

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – CAMPUS I**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**ÁREA DE ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS**

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA DO ALTO PARAÍBA COM EFEITO  
DA VARIABILIDADE DO CLIMA**

**OSVALCÉLIO MERCÊS FURTUNATO**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**2004**

---

**OSVALCÉLIO MERCÊS FURTUNATO**

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA DO ALTO PARAÍBA COM EFEITO  
DA VARIABILIDADE DO CLIMA**

**Dissertação apresentada ao curso de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil e  
Ambiental, na área de Engenharia de  
Recursos Hídricos, em cumprimento às  
exigências para obtenção do Grau de  
Mestre.**

---

**Área de Concentração: ENGENHARIA HIDRÁULICA**

**Orientador: EDUARDO ENEAS DE FIGUEIREDO**

**CAMPINA GRANDE – PB**

**AGOSTO – 2004**



F992s Furtunato, Osvalcélío Mercês  
2004 Simulação hidrológica na bacia do Alto Paraíba com efeito da variabilidade do clima / Osvalcélío Mercês Furtunato. – Campina Grande: UFCG, 2004.  
133p.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) /UFCG/CCT/DEC.

Inclui bibliografia.

1. Simulação hidrológica 2. Modelo distribuído 3. Variabilidade do clima I. Título

CDU:556.1:551.583

**OSVALCÉLIO MERCÊS FURTUNATO**

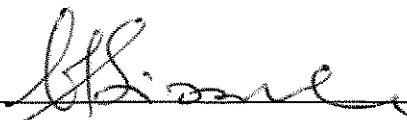
**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA DO ALTO PARAÍBA COM EFEITO  
DA VARIABILIDADE DO CLIMA**

Aprovado em 05 de agosto de 2004.

**COMISSÃO EXAMINADORA**



**Prof. Eduardo Eneas de Figueiredo – Ph.D**  
**Presidente – Orientador (DEC/CCT/UFCG - PB)**



**Prof. Vajapeyam Srirangachar Srinivasan – Ph.D**  
**Examinador interno (DEC/CCT/UFCG - PB)**



**Prof. Tantravahi Venkata Ramana Rao – Ph.D**  
**Examinador interno (DCA/CCT/UFCG - PB)**



**Prof. Dr. João Abner Guimarães Júnior**  
**Examinador externo (DEC/CT/UFRN - RN)**

**Campina Grande, 05 de agosto de 2004**



## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Osvaldo e Eugicélia,  
as minhas irmãs, Osvanja, Ocimara,  
Osvanna e Osvamyle e a minha  
namorada Ana Cristina, **DEDICO**.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por tudo que ele tem me permitido realizar nela.

Aos meus pais, Osvaldo C. Furtunato e Eugicélia M. Furtunato, pelo amor, carinho, dedicação e apoio incondicionais, durante todos os momentos de minha vida.

As minhas irmãs, Osvanja, Ocimara, Osvanna e Osvamyle, pelo companheirismo e compartilhamento de tristezas e alegrias.

À minha namorada, Ana Cristina Brandão da Rocha, pelo amor, carinho e atenção, durante os dois anos de curso.

Ao meu grande amigo, Carlos André Barbosa da Silva, pela paciência, apoio, incentivo, companhia e grande consideração, durante esses mais de cinco anos de convívio.

Ao professor orientador Eduardo Eneas de Figueiredo, pela paciência, disponibilidade e apoio constante durante o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores da Área de Recursos Hídricos: Carlos de Oliveira Galvão, Gledsneli Maria de Lima Lins, Hans Schuster, Janiro Costa Rêgo, Márcia Maria Rios Ribeiro, Rosires Catão Curi e Vajapeyam S. Srinivasan pelos conhecimentos adquiridos e dedicação durante o curso.

Aos colegas de curso, Ana Cristina Souza, Djalena M. de Melo, Elton S. Cruz, Hérbete H. R. C. Davi, Rosinete Batista, Sérgio R. A. Farias e Tatiana Máximo, pelo companheirismo durante o curso.

Aos amigos Aldo S. O. Albuquerque, Hugo Alcântara, Leonardo A. Neves, Kennedy Lucena e Walszon A. Lopes pela amizade e apoio.

As amigas Aracy Siqueira e Myrla Batista pela ajuda em algumas etapas deste trabalho.

