplificadas em um único coeficiente, o

- coeficiente de escoamento superficial;
- b) a água armazenada nos reservatórios artificiais e naturais é considerada como totalmente consumida pela população da bacia hidrográfica;
- c) o modelo é calibrado pelo ajuste do coeficiente de cada tipo de solo da bacia;
- d) a calibração do coeficiente é feita através da comparação dos dados calculados com os dados observados na série histórica;
- e) a série histórica de dados é dividida em dados para calibração e dados para validação de acordo com as anomalias da chuva precipitada; e
- f) a avaliação do modelo é realizada através do coeficiente de determinação  $R^2$ .

## **4.2 - Organização dos Planos de Informação**

Os dados base necessários para implementação da metodologia proposta são os seguintes planos de informação:

- a) Plano de Informação de Chuva
- b) Plano de Informação de Solo
- c) Plano de Informação de Altimetria

### **4.2.1 – Determinação do PI de Chuva**

Os dados de chuva devem ser coletados da maior quantidade de estações de medição possível localizadas dentro e nos arredores da bacia, pois esses dados serão interpolados para toda a bacia. A série de dados de chuva tem que coincidir obrigatoriamente com a série de dados de vazão da estação de medição mais próxima da área da bacia que se pretende estudar.

Devem-se cruzar os dados das estações de chuva com os dados das estações de vazão. Com os dados das estações de chuva e vazão implementados em uma mesma base cartográfica é possível determinar quais estações serão consideradas no estudo. Essa escolha certamente será determinada pela quantidade de dados existente na série histórica. Uma sugestão para a coleta dos dados das séries históricas de chuva e vazão é o endereço eletrônico da Agência

Nacional de Águas – ANA (<http://www.ana.gov.br>), através do aplicativo HidroWEB, para consulta e aquisição dos dados, e o aplicativo Hidro, para manipulação e visualização dos dados.

Os dados da série histórica de chuva são associados ao ponto que contenha as coordenadas da estação de medição. Dessa forma eles poderão ser interpolados para toda a bacia para se obter o plano de informação de chuva. Essa interpolação tem que ser feita quantas vezes forem a quantidade de meses da série histórica de dados utilizadas.

#### **4.2.2 – Determinação do PI de Solo**

Para determinação do PI de solo é necessário inserir os dados de tipos de solo existentes na região na mesma base cartográfica do PI de chuva e do PI de vazão. Esses dados devem ser do tipo polígonos, comumente são adquiridos através de digitalização de mapas analógicos.

Todos os polígonos de um determinado tipo de solo devem ser associados de forma que no final o PI de solo tenha tanto polígonos quanto os tipos de solo da região.

#### **4.2.3 – Determinação do PI da Altimetria**

Os dados de altimetria são utilizados para delimitação da bacia hidrográfica, para definição da direção do fluxo e para determinação do fluxo acumulado. Geralmente os algoritmos de delimitação de bacia percorrem os seguintes passos para a determinação da bacia hidrográfica:

- a) Remoção das depressões do PI altimetria;
- b) Determinação da Direção do Fluxo;
- c) Determinação do Fluxo Acumulado; e
- d) Delimitação da Bacia Hidrográfica.

O PI altimetria gerado tem que ser validado, e para isso utiliza-se o método de validação cruzada, para o qual necessário que os dados de altimetria estejam no formato de ponto, com coordenadas tridimensionais.

Pela falta de legislação específica que normatize a classificação de

superfícies altimétricas, utiliza-se as diretrizes do Decreto nº 89.817<sup>1</sup> para validação da superfície. O Artigo 8º desse Decreto estabelece o seguinte: “Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas-de-nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) – Altimétrico – Estabelecido”.

As cartas são classificadas no Artigo 9º desse mesmo decreto da seguinte forma:

- a) **Classe A:** PEC altimétrico é de metade da eqüidistância entre as curvas-de-nível;
- b) **Classe B:** PEC altimétrico é de três quintos da eqüidistância entre as curvas-de-nível;
- c) **Classe C:** PEC altimétrico é de três quartos da eqüidistância entre as curvas-de-nível;

Assim sendo para validação do PI de altimetria aplica-se o método de validação cruzada com os pontos de altimetria e avalia-se o percentual de pontos que apresenta erro superior ao PEC, que está relacionado à eqüidistância entre as curvas de nível que geraram os pontos de altimetria.

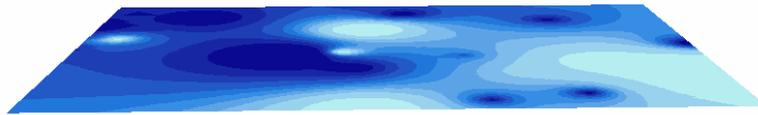
#### 4.3 – Tratamento dos Planos de Informação e Calibração do Modelo

De posse do PI de chuva, do PI de solo e do PI da bacia hidrográfica pôde-se iniciar o processo de montagem das equações de calibração.

Inicialmente é necessário cruzar o PI de chuva e o PI de solo com o PI da bacia hidrográfica, para assim se ter as informações somente dentro da bacia hidrográfica estudada, conforme pode-se observar nas Figuras 17 e 18 a seguir.

---

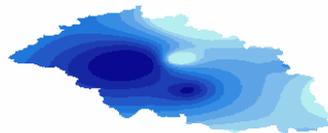
<sup>1</sup> Decreto-Lei que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, publicado no Diário Oficial da República Federativa do Brasil em 22 de junho de 1984.



PI de Chuva oriundo da interpolação dos pontos de estação de medição

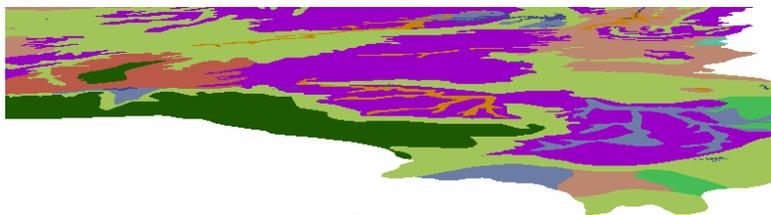


PI da Bacia Hidrográfica oriundo do PI Altimetria



PI de Chuva recortado

**Figura 17 – Tratamento do PI de Chuva**



PI de Solo



PI da Bacia Hidrográfica oriundo do PI Altimetria



PI de Solo recortado

**Figura 18 – Tratamento do PI de Solos**

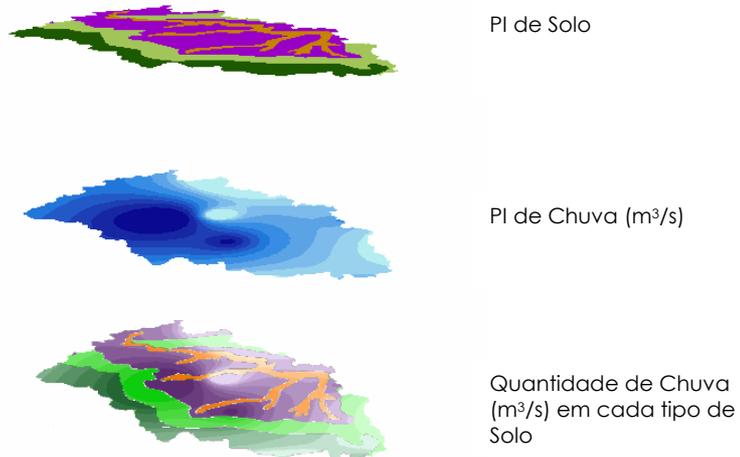
O PI de chuva tem que ser transformado para a mesma unidade dos dados de vazão da estação de medição. Os dados de chuva em sua grande maioria são disponibilizados na unidade de milímetros por dia (mm/dia) e os dados de vazão em metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s). Então a transformação é realizada através da seguinte expressão, onde se encontra o PI de chuva em (m<sup>3</sup>/s).

$$P = \frac{Ch \times Agrid}{2.592.000}$$

**(Equação 10)**

onde; P é a chuva total precipitada na bacia hidrográfica (m<sup>3</sup>/s); Ch é a chuva (m/mês); Agrid é a área da célula do *grid* (m<sup>2</sup>) e 2.592.000 é o coeficiente de transformação dos dados de chuva de mês para segundo. Essa expressão deve ser implementada utilizando-se álgebra de mapas, assim todas as células serão transformada corretamente.

O PI de cada tipo de solo deve ser cruzado com o PI de chuva em  $m^3/s$  para assim encontrar a quantidade de chuva em cada tipo de solo da bacia. A Figura 19 ilustra o cruzamento do PI de chuva com o PI tipo de solo.



**Figura 19 – Cruzamento PI de Chuva e PI de Solos**

É importante lembrar que a manipulação dos PI deve ser feita para todos os meses da série histórica de dados e para todos os tipos de solos da bacia. Obtendo-se o cruzamento do PI de chuva e PI de Solo é possível calcular o total de chuva precipitada em cada tipo de solo e montar as equações calibração.

Montando-se as equações é formado um sistema de equações cujas variáveis são os coeficientes dos solos. Diminuindo-se a chuva calculada pela chuva medida na estação de medição tem-se o erro da calibração. A calibração do modelo, utilizando-se o algoritmo *solver*, é feita para se encontrar os coeficientes do solo de forma que a somatória dos erros seja mínima. A Figura 20 ilustra a estrutura das equações de calibração.

A avaliação dos resultados da calibração é feita pelo coeficiente de determinação que relacionará a vazão observada e a calculada.

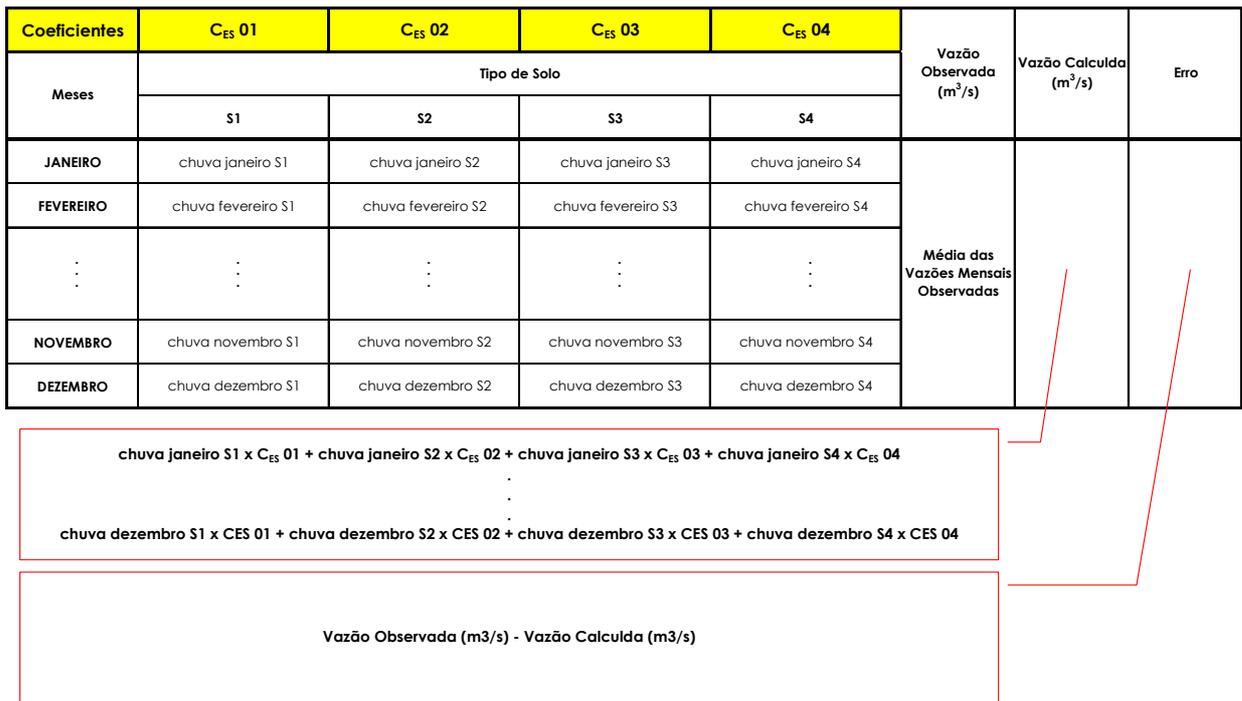


Figura 20 – Estrutura das equações de calibração

#### 4.4 – Validação e Avaliação do Modelo

Para validação do modelo é utilizado o mesmo procedimento da calibração, agora utilizando-se os coeficientes encontrados na calibração para se calcular a chuva da bacia hidrográfica (Figura 21).

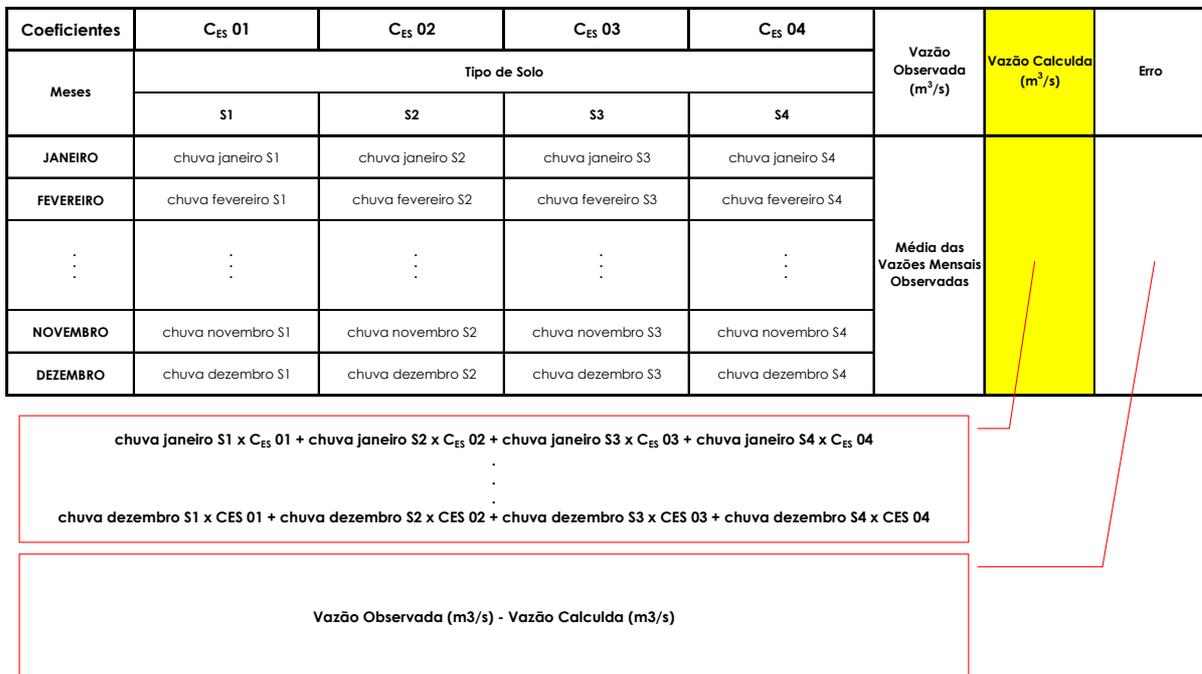


Figura 21 – Estrutura das equações de validação

## 4.5 – Implementação do SIG

Após a fase de calibração e validação os coeficientes são transformados em planos de informação, para que seja determinado o plano de informação de vazão distribuída para toda a bacia. Para tanto é necessário trabalhar com os seguintes planos de informação:

- a) PI dos Coeficientes de escoamento Superficial
- b) PI da Chuva da Bacia
- c) PI da Direção do Fluxo

Multiplicando-se o PI da Chuva da Bacia pelo PI dos Coeficientes, através de álgebra de mapas, encontra-se o PI de vazão pontual da bacia, ou seja, cada célula do PI terá o valor correspondente a vazão mensal daquele local. Sabe-se, porém, que a vazão é acumulativa desde o ponto mais a montante da bacia até o final da mesma. Assim é necessário calcular a vazão acumulada de todas as células do PI de vazão pontual de acordo com o fluxo do escoamento.