Aos funcionários, Alrezinha, Aroldo, D. Alzira, Ismael, Josete, Lindimar, Raulino, Ronaldo, Vera e Valdomiro pela amizade e compreensão durante estes dois anos de convívio.

Ao projeto CT-HIDRO pelo suporte financeiro, através de bolsa de estudo, para a realização desta pesquisa.

Aos examinadores pelas contribuições que deram para a melhoria deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

## RESUMO

Os recursos naturais das zonas semi-áridas, os quais são altamente sensíveis a variação do clima, tendem a ser escassos e são afetados tanto pela ação do homem (uso do solo) quanto pelas alterações nos padrões de evaporação e precipitação, com ocorrência freqüente de secas e conseqüente redução do aporte de água. O estudo da variabilidade de fatores climáticos e do uso do solo, e os possíveis impactos por eles causados sobre os processos hidrológicos no Nordeste semi-árido do Brasil, é de grande importância já que afetam diretamente a formação do escoamento nas bacias hidrográficas da região. Nesta pesquisa, os efeitos da variabilidade da precipitação, evaporação e do uso do solo são estudados, tanto isoladamente quanto em conjunto, sobre o escoamento simulado em várias bacias hidrográficas inseridas na região do Alto Paraíba-PB. O estudo tem por base a aplicação do modelo distribuído NAVMO, o qual foi primeiramente calibrado e validado para toda a região do estudo e, em seguida, utilizado para a simulação de diferentes cenários. Os resultados mostram que o modelo simula razoavelmente o escoamento, sendo afetado, principalmente, pela variabilidade conjunta da precipitação e evaporação. Isoladamente, a precipitação é a variável climática que mais afeta o escoamento, com variação média (volumes e picos em relação aos valores médios) entre 0,012 e 3,59. A evaporação isoladamente afeta pouco o escoamento.

## ABSTRACT

The natural resources of the semi-arid zones, which are highly vulnerable to the variation of climate, tend to be scarce and are easily damaged by human action (land use) and also by the alterations in the evaporation and precipitation standards, with frequent occurrence of droughts and, as a result, reduction of water supply. The study of the variability of climatic factors and land use, and the possible impacts caused by them in the semi-arid region of the Northeast of Brazil, are of great importance since they directly affect the formation and generation of the runoff in the catchments of the region. In this research, the effects of the variability of the precipitation, evaporation and land use on the simulated water discharge of several catchments in the region of Alto Paraiba - PB are studied. The study is based on the application of the distributed model NAVMO, which was first validated for the region of the study and, after that, used for the simulation of different scenarios. The results show that the model simulates the water flow reasonably well, which is affected by the combined effects of precipitation and evaporation. The precipitation, alone, is the most important factor affecting the discharge, with mean variation (volumes and peaks in relation to the mean values) between 0.012 and 3.59. The evaporation has the least effect on the flow.

## ÍNDICE

<i>DEDICATÓRIA</i> .....	<i>i</i>
<i>AGRADECIMENTOS</i> .....	<i>ii</i>
<i>RESUMO</i> .....	<i>iii</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>iv</i>
<i>ÍNDICE</i> .....	<i>v</i>
<i>LISTA DE FIGURAS</i> .....	<i>ix</i>
<i>LISTA DE TABELAS</i> .....	<i>xiv</i>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Organização da Dissertação</b> .....	<b>3</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. O Ciclo Hidrológico</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Modelos Hidrológicos</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2.1. Classificação dos Modelos Hidrológicos</b> .....	<b>7</b>
<b>2.3. Etapas da Utilização de Modelos Hidrológicos</b> .....	<b>8</b>
<b>2.4. Alguns Exemplos de Modelos Hidrológicos</b> .....	<b>11</b>
<b>2.5. Estudos Sobre Impactos de Mudanças Climáticas e Uso do Solo</b> .....	<b>13</b>
<b>2.5.1. Impactos de Mudanças Climáticas</b> .....	<b>13</b>
<b>2.5.2. Impactos do Uso do Solo</b> .....	<b>15</b>
<b>2.5.3. Impactos Conjuntos de Mudanças Climáticas e Uso do Solo</b> .....	<b>18</b>
<b>2.6. Estudos do Efeito de Escala Sobre o Escoamento</b> .....	<b>20</b>
<b>2.7. Comentários Finais</b> .....	<b>24</b>
<b>3. O MODELO NAVMO</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1. Características Gerais do Modelo NAVMO</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2. Lâmina dos Escoamentos nas Sub-Bacias</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3. Equações Para o Cálculo das Lâminas dos Escoamentos</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.1 Lâmina do Escoamento Superficial</b> .....	<b>28</b>
<b>3.3.2 Lâmina do Escoamento Sub-superficial</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3.3 Lâmina do Escoamento Subterráneo</b> .....	<b>31</b>
<b>3.3.4 Escoamento Total</b> .....	<b>32</b>

3.4. Propagação do Escoamento nos Canais.....	32
3.5. Dados Requeridos pelo Modelo NAVMO.....	33
3.6. Pesquisas Recentes Utilizando o Modelo NAVMO.....	33
<b>4. ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS.....</b>	<b>34</b>
4.1. A Bacia do Alto Paraíba.....	34
4.2. Características Climáticas e Fisiográficas da Bacia do Alto Paraíba.....	35
4.2.1. Clima.....	35
4.2.2. Geologia.....	39
4.2.3. Solo.....	39
4.2.4. Relevo.....	40
4.2.5. Vegetação.....	40
4.2.6. Área de Drenagem.....	41
4.3. Base de Dados.....	41
4.3.1. Dados Hidroclimatológicos.....	41
4.3.2. Dados Fisiográficos.....	44
<b>5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NAVMO.....</b>	<b>46</b>
5.1. Calibração.....	46
5.2. Análise e Discussão da Calibração.....	50
5.2.1. Bacia de Taperoá (1923 – 1958).....	51
5.2.2. Bacia de Poço das Pedras (1970 – 1985).....	53
5.2.3. Bacia de Caraúbas (1973 – 1985).....	55
5.2.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras (1922 – 1952).....	58
5.3. Análise da Validade do Modelo.....	60
5.3.1. Bacia de Poço das Pedras.....	62
5.3.2. Bacia de Caraúbas.....	64
5.4. Análise do Efeito de Escala.....	65
<b>6. VARIABILIDADE DO CLIMA E USO DO SOLO.....</b>	<b>69</b>
6.1. Introdução.....	69
6.2. Cenários para as Simulações da Variabilidade do Clima e Uso do Solo.....	70
6.2.1. Cenários para a Simulação da Variabilidade da Precipitação.....	71
6.2.2. Cenários para a Simulação da Variabilidade da Evaporação.....	71

6.2.3. Cenários para as Simulações dos Efeitos dos Fatores de Clima.....	77
6.2.4. Cenários para a Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do Solo.....	78
6.3. Simulação dos Efeitos da Variabilidade da Precipitação.....	79
6.3.1. Bacia de Taperoá.....	79
6.3.2. Bacia de Poço das Pedras.....	82
6.3.3. Bacia de Caraúbas.....	85
6.3.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.....	87
6.4. Simulação dos Efeitos da Variabilidade da Evaporação.....	90
6.4.1. Bacia de Taperoá.....	90
6.4.2. Bacia de Poço das Pedras.....	93
6.4.3. Bacia de Caraúbas.....	96
6.4.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.....	98
6.5. Simulação dos Efeitos da Variabilidade do Clima.....	101
6.5.1. Bacia de Taperoá.....	101
6.5.2. Bacia de Poço das Pedras.....	105
6.5.3. Bacia de Caraúbas.....	107
6.5.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.....	110
6.6. Simulação dos Efeitos da Variabilidade do Clima e Uso do Solo.....	113
6.6.1. Bacia de Taperoá.....	113
6.6.2. Bacia de Poço das Pedras.....	114
6.6.3. Bacia de Caraúbas.....	115
6.6.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.....	116
6.7. Resultados Regionais.....	118
<b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>121</b>
7.1. Conclusões.....	121
7.2. Recomendações.....	124
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>125</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>133</b>
Anexo A – Funções de transformações da Lâminas dos Escoamentos no Modelo NAVMO.....	134

**Anexo B - Arquivo *are* de Entrada no Modelo NAVMO para Simulação  
Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba..... 136**