Para calcular a vazão acumulada utiliza-se o algoritmo *Hydrology Analysis*, cujo PI de entrada será o PI de vazão pontual da bacia e o PI de direções será o PI de direções do fluxo do escoamento, o mesmo utilizado para se determinar o PI da delimitação da bacia hidrográfica. Dessa forma implementa-se o SIG onde é possível verificar o valor da vazão em qualquer ponto da bacia hidrográfica.

## 5 – APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

### 5.1 – Considerações Iniciais

A área escolhida para aplicar a metodologia proposta localiza-se na região sul do Estado do Ceará, na bacia hidrográfica do rio Salgado, que é uma bacia contribuinte da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe. A Figura 22 apresenta a bacia do rio Salgado destacada em vermelho no contexto do Estado do Ceará.

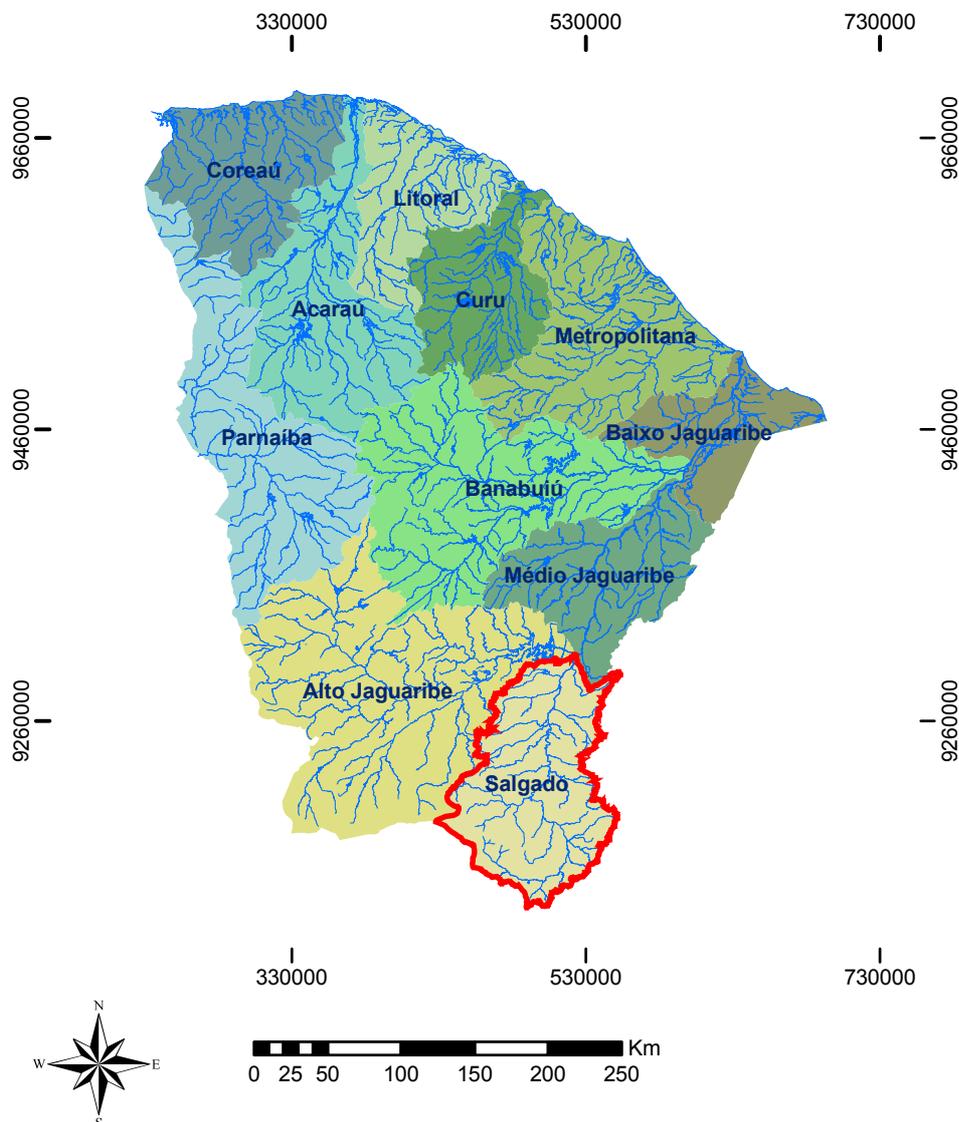


Figura 22 – Localização da Área da Aplicação

O rio Salgado é o principal afluente da margem direita do rio Jaguaribe, é formado pela confluência dos riachos dos Porcos e Batateiras no sopé da encosta da Chapada do Araripe, numa altitude de 800 m.

Seu trajeto dá-se no sentido sul-norte até seu encontro com o rio Jaguaribe, próximo à cidade de Icó, a jusante do açude de Orós, drenando uma área de 12.216 km<sup>2</sup>, percorrendo uma extensão de 308 km.

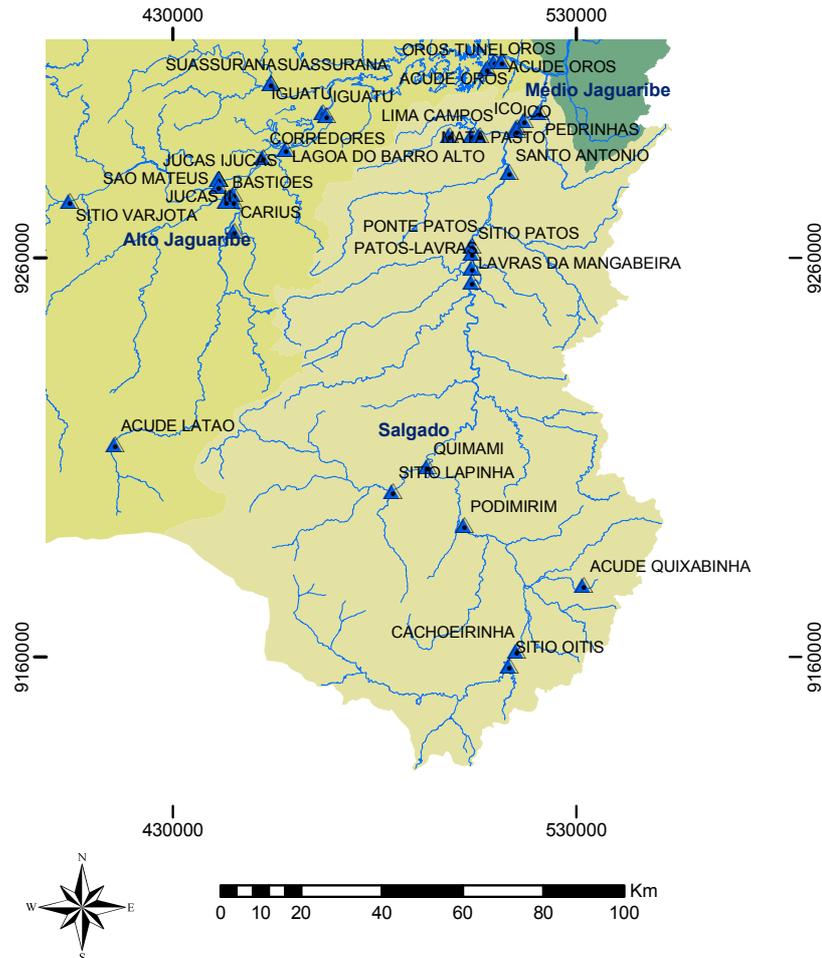
Nas vertentes da chapada, o rio possui declividades muito acentuadas, que vão se tornando mais suaves à medida que atravessa o Geossistema Planalto Sertanejo e se aproxima da Depressão Sertaneja. As declividades do talvegue variam de 0,1% a 8%, sendo a média 0,18%.

Na bacia do rio Salgado não se registra a existência de qualquer grande barramento, o que, aliado ao escoamento torrencial, pode ser considerado como elemento que favorece as enchentes do Baixo Vale.

A bacia do rio Salgado contém as estações de medição de vazão de responsabilidade da Agência Nacional de Água – ANA, apresentadas na Tabela 3 e na Figura 23.

**Tabela 3 – Estações de Medição de Vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Salgado**

Estação de Medição de Vazão	
Código	Nome
36282500	ACUDE LIMA CAMPOS (ESTREITO)
36240000	ACUDE QUIXABINHA
36232000	CACHOEIRINHA
36290001	ICO
36290000	ICO
36270000	LAVRAS DA MANGABEIRA
36285000	LIMA CAMPOS
36284000	LIMA CAMPOS-CANAL ADUTOR
36292000	MATA PASTO
36271000	PATOS-LAVRAS
36294000	PEDRINHAS
36250000	PODIMIRIM
36273000	PONTE PATOS
36255000	QUIMAMI
36280000	SANTO ANTONIO
36210000	SITIO LAPINHA
36230000	SITIO OITIS
36272000	SITIO PATOS



**Figura 23 – Espacialização das Estações da Bacia do Rio Salgado**

Escolheu-se a estação Sítio Lapinha por essa ser a estação que possui dados suficientes para aplicação da metodologia. Conforme metodologia proposta, os dados necessários para a aplicação da metodologia são os seguintes:

- a) Série histórica de vazão;
- b) Série histórica de chuva;
- c) Altimetria;
- d) Dados de Solo.

### 5.1.1 - Série Histórica de Vazão

A série história de vazão da estação Sítio Lapinha foi coletada do endereço eletrônico da ANA ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)), através do aplicativo *HidroWeb*. Os dados disponíveis são de vazões diárias e médias mensais, conforme pode ser observado na Figura 24.

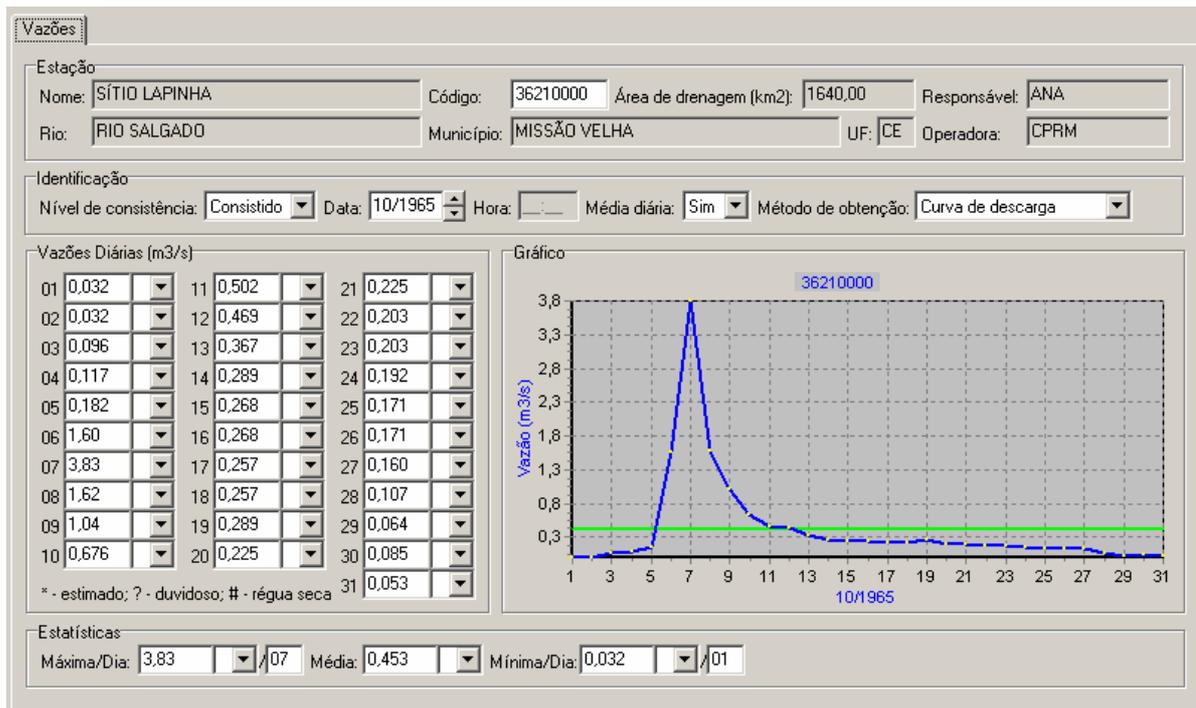


Figura 24 – Dados da Série Histórica de Vazão

No caso da estação Sítio Lapinha a série histórica de dados disponível são os períodos de 1965 a 1976 e 1985 a 2002.

### 5.1.2 - Série Histórica de Chuva

Os dados de chuva do estado do Ceará são monitorados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, os quais estão disponíveis no endereço eletrônico [www.funceme.br](http://www.funceme.br). Esses dados são disponibilizados através das séries históricas diárias de cada estação. As estações de chuva existentes na proximidade da estação Sítio Lapinha são as apresentadas na Tabela 4 e Figura 25.

Tabela 4 - Estações de Chuva Existentes na Proximidade da Estação Sítio Lapinha

		Estação		Município	Período de dados	
Ordem	Código	Nome			Início	Final
1	1	ABAIARA		ABAIARA	1981	2004
2	6	ALTANEIRA		ALTANEIRA	1979	2004
3	18	AURORA		AURORA	1974	2004
4	20	BARBALHA		BARBALHA	1974	2004
5	530	BREJINHO		BARRO	2000	2004
6	26	BREJOSANTO		BREJOSANTO	1974	2004
7	578	CALDAS		BARBALHA	2000	2004

**Tabela 4 - Estações de Chuva Existentes na Proximidade da Estação Sítio Lapinha (cont.)**

8	33	CARIRIACU	CARIRIACU	1974	2004
9	583	CARIUTABA	FARIASBRITO	2001	2004
10	43	CRATO	CRATO	1974	2004
11	574	DOMQUINTINO	CRATO	2000	2004
12	45	FARIASBRITO	FARIASBRITO	1979	2004
13	529	GAMELEIRODES.SEBASTIAO	MISSAOVELHA	2000	2004
14	51	GRANJEIRO	GRANJEIRO	1979	2004
15	298	INGAZEIRA	AURORA	1988	2004
16	339	JAMACARU	MISSAOVELHA	1988	2004
17	76	JARDIM	JARDIM	1978	2004
18	521	JARDIMMIRIM	JARDIM	2000	2004
19	78	JUAZEIRODONORTE	JUAZEIRODONORTE	1974	2004
20	605	LAMEIRO	CRATO	1994	2004
21	89	MILAGRES	MILAGRES	1974	2004
22	91	MISSAOVELHA	MISSAOVELHA	1974	2004
23	99	NOVAOLINDA	NOVAOLINDA	1974	2004
24	314	PONTADASERRA	CRATO	1988	2004
25	119	PORTEIRAS	PORTEIRAS	1978	2004
26	509	QUIMAMI	MISSAOVELHA	2000	2004
27	336	QUITAIUS	LAVRASDAMANGABEIRA	1988	2004
28	243	RIACHOVERDE	VARZEALEGRE	1999	2004
29	131	SANTANADOCARIRI	SANTANADOCARIRI	1979	2004
30	511	SAOFELIPE	BREJOSANTO	2000	2004
31	576	SITIONOVO-VILAPECICERO	JUAZEIRODONORTE	2000	2004
32	151	VARZEALEGRE	VARZEALEGRE	1974	2004
33	579	VILAFEITOSA	CARIRIACU	2001	2004
34	577	VILASAOGONCALO-MARROCOS	JUAZEIRODONORTE	2000	2004