## *LISTA DE FIGURAS*

Figura 2.1 - Ciclo Hidrológico (Silveira, 1993).....	5
Figura 2.2 - Volumes e Vazões Máximas Simulados (Júnior, 2002).....	18
Figura 2.3 - Razão $Q/Q_n$ para Cenários de Precipitação e Evaporação (Braga, 2001).....	20
Figura 2.4 - Razão $V/V_n$ para Cenários de Uso do Solo e Clima (Braga, 2001).....	20
Figura 2.5 - Variação do Parâmetro CN com a Escala da Bacia Hidrográfica (Simanton et al., 1996).....	22
Figura 2.6 - Variação do Valor de CN com a Escala da Bacia (Júnior, 2002).....	23
Figura 2.7 - Variação do Parâmetro ALFA com a Escala da Bacia com Valores CN Conforme Condição Antecedente (Júnior, 2002).....	23
Figura 2.8 - Variação do Parâmetro EET com a Escala da Bacia com Valores CN Conforme Condição Antecedente (Júnior, 2002).....	23
Figura 3.1 - Fluxograma do Modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989).....	27
Figura 3.2 - Representação do Processo de Precipitação-Vazão-Evaporação no Modelo NAVMO (adaptado de Figueiredo e Braga, 2002).....	28
Figura 4.1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Paraíba no Estado da Paraíba (divisão por bacias hidrográficas).....	35
Figura 4.2 - Precipitação Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.....	36
Figura 4.3 - Temperatura Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.....	37
Figura 4.4 - Evaporação Média Mensal na Região do Alto Paraíba – PB.....	37
Figura 4.5 - Velocidade Média Mensal do Vento na Região do Alto Paraíba – PB.....	38
Figura 4.6 - Umidade Relativa Média Mensal do Ar na Região do Alto Paraíba – PB.....	38
Figura 4.7 - Radiação Global Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.....	39
Figura 4.8 - Tipo de Solo Predominante na Bacia do Alto Paraíba.....	40
Figura 4.9 - Vegetação (Esq.) e Relevo (Dir.) Predominantes na Bacia do Alto Paraíba.....	41
Figura 4.10 - Hidrografia da Bacia do Alto Paraíba-PB.....	42
Figura 4.11 - Bacia do Alto Paraíba – PB (divisão em Sub-bacias).....	44

<b>Figura 4.12 - Características Topográficas da Seção de Poço das Pedras com definição da seção principal utilizada.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 4.13 - Características Topográficas da Seção de Taperoá com definição da seção principal utilizada.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 5.1 - Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Taperoá.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 5.2 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Taperoá em 1925 com parâmetros calibrados pela Vazão Máxima.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 5.3 - Volumes Anuais Observados e Calibrados na Bacia de Taperoá.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 5.4 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Taperoá em 1925 com parâmetros calibrados pelo Volume.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 5.5 - Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Poço das Pedras.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 5.6 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Poço das Pedras em 1975 com Parâmetros Calibrados pela Vazão Máxima.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 5.7 - Volumes Anuais Observados e Calibrados na Bacia de Poço das Pedras.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 5.8 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Poço das Pedras em 1975 com parâmetros calibrados pelo Volume.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 5.9 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Caraúbas.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 5.10 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Caraúbas em 1977 com parâmetros calibrados pela Vazão Máxima.....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 5.11 - Comparação Entre os Volumes Anuais Observados e Calibrados na bacia de Caraúbas.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 5.12 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Caraúbas em 1975 com parâmetros calibrados pelo Volume.....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 5.13 - Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 5.14 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras em 1945, com parâmetros calibrados pela Vazão Máxima.....</b>	<b>59</b>

<b>Figura 5.15 - Volumes Anuais Observados e Calibrados na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 5.16 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras em 1940, com Parâmetros Calibrados pelo Volume.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 5.17 - Comparação de ALFA Estimado e Calibrado pelos Picos.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 5.18 - Comparação de ALFA Estimado e Calibrado pelos Volumes.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 5.19 - Vazões Máximas Anuais Simuladas com parâmetros estimados e Observadas na Bacia de Poço das Pedras.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 5.20 - Volumes Anuais Simuladas com parâmetros estimados e Observados na Bacia de Poço das Pedras.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 5.21 - Hidrogramas Simulado com parâmetros estimados e Observado na bacia de Poço das Pedras em 1975.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 5.22 - Vazões Máximas Anuais Simuladas com parâmetros estimados e Observadas em Caraúbas.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 5.23 - Volumes Anuais Simulados com parâmetros estimados e Observados na Bacia de Caraúbas.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 5.24 - Hidrogramas Observado e Validado na bacia de Caraúbas em 1977 com parâmetros estimados pelo Volume.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 5.25 - Variação de ALFA com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 5.26 - Variação de EET com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 5.27 - Variação de CN com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 6.1 - Esquema Para Avaliação de Impactos de Fatores de Clima e Uso do Solo Sobre Recursos Hídricos (Arnell, 1996, Apud Azevedo, 1999).....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 6.2 - Evapotranspiração Observada e a Calculada pelos Métodos.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 6.3 - Correlação entre Precipitação e Evaporação Potencial.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 6.4 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>81</b>