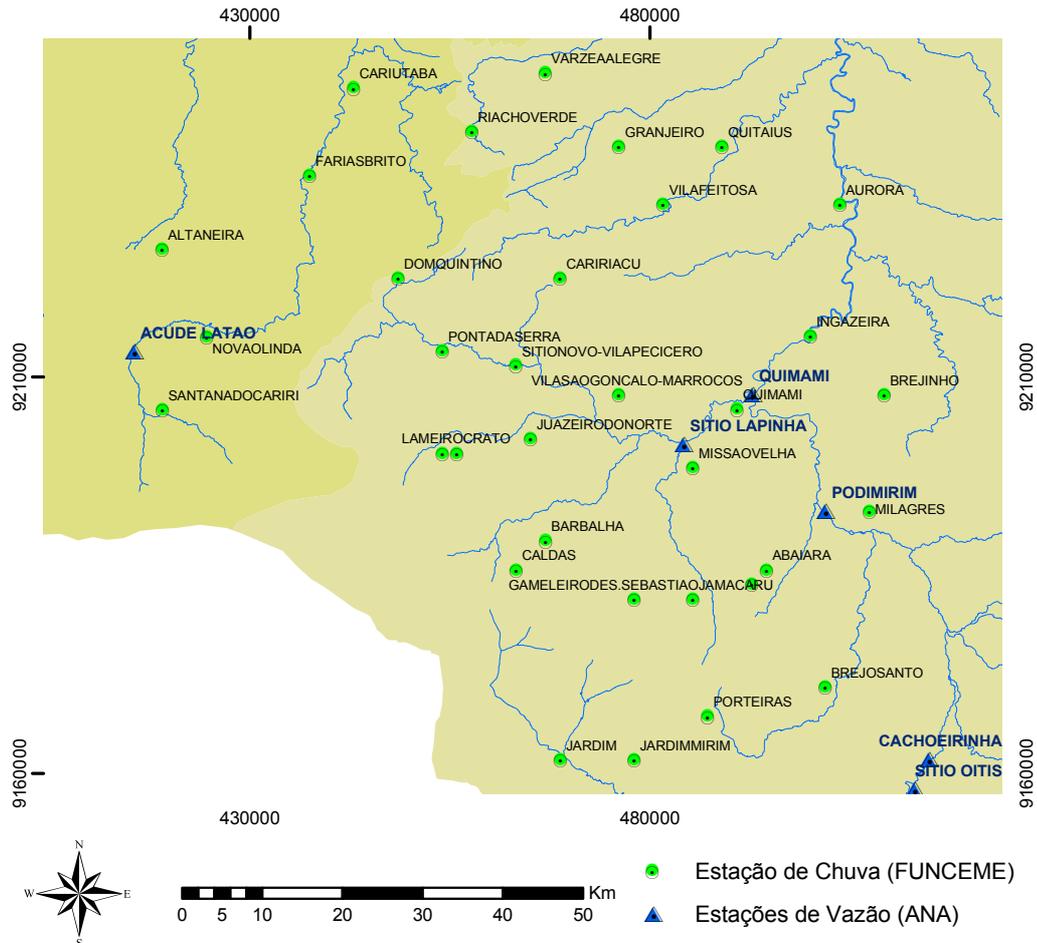


Figura 25 – Espacialização das Estações de Chuva

### 5.1.3 - Altimetria

Para obter os dados de altimetria da região foram utilizadas as cartas topográficas na escala de 1:100.000 editadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. A Tabela 5 e a Figura 26 ilustram as cartas que abrangem a região de interesse.

Tabela 5 – Cartas Topográficas da Região de Interesse

Código		Nome
IBGE	MI	
SB-24-Y-B-V	1125	ASSARÉ
SB-24-Y-B-VI	1126	CEDRO
SB-24-Y-D-II	1204	SANTANA DO CARIRI
SB-24-Y-D-III	1205	CRATO

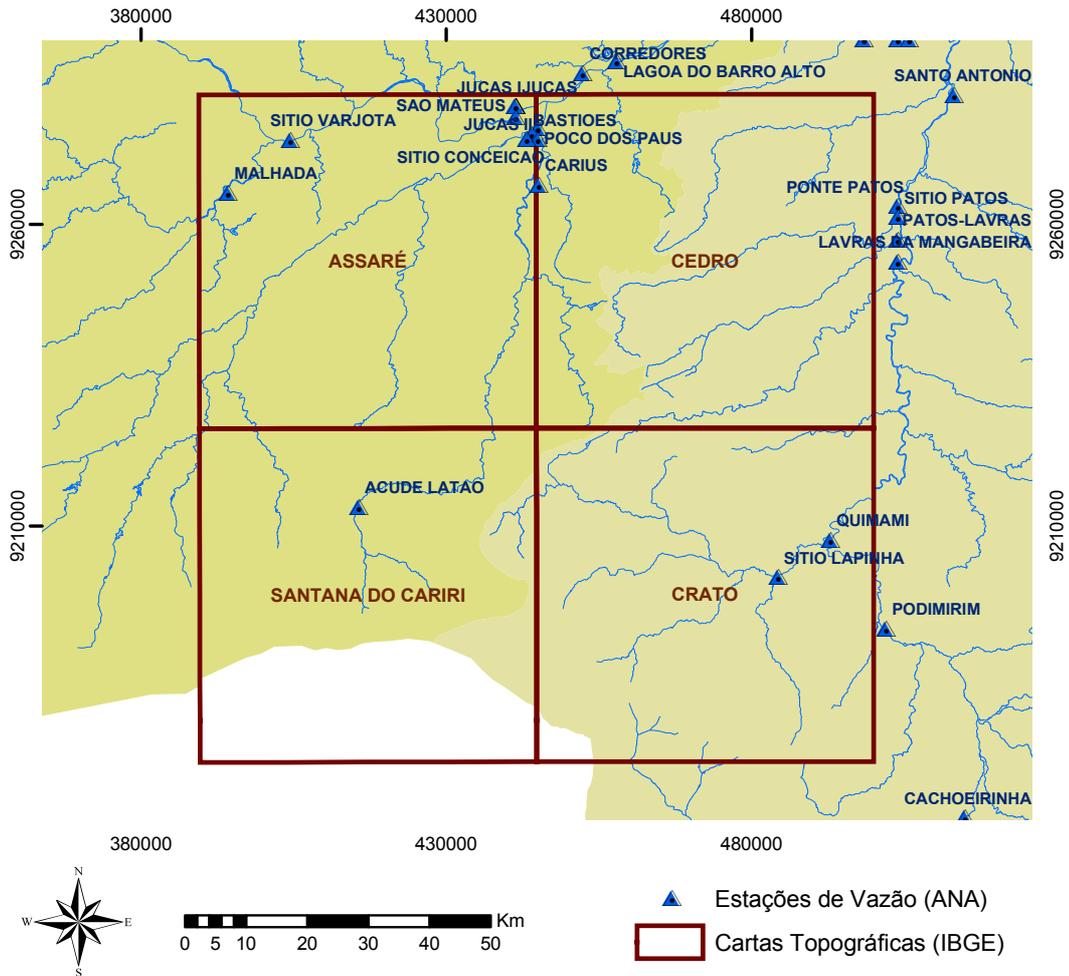


Figura 26 – Espacialização das Cartas Topográficas

### 5.1.4 – Dados de Solo

Os dados de solo foram disponibilizados pela FUNCEME, os quais estão apresentados a seguir na Figura 27.

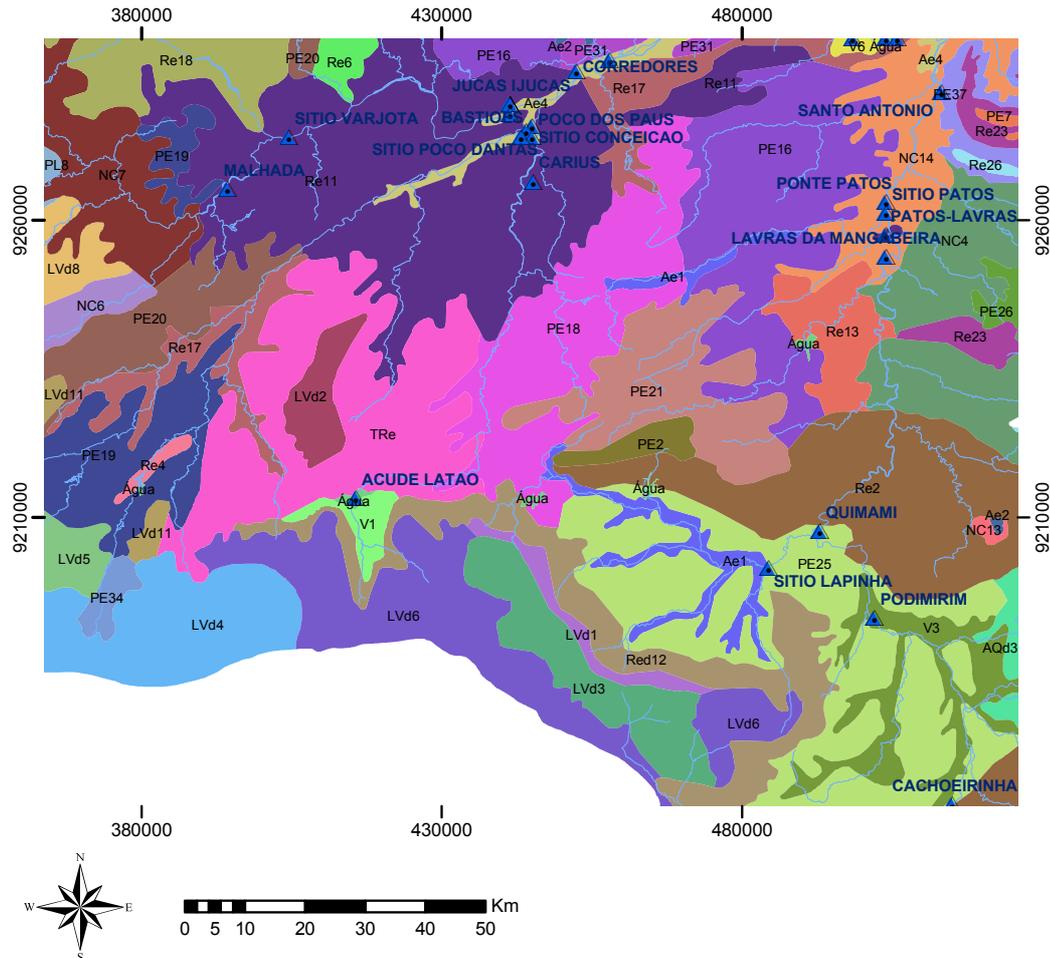


Figura 27 – Tipos de Solo da Área

## 5.2 – Metodologia

Conforme metodologia proposta para implementação do SIG, os passos seguidos foram:

- Definição da bacia hidrográfica contribuinte para a estação Sítio Lapinha;
- Organização dos dados de chuva;
- Tratamento dos dados;
- Calibração e Validação dos Coeficientes.

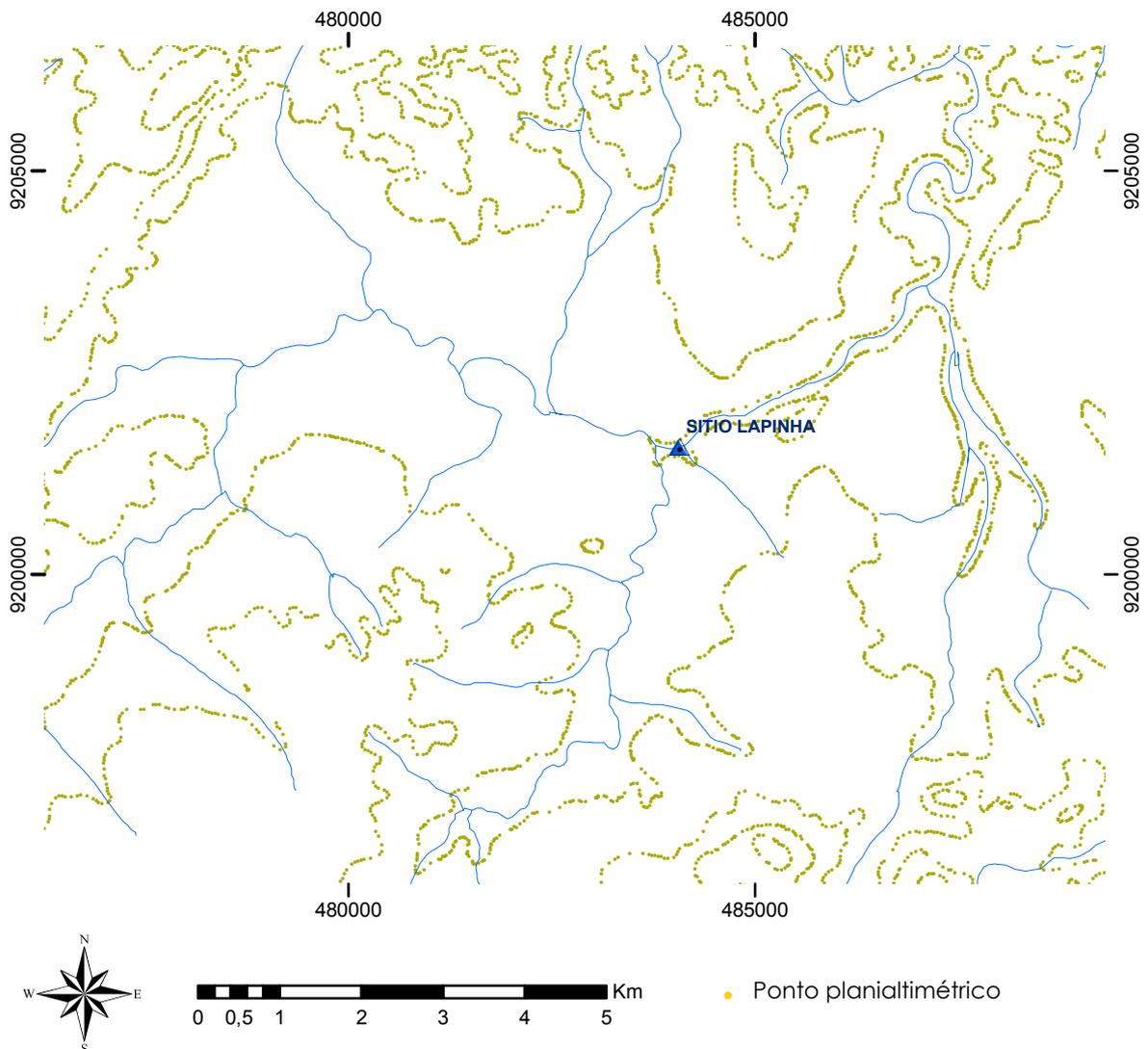
### 5.2.1 – Definição da Bacia Hidrográfica

Para se definir a bacia hidrográfica contribuinte da estação Sítio Lapinha foi necessário gerar o modelo digital do terreno (MDT) a partir das curvas de nível constantes nas cartas topográficas do IBGE na escala 1:100.000. As curvas foram transformadas em pontos com coordenadas tri-dimensionais, gerando um total de

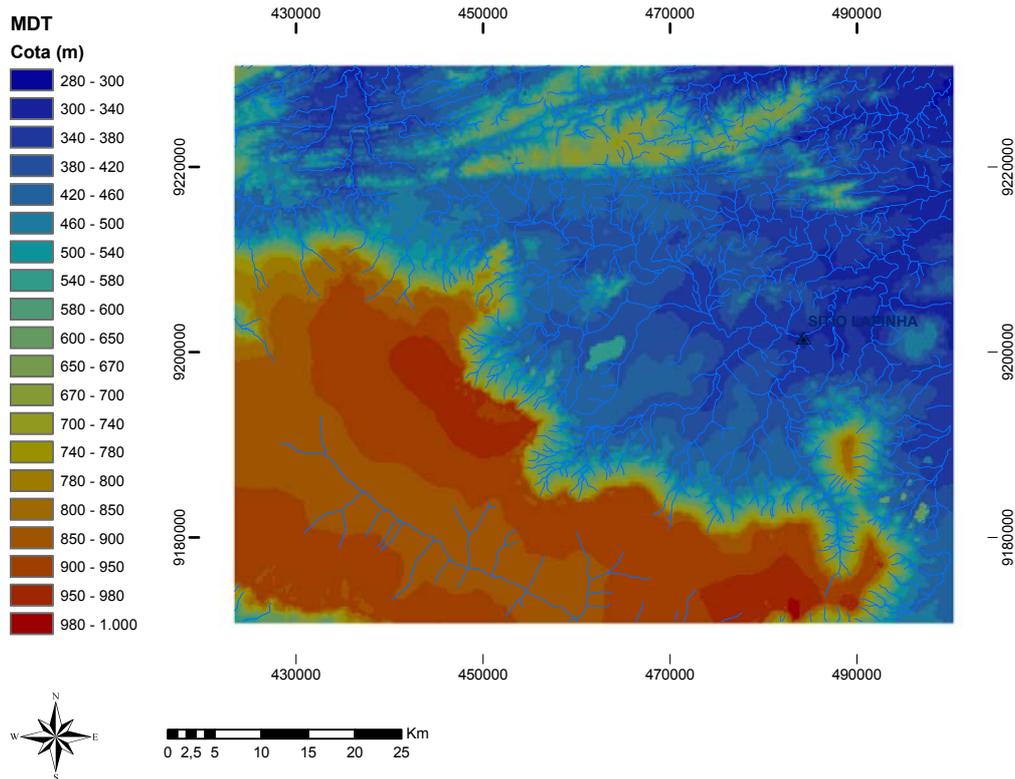
208.599 pontos, conforme mostrado na Figura 28.