<b>Figura 6.5 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 6.6 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 6.7 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 6.8 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 6.9 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 6.10 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 6.11 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 6.12 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 6.13 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 6.14 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 6.15 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 6.16 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 6.17 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>97</b>

<b>Figura 6.18 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 6.19 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 6.20 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 6.21 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 6.22 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 6.23 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>107</b>
<b>Figura 6.24 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 6.25 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 6.26 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 6.27 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura 6.28 - Relação Entre <math>V/V_n</math> Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 6.29 - Relação Entre <math>Q/Q_n</math> Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 6.30 - Relação Entre <math>V/V_n</math> Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 6.31 - Relação Entre <math>Q/Q_n</math> Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 6.32 - Relação Entre <math>V/V_n</math> Médio Regional e os Cenários da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 6.33 - Relação Entre <math>Q/Q_n</math> Médio Regional e os Cenários da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>120</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 2.1 – Classificação Sobre a Mudança e Uso do Solo.....</b>	<b>16</b>
<b>Tabela 4.1 – Precipitações Médias Mensais Observadas na Bacia do Alto Paraíba.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 4.2 – Estações Fluviométricas Seleccionadas.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 4.3 – Evaporação Média Diária em (mm) na Estação de Ouro Velho.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 4.4 – Postos Pluviométricos Seleccionados.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 4.5 – Estações Fluviométricas e suas Sub-bacias correspondentes.....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 5.1 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 5.2 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabela 5.3 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 5.4 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 5.5 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.....</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 5.6 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 5.7 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 5.8 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 5.9 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 5.10 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 5.11 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 5.12 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.....</b>	<b>50</b>
<b>Tabela 5.13 – Valores Médios de ALFA obtidos a partir dos valores de Taperoá e Boqueirão considerando a proporcionalidade entre as áreas e a pluviometria anual.....</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 5.14 – Valores Médios de ALFA conforme a Escala e Pluviometria.....</b>	<b>65</b>
<b>Tabela 5.15 – Valores Médios de EET conforme a Escala e Pluviometria.....</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 5.16 – Valores Médios de CN conforme a Escala e Pluviometria.....</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 6.1 – Altura de Rugosidade para Diferentes Condições de Superfície.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabela 6.2 – Evapotranspiração Observada e a Calculada pelos Diferentes Métodos.....</b>	<b>75</b>
<b>Tabela 6.3 – Coeficiente de Determinação entre a Evapotranspiração Observada e a Calculada pelas Diferentes Metodologias.....</b>	<b>76</b>

<b>Tabela 6.4 – Evapotranspiração (mm/dia) Calculadas a partir de Variações na Temperatura.....</b>	<b>77</b>
<b>Tabela 6.5 – Mudanças Percentuais para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 6.6 - Valores CN calibrados considerando Picos e Volumes e a pluviometria.....</b>	<b>79</b>
<b>Tabela 6.7 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>80</b>
<b>Tabela 6.8 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 6.9 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 6.10 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>83</b>
<b>Tabela 6.11 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>85</b>
<b>Tabela 6.12 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>86</b>
<b>Tabela 6.13 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 6.14 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Precipitação.....</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 6.15 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>92</b>
<b>Tabela 6.16 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>93</b>
<b>Tabela 6.17 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 6.18 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 6.19 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>97</b>

<b>Tabela 6.20 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>98</b>
<b>Tabela 6.21 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 6.22 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade da Evaporação.....</b>	<b>101</b>
<b>Tabela 6.23 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>102</b>
<b>Tabela 6.24 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 6.25 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>105</b>
<b>Tabela 6.26 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>106</b>
<b>Tabela 6.27 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>108</b>
<b>Tabela 6.28 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>108</b>
<b>Tabela 6.29 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>110</b>
<b>Tabela 6.30 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabela 6.31 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).....</b>	<b>113</b>
<b>Tabela 6.32 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).....</b>	<b>114</b>
<b>Tabela 6.33 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).....</b>	<b>114</b>
<b>Tabela 6.34 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).....</b>	<b>115</b>
<b>Tabela 6.35 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).....</b>	<b>115</b>



<b>Tabela 6.36 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).....</b>	<b>116</b>
<b>Tabela 6.37 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).....</b>	<b>117</b>
<b>Tabela 6.38 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).....</b>	<b>117</b>

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

A interferência do homem sobre o meio ambiente pode ser percebida através das variações dos processos do ciclo hidrológico, podendo provocar em algumas regiões, a escassez de água. As interferências podem provocar alterações na circulação da água no sistema terra – atmosfera. “As modificações naturais e artificiais na cobertura vegetal das bacias hidrográficas influenciam o seu comportamento hidrológico. Essas alterações produzem os mais variados impactos sobre o meio ambiente e a disponibilidade dos recursos hídricos” (Tucci e Clarke, 1997).

O Nordeste do Brasil e diversas outras localidades do mundo, encontram-se num grupo de regiões que possuem profundos problemas relativos à água. São regiões conhecidas pela semi-aridez, pela degradação do solo e marcadas pela grande variabilidade de fatores climáticos, com regime pluviométrico geralmente concentrado (3 a 4 meses) e mal distribuído no espaço. Essas características da distribuição espacial e temporal das chuvas são típicas das regiões semi-áridas do planeta.

Os recursos naturais das zonas semi-áridas, como solos, vegetação e vida animal tendem a ser escassos e são facilmente prejudicados pelas modificações nos padrões das precipitações e pela ação humana (Ribot et al., 1996). São regiões altamente vulneráveis às variabilidades climáticas e à degradação do solo. Ressalta-se portanto, a importância de estudos que avaliem os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo que auxiliem na previsão e manejo dos recursos de água e solo, voltados para a minimização das consequências causadas. Mudanças climáticas de longo prazo, referentes às tendências seculares (Williams e Balling, 1996), também afetam regiões vulneráveis.

Na região semi-árida do Cariri paraibano, particularmente no alto rio Paraíba-PB, as secas são frequentes e a remoção da cobertura vegetal reduz a proteção natural e a oportunidade para a infiltração da água no solo, aumentando os picos do escoamento, a salinidade, a erosão e o grau de degradação. Além do mais, a construção indiscriminada de açudes de pequeno e médio porte, reduz o aporte de água para mananciais maiores que

atendem a várias demandas (Figueiredo e Srinivasan, 1999). Quantitativamente, os impactos causados por esses fatores são ainda pouco estudados.

Para uma avaliação quantitativa, é comum o uso de modelos hidrológicos. No entanto, muitos são limitados para uma avaliação adequada dos impactos causados pelo uso do solo e pelas variações de fatores do clima sobre o escoamento, por não considerarem esses aspectos na sua estrutura. Os modelos distribuídos, embora complexos, são uma alternativa. O modelo NAVMO é distribuído, considera as heterogeneidades da bacia e do clima e já foi testado e validado para algumas bacias da Paraíba como a do Alto Piranhas (~15000 km<sup>2</sup>) por exemplo (Braga, 2001) e na bacia Representativa e Experimental de Sumé (Lacerda Júnior, 2002), as quais estão inseridas na bacia do Alto Paraíba (~14000 km<sup>2</sup>) localizada numa das regiões mais secas do Brasil.

O presente trabalho teve como objetivos principais: **a)** A simulação hidrológica dos efeitos da variabilidade dos fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento utilizando o modelo distribuído NAVMO na Bacia do Alto Paraíba; **b)** O estudo dos efeitos de escala sobre os parâmetros do modelo dando continuidade aos trabalhos desenvolvidos na Bacia Representativa e Experimental de Sumé (Lacerda Júnior, 2002).