De posse dos pontos gerou-se o MDT através do método de interpolação Inverso da Distância Ponderada (do inglês *Inverse Distance Weighted* – IDW).

A qualidade da interpolação foi verificada por validação cruzada, que consiste basicamente em comparar cada valor medido com o seu respectivo valor estimado na superfície do MDT, contabilizando a diferença entre eles como sendo o erro de estimativa. A Figura 29 a seguir apresenta o MDT gerado.



**Figura 28 – Detalhe da Transformação das Curvas de Nível em Pontos**



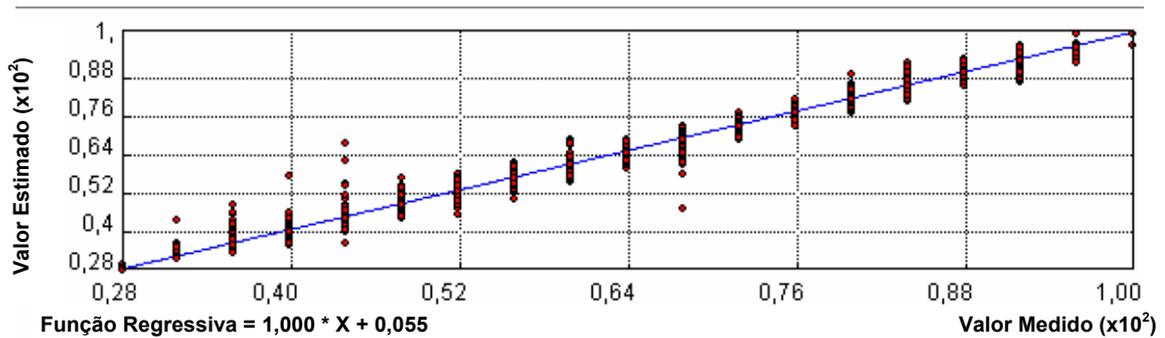
**Figura 29 – MDT Gerado pela Interpolação**

Conforme apresentado na metodologia, pela falta de legislação específica que normatize a classificação de superfícies altimétricas, utilizou-se na pesquisa as diretrizes do Decreto nº 89.817 para validar o MDT.

As cartas utilizadas na pesquisa apresentam valores da eqüidistância de 40 metros. Para o MDT ser classificado como Classe A de Padrão de Exatidão Cartográfica, 90 % dos pontos interpolados entre duas curvas de nível deverão ter erro altimétrico menor que 20 metros (metade da eqüidistância entre as curvas-de-nível). Como foram utilizados 208.599 pontos para gerar o MDT, a quantidade máxima de pontos com erro maior do que 20 metros terá que ser 20.860. O MDT gerado apresentou como resultado da validação cruzada os valores mostrados na Tabela 6. A Figura 30 ilustra os resultados da validação cruzada em forma gráfica.

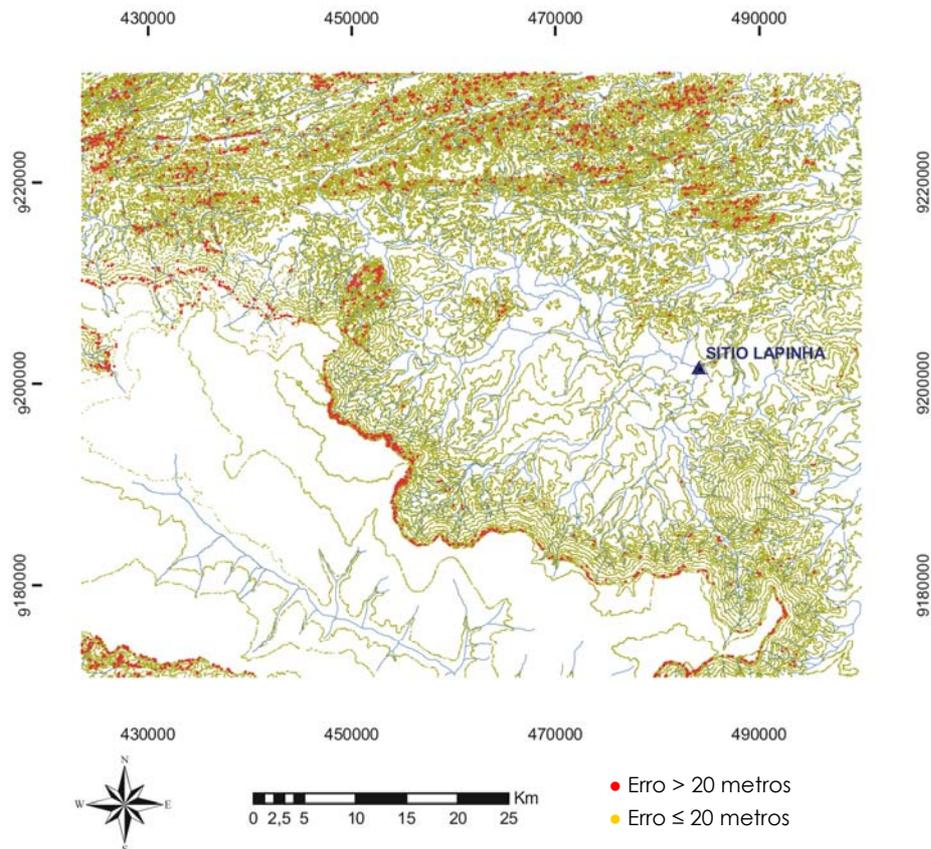
**Tabela 6 – Resultados do Erro Altimétrico**

	Pontos do MDT	Percentual
Total	208.599	100%
Erros  < 20 metros	205.850	99%
Erros  > 20 metros	2.749	1%



**Figura 30 – Gráfico dos Resultados da Validação Cruzada**

A Tabela 6 mostra que 99 % dos pontos interpolados na elaboração do MDT apresentaram erro menor que 20 metros. Assim, pode-se classificar o MDT gerado como Classe A segundo a exatidão cartográfica, conforme Decreto nº 89.817. A Figura 31 destaca em vermelho os pontos que apresentaram erro maior que 20 metros. Com o MDT validado foi possível iniciar o processo de definição da bacia contribuinte da estação Sítio Lapinha.



**Figura 31 – Pontos do MDT que Apresentaram Erro Maior que 20 metros**

Utilizou-se o algoritmo *ArchHydro* para definir a bacia. Esse aplicativo percorre os seguintes itens para determinar a bacia hidrográfica:

a) Geração do MDT sem depressões, através do algoritmo Agree, conforme apresentado na Figura 32;

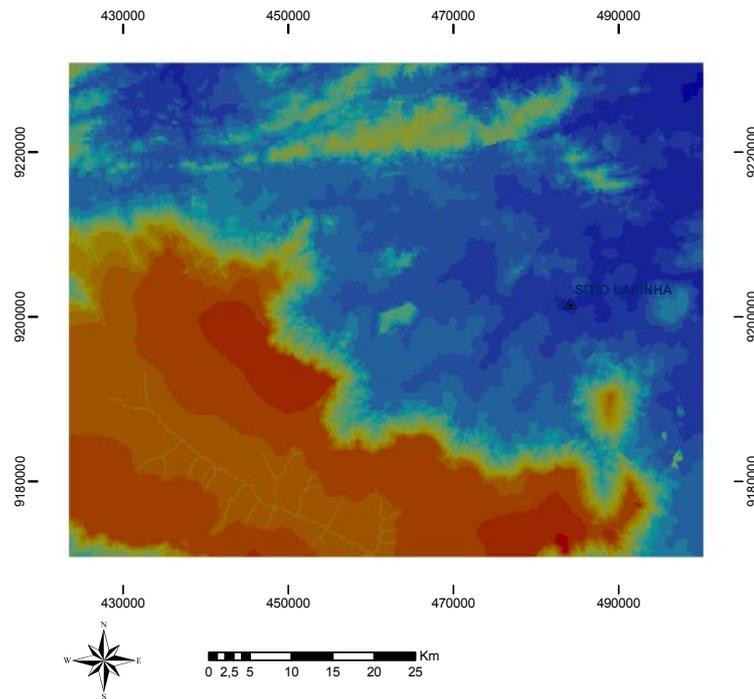


Figura 32 – MDT sem Depressões

b) Determinação da direção do fluxo, conforme apresentado na Figura 33;

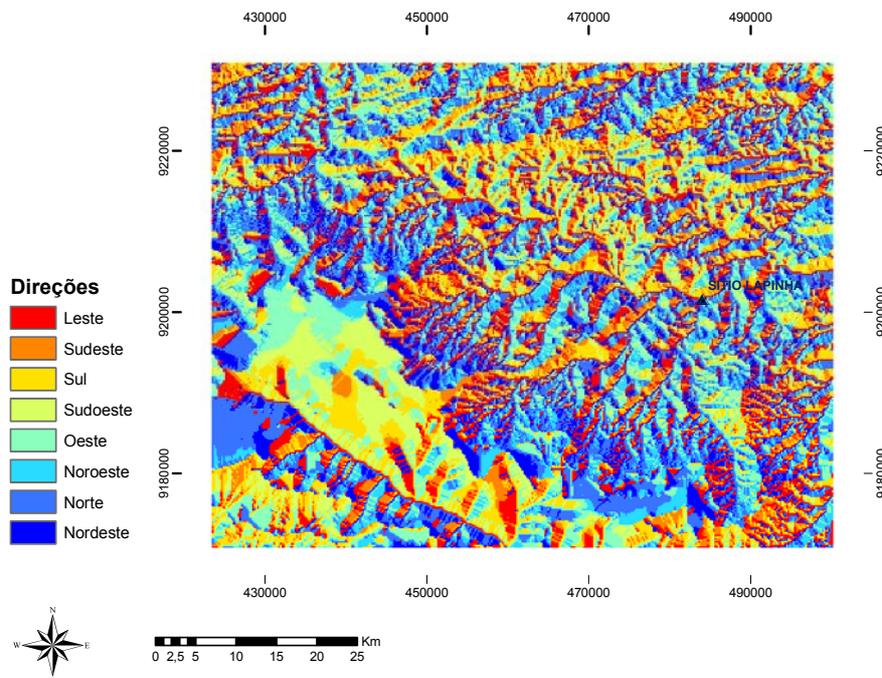
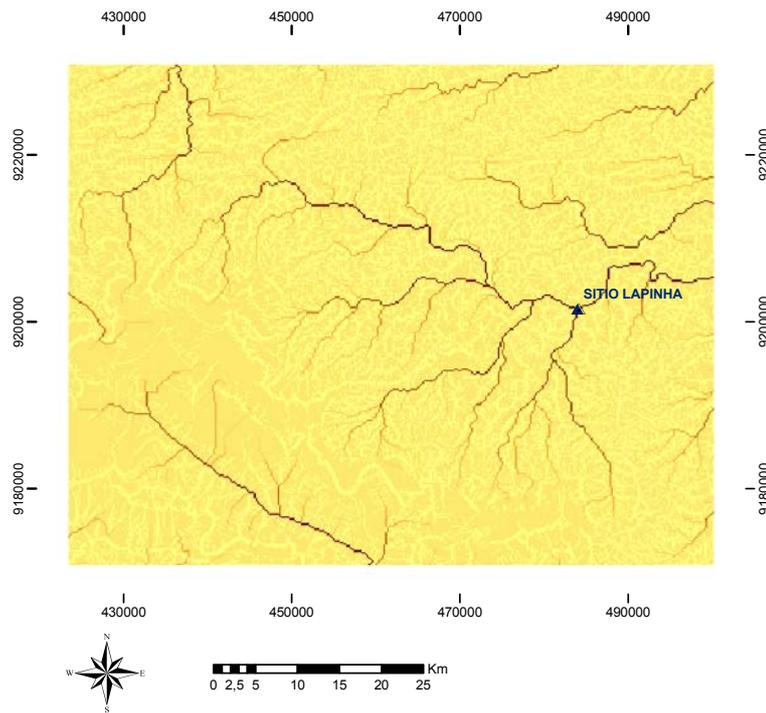


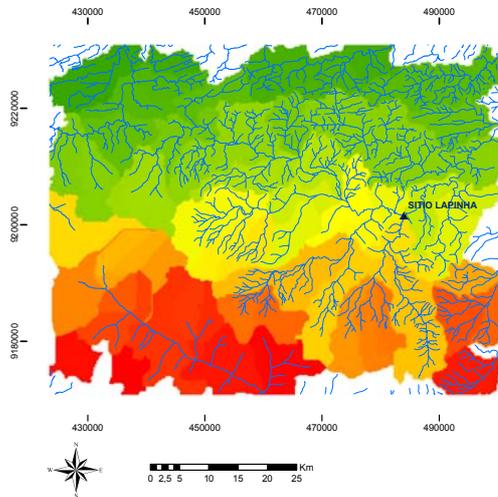
Figura 33 – Direção do Fluxo

c) Determinação do fluxo acumulado, conforme apresentado na Figura 34;

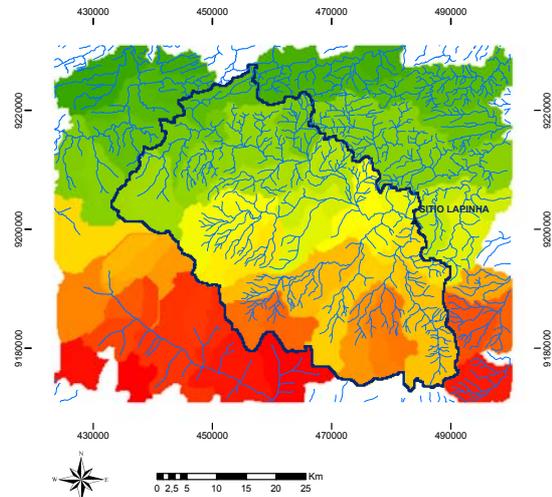


**Figura 34 – Fluxo Acumulado**

d) Definição da bacia hidrográfica conforme apresentado na Figura 35 e 36.



**Figura 35 – Sub-Bacias Hidrográficas**



**Figura 36 – Bacia Hidrográfica Contribuinte da Estação Sítio Lapinha**

## 5.2.2 – Organização dos Dados de Chuva

Conforme apresentado anteriormente os dados de chuva disponíveis para a região são oriundos de 34 estações de medição, com periodicidade variando do ano de 1974 ao ano de 2002. Como os dados de vazão da estação Sítio Lapinha possuem dois períodos de séries de dados (1965 a 1976 e 1985 a 2002), as séries de dados comuns entre chuva e vazão são 1974 a 1976 e 1985 a 2002. Optou-se por

utilizar a série de dados do período de 1985 a 2002.

Como esses dados serão interpolados foi necessário organizá-los de tal forma que, para o ano de 1985, por exemplo, a interpolação somente poderia utilizar as estações que tivessem dados do ano de 1985. O que ocorreu foi que quanto mais recente o ano, mais estações existem com dados. Assim o ano de 2002 apresentou 34 estações com dados, enquanto o ano de 1985 apresentou apenas 20 estações. As Figuras 37 e 38 ilustram a quantidade de estações utilizadas para interpolação nos anos de 1985 e 2002.

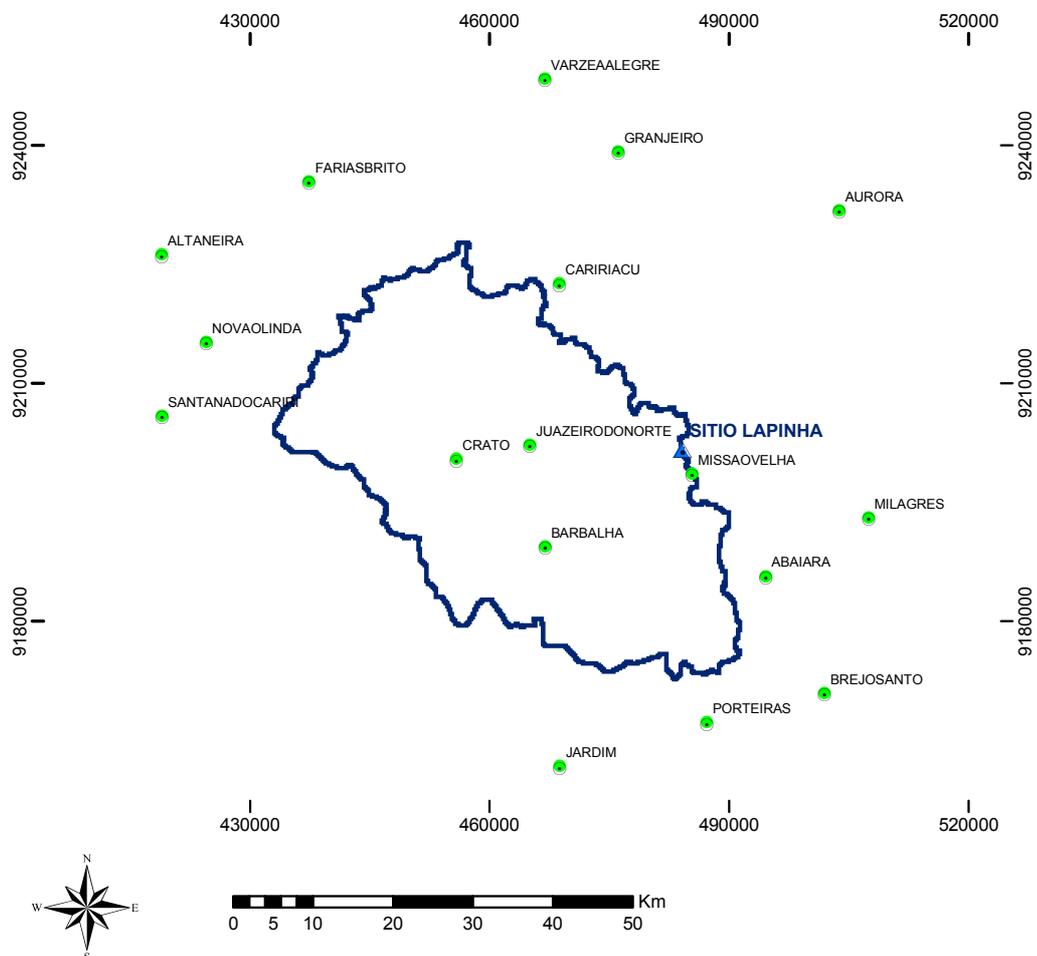
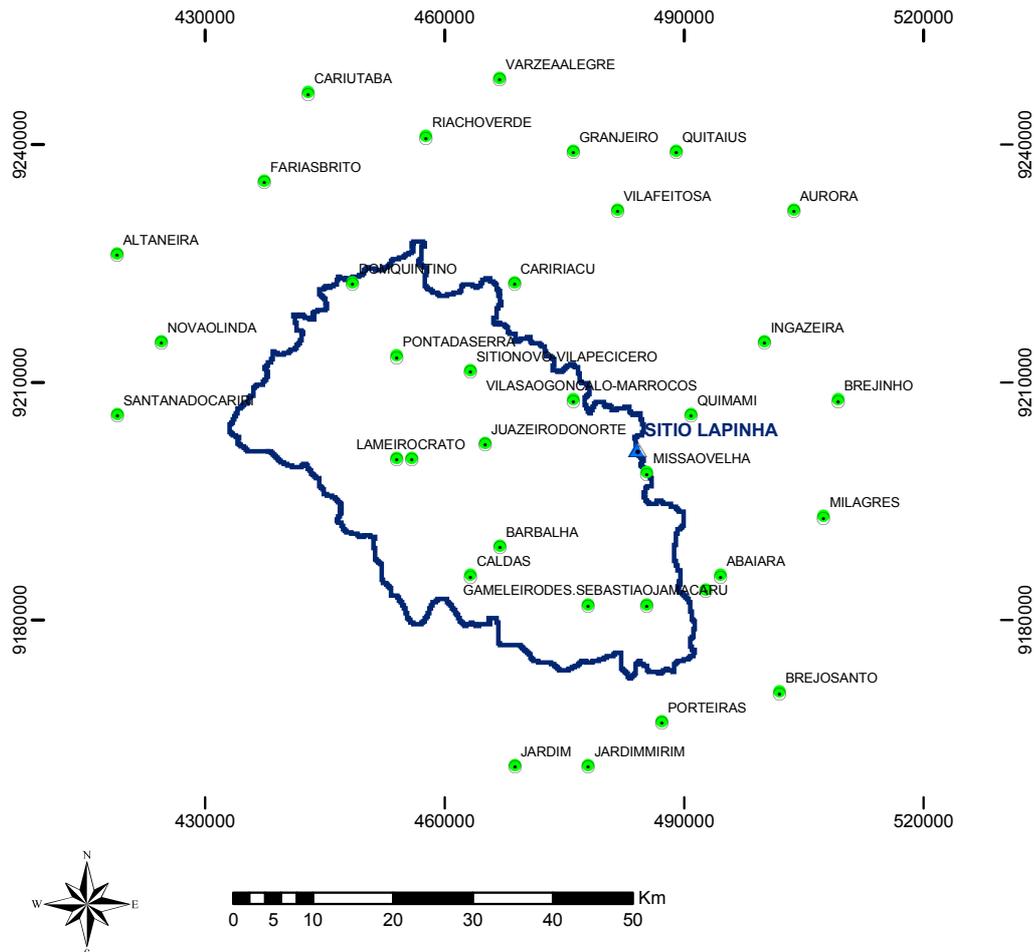


Figura 37 – Estações Utilizadas para Interpolação do Ano de 1985



**Figura 38 – Estações Utilizadas para Interpolação do Ano de 2002**

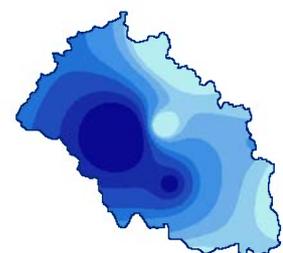
Para a interpolação dos dados de chuva foram desconsiderados os meses onde historicamente ocorre quantidade de chuva desprezível no Estado do Ceará (agosto, setembro e outubro). Para os outros meses realizou-se interpolação dos dados de chuva de todos os anos da série, conforme pode ser observado de forma ilustrativa para o ano de 1985 nas Figuras 39 a 47, a seguir.



**Figura 39 – Chuva Jan/85**



**Figura 40 – Chuva Fev/85**



**Figura 41 – Chuva Mar/85**

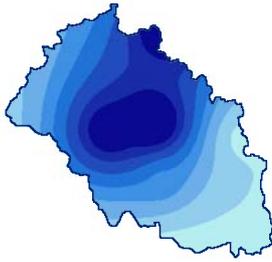


Figura 42 – Chuva Abr/85

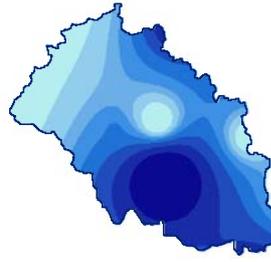


Figura 43 – Chuva Mai/85

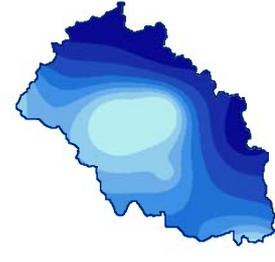


Figura 44 – Chuva Jun/85



Figura 45 – Chuva Jul/85

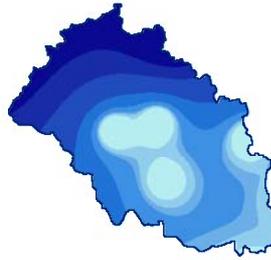


Figura 46 – Chuva Nov/85

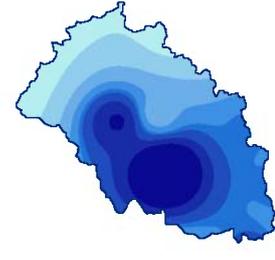


Figura 47 – Chuva Dez/85

### 5.2.3 - Tratamento dos Dados

Após organizar os dados de chuva foi necessário transformá-los de mm/dia para  $m^3/s$  e determinar a quantidade de chuva para cada tipo de solo. Para transformar os dados de chuva utilizou-se a álgebra de mapas.

A determinação da quantidade de chuva para cada tipo de solo também foi feita através de álgebra de mapas, conforme ilustrado nas Figuras 48 a 50 a seguir.

Fazendo-se os cruzamentos dos meses de todos os anos com os tipos de solo da bacia hidrográfica contribuinte da estação Sítio Lapinha, obteve-se a quantidade de chuva em  $m^3/s$  para todos dos meses da amostra, conforme apresentado na Tabela A.1 do Anexo.

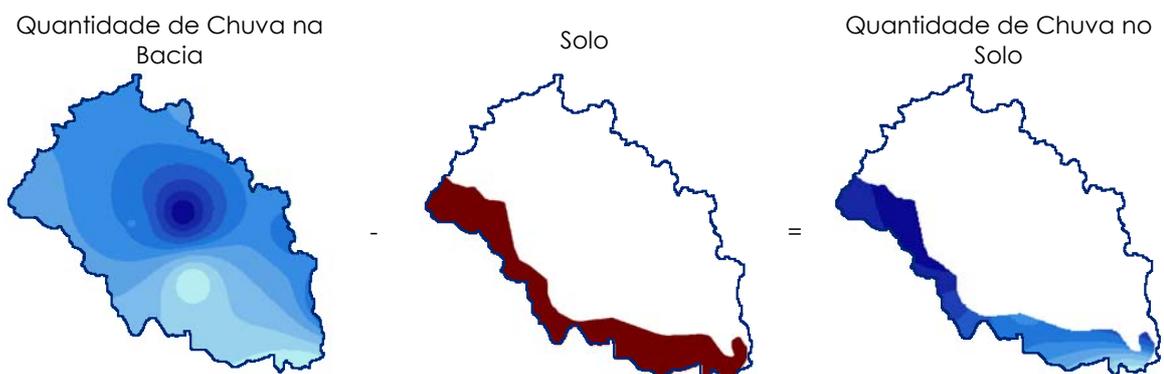


Figura 48 – Ilustração da Álgebra de Mapas para Determinação da Chuva para Solo Tipo 1



Figura 49 – Ilustração da Álgebra de Mapas para Determinação da Chuva para Solo Tipo 2

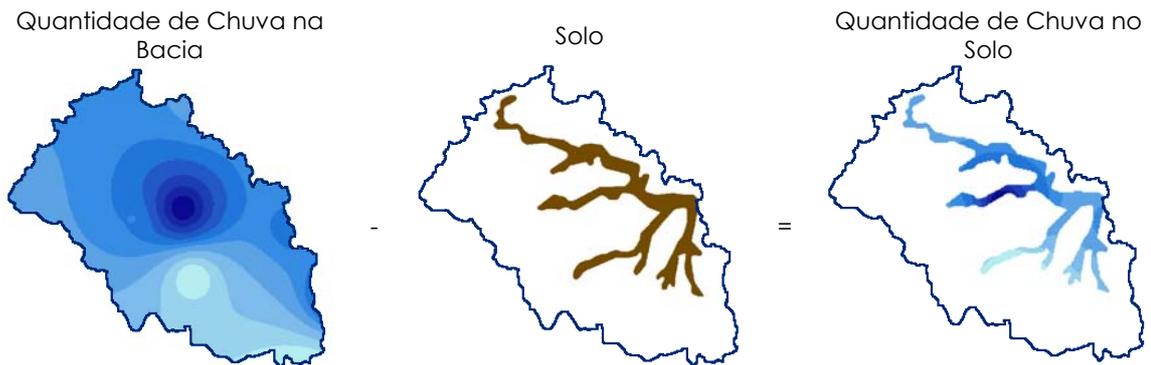


Figura 50 – Ilustração da Álgebra de Mapas para Determinação da Chuva para Solo Tipo 3

#### 5.2.4 - Calibração e Validação dos Parâmetros

Após a determinação da quantidade chuva para cada tipo de solo foi feita a calibração dos coeficientes. Os dados foram divididos de acordo com a anomalia da chuva, ou seja, foi feita uma divisão de anos secos, normais e chuvosos. A amostra apresentou 3 anos secos, 12 anos normais e 3 anos chuvosos. Para fazer o balanço entre a calibração e a validação os anos foram divididos da seguinte forma:

- a) Calibração: 2 anos secos, 8 anos normais e 2 anos chuvosos; e
- b) Validação: 1 ano seco, 4 anos normais e 1 ano chuvoso.

Na Tabela A.2 do Anexo estão apresentados os dados completos da amostra utilizada na pesquisa.

Os solos foram classificados conforme a sua capacidade de escoamento da água, baseado nos parâmetros físicos de infiltração do solo apresentados no Atlas do Ceará. Assim, os solos da bacia foram classificados em 4 tipos, quais sejam.

- a) **Tipo 1** – Infiltração excessiva a acentuada (baixíssimo escoamento

- superficial);
- b) **Tipo 2** - Infiltração boa a acentuada (baixo escoamento superficial);
- c) **Tipo 3** - Infiltração boa (médio escoamento superficial); e
- d) **Tipo 4** - Infiltração moderada (bom escoamento superficial).

Para calibração foi utilizado o algoritmo solver, através das Funções Objetivo propostas por TUCCI (1998).

Os resultados encontrados pelo algoritmo, aplicando-se as funções objetivo, foram os apresentados na Tabela 7 a seguir.