Para a avaliação dos efeitos da variabilidade climática e uso do solo, os fatores climáticos serão estudados e correlacionados seguindo a abordagem de Braga e Figueiredo (2000) de modo a se estabelecer os níveis de temperatura, evapotranspiração e precipitação que serão introduzidos no modelo e os resultados comparados com os valores médios provenientes do processo de calibragem dos parâmetros do modelo. A calibragem deverá ser conduzida de maneira a comparar volumes e vazões máximas, além da distribuição temporal dos hidrogramas diários. A calibração será feita por tentativa e erro de modo a evitar valores absurdos dos parâmetros numa calibragem automática e para que se tenha um ganho de experiência com o modelo.

Em termos do uso do solo, a remoção da cobertura vegetal será estabelecida, quando possível, com base em dados reais, mas, principalmente em termos percentuais, os quais serão introduzidos no modelo através de valores de parâmetros relacionados aos processos de infiltração e escoamento e os efeitos analisados em relação aos valores médios estabelecidos na fase de calibragem do modelo. O efeito conjunto desses fatores (clima e uso do solo) também será investigado, através de uma combinação dos fatores relevantes, também seguindo a mesma abordagem de Braga (2001).

Em virtude de a bacia apresentar algumas séries de dados em diferentes escalas, uma análise dos efeitos da escala sobre os parâmetros e processos será conduzida.

### 1.1. Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em 7 capítulos.

No **capítulo 2** é apresentada uma revisão de literatura acerca dos assuntos abordados nesta pesquisa. No **capítulo 3** é feita uma descrição do modelo NAVMO. No **capítulo 4** é feita uma descrição da área de estudo, a bacia do Alto Paraíba, bem como os dados disponíveis que serviram de base para o desenvolvimento do presente trabalho. No **capítulo 5** são apresentados e discutidos os resultados da calibração e validação do modelo, bem como aqueles da avaliação do efeito de escala sobre os seus parâmetros. No **capítulo 6**, são apresentados os resultados e discussões dos efeitos individuais de fatores do clima, do uso do solo e em conjunto (fatores climáticos e uso do solo) sobre o escoamento simulado. Finalmente, no **capítulo 7** são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como, algumas sugestões para estudos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1. O Ciclo Hidrológico

“O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera. O movimento é impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre” (Silveira, 1993). O ciclo hidrológico (Figura 2.1) é a razão de estudo da Hidrologia e o início da compreensão dos fenômenos ligados à água que ocorrem na Terra assim como seus resultados.

O ar, o solo e água fazem parte do meio ambiente como um todo, são vitais para a vida humana e são interligados por processos interativos com efeitos, sobre qualquer um deles, que se propagam pelos outros, sendo alguns desconhecidos e outros inquantificáveis (Singh, 1995). A interferência nestes elementos é sentida diretamente no ciclo hidrológico. E qualquer mudança que possa interferir no ciclo hidrológico deve ser estudada, pois afeta a circulação da água no sistema atmosfera - terra.

No sistema atmosférico a circulação da água está associada a fatores como: temperatura, pressão atmosférica, ventos, umidade relativa do ar, bem como ao comportamento do próprio sistema atmosférico que é um fator responsável pela distribuição da água.

O ciclo hidrológico pode ser entendido como um sistema, sendo um sistema um conjunto de partes conectadas de um todo (Chow et al., 1988), que são os processos hidrológicos (precipitação, interceptação, evaporação, transpiração, infiltração e escoamento). Estes processos são impulsionados principalmente pela gravidade e energia solar.

No sentido Terra - Atmosfera ocorre a evaporação da água dos rios, lagos, oceanos e a transpiração das plantas. O processo conjunto da evaporação e transpiração é denominado de evapotranspiração.

No sentido Atmosfera - Terra ocorre a precipitação, que corresponde à entrada da água no sistema terrestre. No sistema terrestre, parte da água precipitada não atinge o solo devido a interceptação pela cobertura vegetal; parte da precipitação que atinge a superfície penetra no interior do solo através do processo de infiltração.