**Tabela 7 – Resultados dos Parâmetros Encontrados pelo Algoritmo**

Parâmetro Encontrado	Função Objetivo			
	Módulo	Quadrática	Inversa	Relativa
Coeficiente Solo Tipo 1 (C1)	0,02754	0,01000	valor não encontrado	0,01000
Coeficiente Solo Tipo 2 (C2)	0,04345	0,01000	valor não encontrado	0,01000
Coeficiente Solo Tipo 3 (C3)	0,05307	0,01000	valor não encontrado	0,01000
Coeficiente Solo Tipo 4 (C4)	0,06281	0,24851	valor não encontrado	0,05154

Observa-se na Tabela 7 que a única função que ajustou os coeficientes, conforme restrições do modelo ( $C1 > C2 > C3 > C4$ ), foi a função Módulo. Desta forma, a função Módulo será utilizada também para validação do modelo. Ressalta-se que os coeficientes encontrados estão relacionados às células do *grid*, ou seja, utilizando-se a Equação 10 será encontrado o valor da chuva em  $m^3/s$  na célula e, conseqüentemente, se esse valor da chuva for multiplicado pelo coeficiente será encontrado o valor da vazão em  $m^3/s$  na célula.

A Figura 51 apresenta o gráfico de comparação da vazão calculada na calibração do modelo e a vazão observada e a Figura 52 mostra o gráfico de comparação da vazão calculada na validação do modelo e a vazão observada.

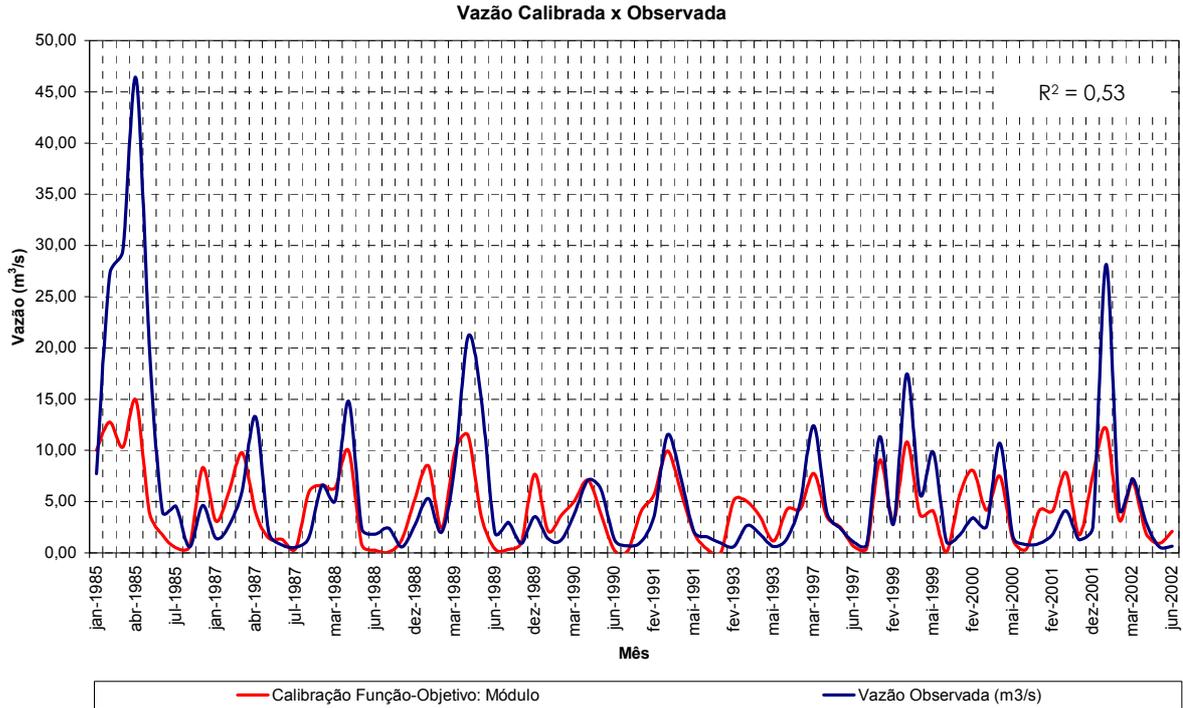


Figura 51 – Comparação entre Vazão Calibrada e Vazão Observada

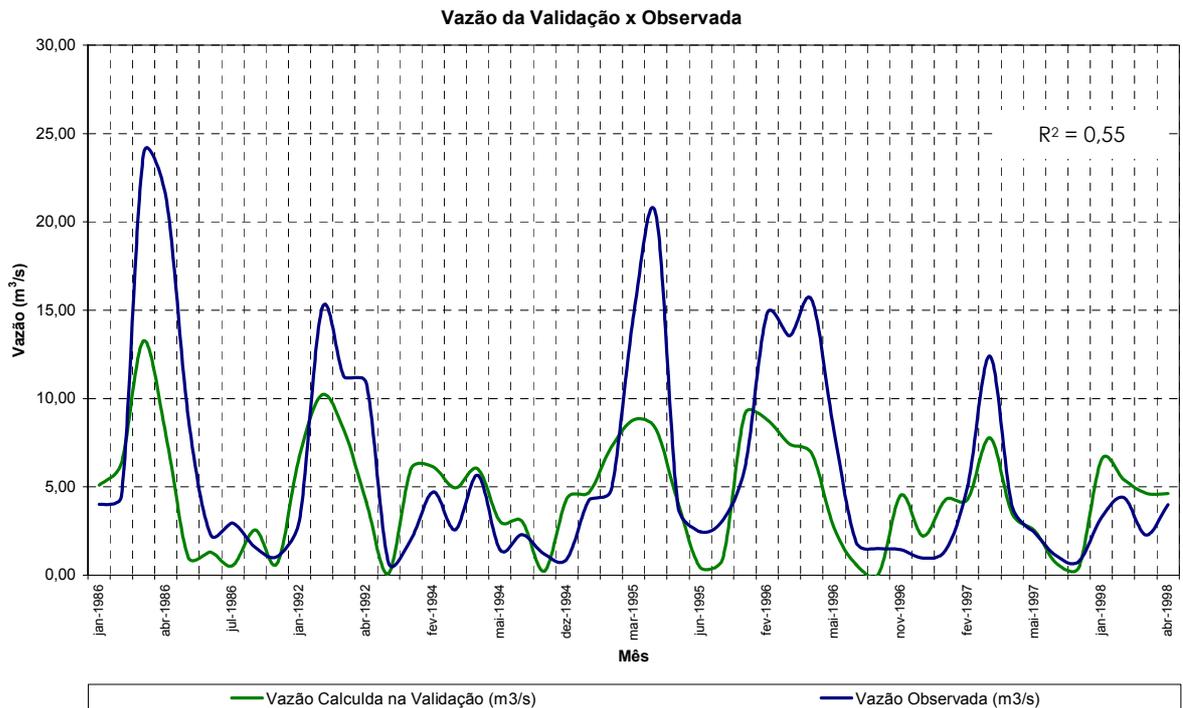
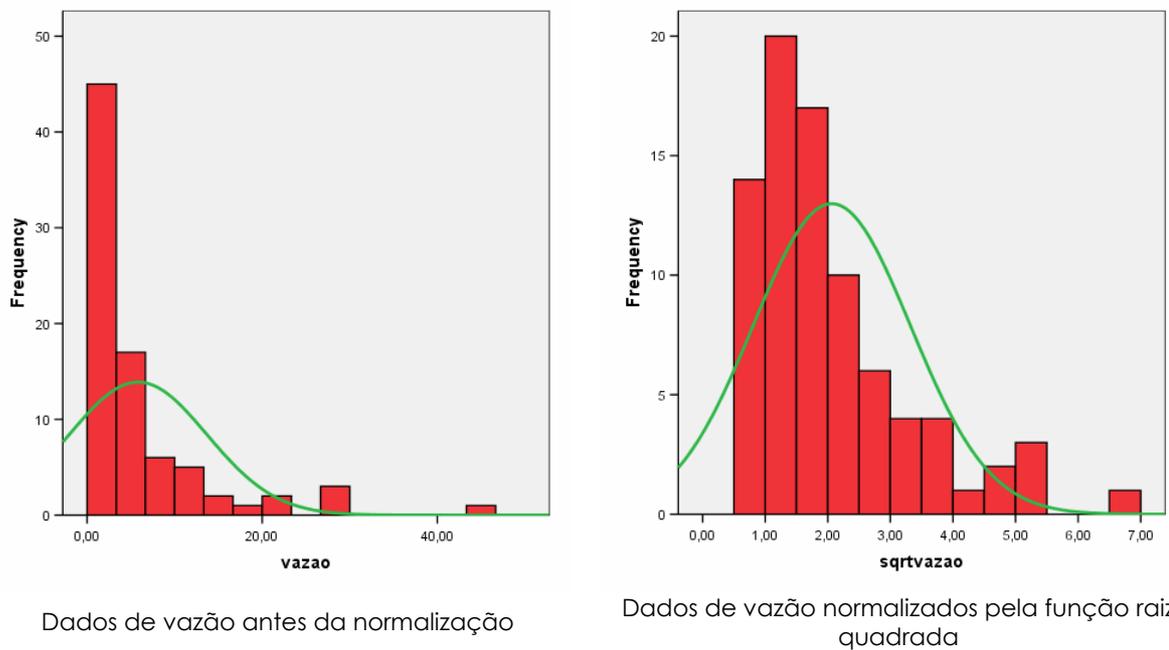


Figura 52 – Comparação entre Vazão da Validação e Vazão Observada

Avaliando-se o coeficiente de determinação  $R^2$  observa-se que o grau de correspondência entre os valores estimados, tanto na calibração como na validação, resultou cerca de 0,50. Assim, pode-se concluir que mesmo utilizando uma amostra relativamente pequena e fazendo-se grandes simplificações, a

metodologia proposta na pesquisa foi capaz de modelar cerca de 50 % do processo de transformação de chuva em vazão.

Conforme pode-se observar na Figura 51 o modelo não foi capaz de descrever bem as vazões de pico, que ocorrem, no Estado do Ceará, historicamente nos meses de fevereiro, março e abril. Assim remodelou-se as equações acrescentando-se uma variável época. Também foi observado que os dados de vazão não apresentam uma distribuição normal, isso estava prejudicando os resultados do modelo. Assim os dados de vazão foram normalizados utilizando-se a função raiz quadrada. A Figura 53 apresenta os histogramas dos dados de vazão antes e depois da normalização.



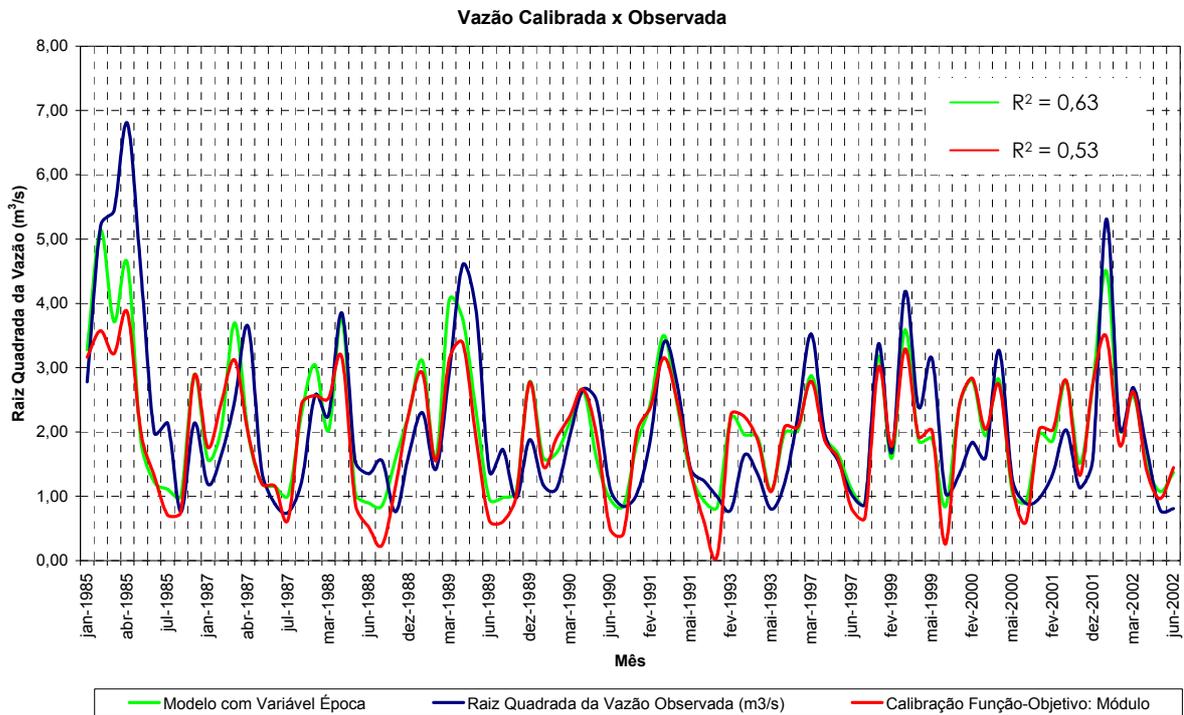
**Figura 53 – Histogramas dos dados de vazão**

Dessa forma trabalhou-se com os dados de vazão normalizados e com mais uma variável denominada época, que atuará nos meses de fevereiro, março e abril. A nova equação do modelo ficou a seguinte:

$$\sqrt{\text{vazão}} = k + C1 \times \text{ChuvaSolo\_1} + C2 \times \text{ChuvaSolo\_2} + C3 \times \text{ChuvaSolo\_3} + C4 \times \text{ChuvaSolo\_4} + C5 \times \text{Época}$$

Onde,  $k$  é uma constante,  $C1$  a  $C4$  são os coeficientes dos solos,  $C5$  é o coeficiente da época, e época tem o valor 1 para os meses de fevereiro, março e abril e zero para os meses restantes.

A Figura 54 apresenta um gráfico que compara os resultados encontrados com a função objetivo módulo e o modelo implementado com a variável época.



**Figura 54 – Comparação dos Resultados dos Modelos**

Os resultados do modelo implementado com a variável época mostraram-se mais eficientes, já que o coeficiente de determinação  $R^2$  resultou em 0,63 e também pode-se verificar visualmente que nos meses de pico de vazão o modelo calculou resultados mais próximos das vazões observadas. Os dados utilizados nesse modelos estão apresentados na Tabela A.3 no anexo.

### 5.3 – Implementação do SIG

Conforme metodologia proposta, para se encontrar o plano de informação vazão pontual, é necessário multiplicar o plano de informação chuva da bacia pelo plano de informação coeficiente de perdas do solo, como pode ser observado na Figura 55 a seguir.

Encontrando-se o plano de informação Vazão pontual (m<sup>3</sup>/s), calculou-se a vazão acumulada através do algoritmo *Hydrology Analysis*, como apresentado na Figura 56. Dessa forma qualquer ponto da bacia hidrografia estará associado a um valor de vazão.



Figura 55 – Ilustração do Cruzamento dos Planos de Informação

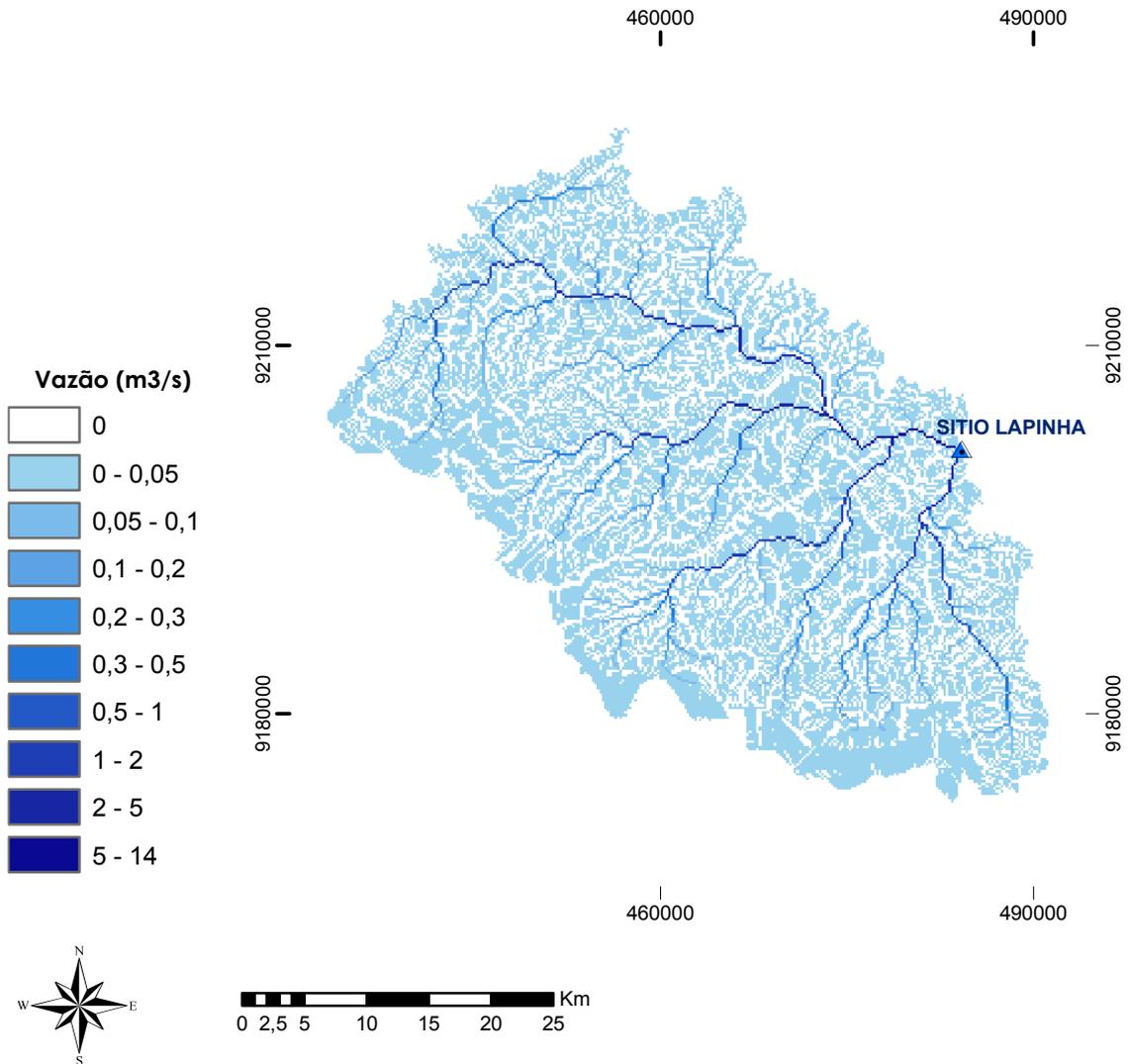


Figura 56 – Vazão Acumulada da Bacia

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve como principal foco estabelecer uma metodologia de um modelo baseado na tecnologia dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para simular o processo de transformação de chuva em vazão. Para tanto foi desenvolvida e validada uma metodologia que utiliza dados no formato *raster*, algoritmos de direção de fluxo e fluxo acumulado para calcular a vazão distribuída ao longo de toda a bacia hidrográfica, tendo como dado de entrada a chuva, o tipo de solo da região e a altimetria.

O tema escolhido é sem dúvida muito complexo e desafiador. Nesse trabalho procurou-se dar um primeiro passo para o desenvolvimento de metodologias alternativas para simulação hidrológica. Os resultados dessa pesquisa mostraram que os procedimentos metodológicos implementados foram capazes de aplicar as técnicas e formulações dos modelos hidrológicos em um ambiente de um SIG. Foram utilizadas formulações onde todas as perdas de água do processo de transformação de chuva em vazão são sintetizadas em um só coeficiente.

É claro que nesse processo existem muitas outras variáveis, porém o que se procurou fazer na pesquisa foi estabelecer uma metodologia básica que poderá ser aperfeiçoada em trabalhos futuros. Os resultados encontrados, com  $R^2 = 0,53$  e  $R^2 = 0,63$  com a variável época, foram considerados satisfatórios levando-se em consideração as grandes simplificações. Porém sabe-se que esses resultados ainda não qualificam a metodologia para ser utilizada em estudos específicos. Esse metodologia poderá sim ser utilizada em estudos preliminares e futuramente acrescentando-se novas variáveis acredita-se que será possível sua utilização em qualquer estudo que envolva o cálculo de vazão.

É importante ressaltar que no modelo proposto foram utilizados dados da própria região para calibrar e validar o modelo, ou seja, não são utilizados dados de bibliografias ou de experimentos de outras regiões e até de outros países muito diferentes do Brasil, como comumente é feito nos modelos hidrológicos tradicionais.

A bacia hidrográfica pesquisada (bacia da estação Sítio Lapinha) não sofre influências de outras bacias a montante. Isso ajudou a controlar melhor os

parâmetros do modelo.

A dissertação ora apresentada buscou abrir caminhos para aproximar cada vez mais os modelos hidrológicos dos SIGs. Acredita-se que esse objetivo foi alcançado.

Para futuros trabalhos recomendam-se os seguintes itens:

- a) Avaliar qualidade altimétrica de dados de outras fontes, com por exemplo dados do Projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), com a finalidade de ser empregado na metodologia proposta;
- b) implementar outros coeficientes na formulação do coeficiente de perda, por exemplo, evaporação;
- c) no ano de 1985 ocorreu uma vazão muito elevada que não teve recorrência no período da amostra. Isso certamente contribuiu negativamente para a calibração do modelo. Assim é recomendável trabalhar com amostras que apresentem recorrência de vazões de pico.

Recomenda-se também que essa pesquisa seja utilizada como base para se implementar um SIG para análise e gerenciamento da concessão de outorgas de uso da água.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNOFF, S.; **Geographic Information Systems: A Management Perspective**. WDL Publications, Ottawa, Canada, 1995.

BRASIL; **Decreto-Lei Nº 89.817**, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, Nº 120, p 8884 – 8886, 22 de junho de 1984.

BURROUGH, P. A.; **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford University Press, Oxford, 194p, 1986.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A.; **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Clarendon Press, 2ª edição, 311p, 1998.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T.; **Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos / Associação Brasileira de Recursos Hídricos – Vol. 7, n. 3, Porto Alegre / RS, 2002.

COLLISCHONN, W.; **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

COPPOCK, J. T.; RHIND, D. W.; **The History of GIS**. Geographical Information Systems: Principles and Applications (2 volumes), London: Longman, and New York: Wiley, pp. 21-43, 1991.

CRUZ, J. C.; **Disponibilidade Hídrica para Outorga: Avaliação de Aspectos Técnicos e Conceituais**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

ELETROBRÁS; **Manual de Minicentrals Hidrelétricas**. Ministério das Minas e Energia: DNAEE, 1985.

GOODCHILD, M. F.; **The State of GIS for Environmental Problem-Solving**. Capítulo 2 em Environmental Modeling with GIS, Oxford University Press, 488p, New York, 1993.

HELLWEGER F.; **AGREE - DEM Surface Reconditioning System**. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, 1997.

ISSAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M.; **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford University Press, 1989.

KLEINBAUM, D. G.; KUPPER, L. L.; **Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods**. Boston, Massachusetts, 486p, 1978.

LIMA, H. V. C.; LIMA, L. C. T. M; **Interpolação Espacial - Ferramenta Auxiliar na Gestão dos Recursos Hídricos** In: V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2000, Natal, 2000.

LANG, L.; **Managing Natural Resources with GIS**. Environmental Systems Research Institute, Inc, 2000.

MAIDMENT, D. R.; **Arc Hydro: GIS for Water Resource**. Center for Research in Water Resources, University of Texas at Austin, 2002.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A.; **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH. Porto Alegre, 536p. , 2001.

ORTIZ, J. L.; **Geoestatística**. Disponível em: <http://www.gpsglobal.com.br>. Acesso em 02 de novembro de 2004.

RIGHETTO, A. M.; **Hidrologia e Recursos Hídricos**. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 840 p, São Carlos, 1998.

ROSA, E. U.; **Desenvolvimento de Procedimentos Computacionais para Integração de Sistemas de Informação Geográfica com Modelo Hidrológico Chuva-Vazão em Bacias Urbanas**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação – Área de Concentração Geomática – Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro, 2002.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F.; **Hidrometria Aplicada**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 372p, Curitiba, 2001.

SILVA, J. M. A.; **Modelo Hidrológico Para o Cálculo do Balanço Hídrico e Obtenção do Hidrograma de Escoamento Superficial em Bacias Hidrográficas: Desenvolvimento e Aplicação.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2002.

SINGH, V. P.; FIORENTINO, M.; **Geographical Information Systems in Hydrology.** Water Science and Technology Library. Louisiana State University, Baton Rouge, U.S.A., 1996.

SOKULSKY, K. et al.; **Water Availability Modeling Project: Year 1: Project Management Report: Concept Plan: Overview of the New Modeling System, 1998.**

TABACHNICK, B.; FIDELL, L. S.; **Using Multivariate Statistics** (3ª edição). New York: Harper Collins, 1996.

TUCCI, C. E. M.; Cap 15 - **Regionalização de Vazões.** In: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: Ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade – UFRGS/Edusp/ABRH, 1993.

TUCCI, C. E. M.; **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

WHITEAKER, T. L.; **Geographically Integrated Hydrologic Modeling Systems.** Dissertação de Mestrado. Center for Research In Water Resources, University Of Texas, Austin, 2004.

## ANEXO

Tabela A.1 – Quantidade de Chuva por Tipo de Solo

Ano	Mês	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s) – Sítio Lapinha	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s) para cada Tipo de Solo			
				Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1985	JANEIRO	198,92	7,71	25,29	39,61	83,53	50,49
	FEVEREIRO	250,25	27,09	31,67	40,93	105,50	72,15
	MARÇO	205,18	29,56	25,58	41,13	86,60	51,87
	ABRIL	295,33	46,30	37,67	56,61	127,10	73,95
	MAIO	79,63	20,35	9,97	16,05	33,44	20,17
	JUNHO	34,64	3,96	4,49	6,70	14,66	8,79
	JULHO	9,79	4,58	0,86	2,48	3,97	2,48
	NOVEMBRO	11,42	0,58	1,38	2,24	4,83	2,97
	DEZEMBRO	164,85	4,60	20,87	33,03	69,04	41,91
1986	JANEIRO	101,86	4,03	14,43	17,86	45,32	24,25
	FEVEREIRO	125,74	4,46	16,09	24,65	53,48	31,52
	MARÇO	263,65	23,81	34,88	48,51	115,36	64,90
	ABRIL	156,43	21,41	20,61	28,00	67,64	40,18
	MAIO	20,41	8,97	3,04	3,51	9,24	4,62
	JUNHO	25,23	2,31	2,48	4,49	11,53	6,73
	JULHO	10,58	2,95	1,14	2,75	3,98	2,71
	NOVEMBRO	50,58	1,57	5,68	10,20	20,26	14,44
	DEZEMBRO	13,24	1,06	1,37	2,37	5,81	3,69
1987	JANEIRO	61,61	1,42	7,81	12,43	26,00	15,37
	FEVEREIRO	119,55	2,68	16,07	21,47	53,36	28,65
	MARÇO	192,56	6,19	23,89	37,00	83,19	48,48
	ABRIL	77,80	13,28	9,76	15,50	32,91	19,63
	MAIO	28,64	1,98	3,59	5,66	12,07	7,32
	JUNHO	26,45	0,78	3,40	4,98	11,36	6,71
	JULHO	8,28	0,56	0,80	2,38	2,89	2,21
	NOVEMBRO	6,31	0,42	0,72	1,25	2,72	1,62
	DEZEMBRO	2,47	0,28	0,27	0,61	0,89	0,70
1988	JANEIRO	117,57	1,52	14,85	23,74	49,32	29,66
	FEVEREIRO	130,32	6,59	15,63	26,62	54,17	33,90
	MARÇO	127,08	5,13	17,06	25,22	53,33	31,47
	ABRIL	197,18	14,80	24,53	37,98	84,21	50,46
	MAIO	15,48	2,37	1,89	3,10	6,67	3,82
	JUNHO	5,32	1,83	0,64	1,25	2,09	1,34
	JULHO	1,14	2,39	0,11	0,27	0,42	0,34
	NOVEMBRO	26,17	0,58	2,39	6,17	10,67	6,94
	DEZEMBRO	105,35	2,74	13,01	21,58	43,91	26,85

Ano	Mês	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s) – Sítio Lapinha	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s) para cada Tipo de Solo			
				Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1989	JANEIRO	168,69	5,30	20,98	33,42	72,39	41,90
	FEVEREIRO	47,54	2,02	5,91	9,80	19,51	12,32
	MARÇO	194,69	8,59	23,36	40,40	79,96	50,97
	ABRIL	227,52	21,13	28,88	45,16	96,49	56,99
	MAIO	70,76	15,05	7,67	15,77	28,65	18,67
	JUNHO	7,77	1,94	0,86	2,06	2,87	1,98
	JULHO	7,21	3,00	0,74	1,94	2,51	2,02
	NOVEMBRO	20,09	0,95	2,54	4,10	8,33	5,12
1990	DEZEMBRO	152,47	3,54	19,24	31,27	62,04	39,92
	JANEIRO	42,95	1,40	4,87	9,49	17,61	10,98
	FEVEREIRO	72,58	1,25	9,52	14,49	30,51	18,06
	MARÇO	100,41	3,81	12,85	19,66	42,62	25,28
	ABRIL	140,99	7,11	17,84	29,46	57,80	35,89
	MAIO	74,35	6,13	9,84	14,13	31,81	18,57
	JUNHO	4,78	1,26	0,44	1,19	1,92	1,23
	JULHO	3,67	0,71	0,49	0,74	1,55	0,89
1991	NOVEMBRO	23,54	0,05	2,33	4,78	9,94	6,49
	DEZEMBRO	12,33	0,03	1,47	2,24	5,69	2,93
	JANEIRO	79,25	1,09	10,02	15,79	33,48	19,96
	FEVEREIRO	112,72	3,56	14,16	22,77	46,46	29,33
	MARÇO	197,46	11,49	24,93	38,75	83,90	49,88
	ABRIL	120,46	7,43	15,37	23,52	51,55	30,02
	MAIO	38,34	2,04	4,73	7,91	15,75	9,95
	JUNHO	7,22	1,54	0,89	1,40	3,15	1,78
1992	JULHO	0,14	0,99	0,00	0,01	0,07	0,06
	NOVEMBRO	25,56	0,00	2,93	5,33	10,33	6,97
	DEZEMBRO	1,07	0,44	0,12	0,28	0,40	0,27
	JANEIRO	133,48	3,09	16,46	26,64	56,55	33,83
	FEVEREIRO	202,82	15,08	25,65	39,83	86,23	51,11
	MARÇO	162,72	11,23	20,70	31,91	69,52	40,59
	ABRIL	82,25	10,87	10,11	16,93	34,41	20,80
	MAIO	1,92	0,73	0,22	0,41	0,78	0,51
1992	JUNHO	3,91	0,35	0,29	0,75	1,55	1,32
	JULHO	11,31	0,04	1,33	2,37	4,63	2,98
	NOVEMBRO	9,03	0,00	0,86	2,64	2,69	2,84
	DEZEMBRO	8,02	0,00	0,94	2,00	3,01	2,07

Ano	Mês	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s) – Sítio Lapinha	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s) para cada Tipo de Solo			
				Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1993	JANEIRO	32,77	0,00	4,27	6,37	13,75	8,38
	FEVEREIRO	102,21	0,62	12,99	20,29	43,20	25,73
	MARÇO	99,76	2,68	13,32	18,24	42,91	25,29
	ABRIL	69,19	1,79	8,58	13,96	29,04	17,61
	MAIO	22,86	0,64	2,99	4,06	10,10	5,71
	JUNHO	0,19	0,00	0,01	0,09	0,06	0,03
	JULHO	12,44	0,00	1,47	2,43	5,15	3,39
	NOVEMBRO	52,58	0,00	7,38	8,74	24,19	12,27
	DEZEMBRO	13,22	0,00	1,77	2,02	6,10	3,33
1994	JANEIRO	119,34	2,04	15,02	24,58	48,89	30,85
	FEVEREIRO	121,40	4,72	14,95	24,85	50,31	31,29
	MARÇO	97,69	2,58	11,72	19,60	41,03	25,34
	ABRIL	119,39	5,66	14,95	23,60	50,61	30,23
	MAIO	60,24	1,45	7,17	12,22	25,06	15,79
	JUNHO	60,49	2,31	7,50	11,94	25,62	15,43
	JULHO	4,30	1,20	0,51	0,88	1,83	1,08
	NOVEMBRO	7,77	0,01	0,89	1,78	2,95	2,15
	DEZEMBRO	86,16	0,92	10,42	16,96	36,86	21,92
1995	JANEIRO	93,44	4,25	12,74	16,84	42,07	21,79
	FEVEREIRO	143,68	4,82	18,05	28,70	60,23	36,70
	MARÇO	174,75	14,81	22,65	33,47	75,14	43,49
	ABRIL	164,33	20,42	20,57	33,02	68,75	41,99
	MAIO	80,93	3,86	10,23	15,88	34,66	20,16
	JUNHO	8,52	2,47	1,03	1,89	3,44	2,16
	JULHO	19,05	3,11	2,65	3,50	8,32	4,58
	NOVEMBRO	30,77	0,01	3,55	6,81	11,83	8,58
	DEZEMBRO	17,91	0,01	2,44	3,27	7,84	4,36
1996	JANEIRO	181,07	6,12	21,29	38,43	74,50	46,85
	FEVEREIRO	174,51	14,82	22,53	31,42	77,54	43,02
	MARÇO	147,82	13,56	20,25	26,67	64,84	36,06
	ABRIL	136,66	15,57	17,50	26,69	58,21	34,26
	MAIO	53,39	8,14	6,83	11,31	21,88	13,37
	JUNHO	12,25	1,87	1,47	2,49	5,14	3,15
	JULHO	1,55	1,51	0,07	0,48	0,48	0,52
	NOVEMBRO	89,79	1,45	10,49	20,91	33,60	24,79
	DEZEMBRO	43,36	0,97	4,59	11,10	14,89	12,78

Ano	Mês	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s) – Sítio Lapinha	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s) para cada Tipo de Solo			
				Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
1997	JANEIRO	85,01	1,42	10,56	17,45	35,22	21,78
	FEVEREIRO	85,51	5,08	10,83	17,09	35,85	21,74
	MARÇO	154,63	12,41	19,34	33,73	61,57	39,99
	ABRIL	69,52	3,90	8,46	15,03	28,17	17,86
	MAIO	49,81	2,41	5,88	10,78	19,70	13,45
	JUNHO	12,92	1,07	1,39	2,95	4,99	3,59
	JULHO	8,90	0,80	1,23	1,58	3,87	2,22
	NOVEMBRO	16,01	0,11	2,09	3,31	6,42	4,19
1998	DEZEMBRO	55,52	0,11	7,24	10,80	23,88	13,60
	JANEIRO	129,24	3,27	15,81	26,28	53,01	34,14
	FEVEREIRO	108,06	4,40	13,76	24,64	41,38	28,28
	MARÇO	92,11	2,27	11,68	17,09	40,00	23,34
	ABRIL	91,94	3,99	12,12	17,38	39,74	22,70
	MAIO	1,54	0,39	0,17	0,44	0,42	0,51
	JUNHO	2,38	0,03	0,34	0,44	1,18	0,42
	JULHO	1,87	0,01	0,08	0,77	0,40	0,62
1999	NOVEMBRO	6,23	0,06	0,70	1,36	2,49	1,68
	DEZEMBRO	76,20	0,02	9,10	14,70	33,22	19,18
	JANEIRO	179,35	11,33	22,59	35,66	75,12	45,98
	FEVEREIRO	62,69	2,83	8,26	11,98	26,93	15,52
	MARÇO	214,98	17,47	27,39	42,18	91,43	53,98
	ABRIL	73,57	5,72	9,39	13,94	31,96	18,28
	MAIO	80,76	9,84	10,19	15,42	34,73	20,42
	JUNHO	1,30	1,12	0,17	0,23	0,59	0,31
2000	JULHO	0,95	0,31	0,11	0,24	0,32	0,28
	NOVEMBRO	21,11	0,00	2,61	4,22	8,87	5,41
	DEZEMBRO	69,06	0,00	8,69	14,02	28,68	17,67
	JANEIRO	112,37	1,76	14,08	21,16	48,82	28,31
	FEVEREIRO	159,86	3,40	20,60	30,42	69,66	39,18
	MARÇO	82,44	2,60	10,60	15,92	35,01	20,91
	ABRIL	148,82	10,70	18,85	30,32	61,22	38,43
	MAIO	25,48	1,56	3,46	4,51	11,39	6,12
JUNHO	7,08	0,80	0,91	1,35	3,04	1,78	
JULHO	2,16	0,16	0,26	0,45	0,87	0,58	
NOVEMBRO	7,88	0,00	0,88	1,63	3,30	2,07	
DEZEMBRO	82,49	0,94	10,33	15,83	35,36	20,97	

Ano	Mês	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s) – Sítio Lapinha	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s) para cada Tipo de Solo			
				Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
2001	JANEIRO	39,53	0,34	4,99	7,64	16,89	10,01
	FEVEREIRO	81,97	1,83	10,58	17,01	33,01	21,37
	MARÇO	156,02	4,12	19,68	33,43	63,52	39,39
	ABRIL	34,79	1,28	4,13	7,32	14,36	8,98
	MAIO	24,20	0,16	3,08	4,62	10,50	6,00
	JUNHO	9,04	0,42	1,18	0,96	5,07	1,83
	JULHO	5,90	0,00	0,62	1,35	2,31	1,62
	NOVEMBRO	10,59	0,00	1,39	1,77	4,81	2,62
	DEZEMBRO	150,44	2,49	19,04	28,45	66,22	36,73
2002	JANEIRO	240,19	28,15	29,07	49,05	100,29	61,78
	FEVEREIRO	63,14	4,30	7,68	10,31	29,27	15,88
	MARÇO	137,24	7,26	17,55	27,24	58,13	34,32
	ABRIL	39,07	3,04	4,77	8,16	16,11	10,03
	MAIO	18,47	0,63	2,26	3,84	7,92	4,45
	JUNHO	1,94	0,14	0,23	0,47	0,76	0,48
	JULHO	41,63	0,66	5,21	8,59	17,08	10,75
	NOVEMBRO	15,47	0,00	2,24	2,57	7,11	3,55
	DEZEMBRO	33,58	0,00	3,26	8,59	11,93	9,80

Tabela A.2 – Resultados da Calibração e Validação

Algoritmo de Cálculo dos Parâmetros	Estação Lapinha	Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Calculada (m <sup>3</sup> /s)
				Função-Objetivo: Módulo
1985	JANEIRO	198,92	7,71	10,02
	FEVEREIRO	250,25	27,09	12,78
	MARÇO	205,18	29,56	10,35
	ABRIL	295,33	46,30	14,89
	MAIO	79,63	20,35	4,01
	JUNHO	34,64	3,96	1,74
	JULHO	9,79	4,58	0,50
	NOVEMBRO	11,42	0,58	0,58
	DEZEMBRO	164,85	4,60	8,31
1987	JANEIRO	61,61	1,42	3,10
	FEVEREIRO	119,55	2,68	6,01
	MARÇO	192,56	6,19	9,73
	ABRIL	77,80	13,28	3,92
	MAIO	28,64	1,98	1,45
	JUNHO	26,45	0,78	1,33
	JULHO	8,28	0,56	0,42
1988	JANEIRO	117,57	1,52	5,92
	FEVEREIRO	130,32	6,59	6,59
	MARÇO	127,08	5,13	6,37
	ABRIL	197,18	14,80	9,96
	MAIO	15,48	2,37	0,78
	JUNHO	5,32	1,83	0,27
	JULHO	1,14	2,39	0,06
	NOVEMBRO	26,17	0,58	1,34
	DEZEMBRO	105,35	2,74	5,31
1989	JANEIRO	168,69	5,30	8,50
	FEVEREIRO	47,54	2,02	2,40
	MARÇO	194,69	8,59	9,84
	ABRIL	227,52	21,13	11,46
	MAIO	70,76	15,05	3,59
	JUNHO	7,77	1,94	0,39
	JULHO	7,21	3,00	0,36
	NOVEMBRO	20,09	0,95	1,01
	DEZEMBRO	152,47	3,54	7,69
1990	JANEIRO	42,95	1,40	2,17
	FEVEREIRO	72,58	1,25	3,65
	MARÇO	100,41	3,81	5,06
	ABRIL	140,99	7,11	7,09

	MAIO	74,35	6,13	3,74
	JUNHO	4,78	1,26	0,24
	JULHO	3,67	0,71	0,18
1991	JANEIRO	79,25	1,09	3,99
	FEVEREIRO	112,72	3,56	5,69
	MARÇO	197,46	11,49	9,96
	ABRIL	120,46	7,43	6,07
	MAIO	38,34	2,04	1,93
	JUNHO	7,22	1,54	0,36
	JULHO	0,14	0,99	0,01
1993	FEVEREIRO	102,21	0,62	5,15
	MARÇO	99,76	2,68	5,02
	ABRIL	69,19	1,79	3,49
	MAIO	22,86	0,64	1,15
1997	JANEIRO	85,01	1,42	4,29
	FEVEREIRO	85,51	5,08	4,31
	MARÇO	154,63	12,41	7,78
	ABRIL	69,52	3,90	3,50
	MAIO	49,81	2,41	2,52
	JUNHO	12,92	1,07	0,66
	JULHO	8,90	0,80	0,45
1999	JANEIRO	179,35	11,33	9,05
	FEVEREIRO	62,69	2,83	3,15
	MARÇO	214,98	17,47	10,83
	ABRIL	73,57	5,72	3,71
	MAIO	80,76	9,84	4,08
	JUNHO	1,30	1,12	0,07
2000	JANEIRO	112,37	1,76	5,68
	FEVEREIRO	159,86	3,40	8,05
	MARÇO	82,44	2,60	4,15
	ABRIL	148,82	10,70	7,50
	MAIO	25,48	1,56	1,28
	JUNHO	7,08	0,80	0,36
	DEZEMBRO	82,49	0,94	4,17
2001	FEVEREIRO	81,97	1,83	4,12
	MARÇO	156,02	4,12	7,84
	ABRIL	34,79	1,28	1,76
	DEZEMBRO	150,44	2,49	7,58
2002	JANEIRO	240,19	28,15	12,13
	FEVEREIRO	63,14	4,30	3,21
	MARÇO	137,24	7,26	6,91
	ABRIL	39,07	3,04	1,97
	MAIO	18,47	0,63	0,93
	JULHO	41,63	0,66	2,10

Tabela A.3 – Resultados da Calibração e Validação Modelo com Época

	Ano Chuvoso			
	Ano Normal			
	Ano Seco			
Algoritmo de Cálculo dos Parâmetros	Estação Lapinha	Raiz Quadrada da Chuva Calculada (m <sup>3</sup> /s)	Raiz Quadrada da Vazão Observada (m <sup>3</sup> /s)	Raiz Quadrada da Vazão Calculada (m <sup>3</sup> /s)
Modelo com a Variável Época				
1985	JANEIRO	14,10	2,78	3,28
	FEVEREIRO	15,82	5,20	5,13
	MARÇO	14,32	5,44	3,72
	ABRIL	17,19	6,80	4,62
	MAIO	8,92	4,51	1,87
	JUNHO	5,89	1,99	1,22
	JULHO	3,13	2,14	1,11
	NOVEMBRO	3,38	0,76	1,01
	DEZEMBRO	12,84	2,14	2,89
1987	JANEIRO	7,85	1,19	1,57
	FEVEREIRO	10,93	1,64	2,04
	MARÇO	13,88	2,49	3,70
	ABRIL	8,82	3,64	1,97
	MAIO	5,35	1,41	1,21
	JUNHO	5,14	0,88	1,15
	JULHO	2,88	0,75	1,02
	NOVEMBRO	10,84	1,23	2,29
1988	FEVEREIRO	11,42	2,57	3,04
	MARÇO	11,27	2,26	2,02
	ABRIL	14,04	3,85	3,77
	MAIO	3,93	1,54	1,05
	JUNHO	2,31	1,35	0,90
	JULHO	1,07	1,55	0,86
	NOVEMBRO	5,12	0,76	1,58
	DEZEMBRO	10,26	1,66	2,29
	1989	JANEIRO	12,99	2,30
FEVEREIRO		6,89	1,42	1,60
MARÇO		13,95	2,93	4,05
ABRIL		15,08	4,60	3,75
MAIO		8,41	3,88	2,31
JUNHO		2,79	1,39	0,95
JULHO		2,69	1,73	0,98
NOVEMBRO		4,48	0,97	1,07
DEZEMBRO		12,35	1,88	2,78
1990	JANEIRO	6,55	1,18	1,60
	FEVEREIRO	8,52	1,12	1,68
	MARÇO	10,02	1,95	2,16
	ABRIL	11,87	2,67	2,65

	MAIO	8,62	2,48	1,57
	JUNHO	2,19	1,12	0,96
	JULHO	1,92	0,84	0,86
1991	JANEIRO	8,90	1,04	1,82
	FEVEREIRO	10,62	1,89	2,45
	MARÇO	14,05	3,39	3,50
	ABRIL	10,98	2,73	2,41
	MAIO	6,19	1,43	1,37
	JUNHO	2,69	1,24	0,93
	JULHO	0,37	0,99	0,84
1993	FEVEREIRO	10,11	0,79	2,21
	MARÇO	9,99	1,64	1,96
	ABRIL	8,32	1,34	1,91
	MAIO	4,78	0,80	1,09
1997	JANEIRO	9,22	1,19	1,98
	FEVEREIRO	9,25	2,25	2,03
	MARÇO	12,44	3,52	2,87
	ABRIL	8,34	1,97	1,94
	MAIO	7,06	1,55	1,66
	JUNHO	3,59	1,03	1,11
	JULHO	2,98	0,89	0,89
1999	JANEIRO	13,39	3,37	3,17
	FEVEREIRO	7,92	1,68	1,59
	MARÇO	14,66	4,18	3,58
	ABRIL	8,58	2,39	1,87
	MAIO	8,99	3,14	1,90
	JUNHO	1,14	1,06	0,84
2000	JANEIRO	10,60	1,33	2,38
	FEVEREIRO	12,64	1,84	2,80
	MARÇO	9,08	1,61	1,94
	ABRIL	12,20	3,27	2,81
	MAIO	5,05	1,25	1,04
	JUNHO	2,66	0,89	0,91
	DEZEMBRO	9,08	0,97	1,96
2001	FEVEREIRO	9,05	1,35	1,87
	MARÇO	12,49	2,03	2,80
	ABRIL	5,90	1,13	1,52
	DEZEMBRO	12,27	1,58	2,75
2002	JANEIRO	15,50	5,31	4,51
	FEVEREIRO	7,95	2,07	2,05
	MARÇO	11,71	2,69	2,57
	ABRIL	6,25	1,74	1,52
	MAIO	4,30	0,79	1,08
	JULHO	6,45	0,81	1,37