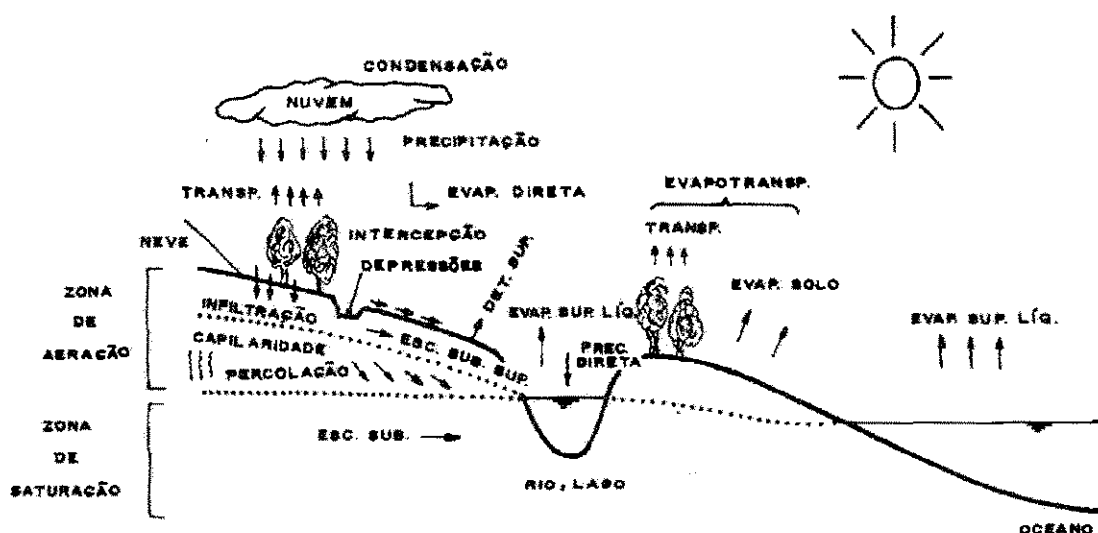


Figura 2.1 - Ciclo Hidrológico (Silveira, 1993)

Quando a chuva excede a capacidade de infiltração do solo, o excesso de água na superfície irá formar o escoamento superficial. Parte da água que infiltra contribui para o escoamento sub-superficial, que ocorre na zona não saturada do solo, e parte percola atravessando a zona não saturada até atingir o lençol freático originando o escoamento subterrâneo, podendo este ressurgir na superfície e atingir o leito dos rios.

O escoamento superficial é o resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica. Geralmente é modelado propagando-se o excesso de precipitação, definido como sendo a diferença entre a intensidade de precipitação e a capacidade de infiltração do solo, onde é conhecido como fluxo Hortoniano, o que ocorre normalmente em regiões áridas e semi-áridas (Lopes, 2003).

Em regiões úmidas, o principal mecanismo de geração de escoamento ocorre devido à elevação do lençol subterrâneo. Diferencia-se do fluxo Hortoniano pelo fato que neste mecanismo, a saturação do solo ocorre das camadas inferiores para a superfície e no fluxo Hortoniano ocorre de modo inverso (Chow et al., 1988).

Os processos hidrológicos apresentam propriedades e características que variam com as escalas espaço - temporais, em consequência da grande heterogeneidade observada tanto no sistema quanto nos processos estudados. Assim, o ciclo hidrológico deve ser analisado de acordo com as características do sistema, sempre considerando a dinâmica de seus processos, que são altamente não-lineares (Mediondo e Tucci, 1997).

Segundo Toebs e Ouryvaev (1970), todos estudos em bacias hidrográficas devem ser planejados para obter uma melhor compreensão das relações físicas e matemáticas entre os diversos componentes do ciclo hidrológico, objetivando uma melhor previsão e quantificação destes elementos.

## **2.2. Modelos Hidrológicos**

A hidrologia trata dos fenômenos naturais complexos do ciclo hidrológico, tais como precipitação, evaporação, infiltração, interceptação, escoamento superficial e subterrâneo. Como esses processos dependem de um grande número de fatores (variabilidade climática, características do solo, vegetação, topografia e usos do solo), sua análise quantitativa e qualitativa se torna muito complicada. Desta forma, torna-se imprescindível à utilização de modelos hidrológicos computacionais. (Abbott et al., 1986a, Abbott et al., 1986b, Tucci, 1998).

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (Tucci, 1998). Através de um modelo pode-se simular e avaliar as mudanças do comportamento da bacia hidrográfica frente às modificações no meio ambiente.

As principais limitações dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, bem como a dificuldade em formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial das variáveis e dos fenômenos.

Todos os modelos hidrológicos representam de forma aproximada os fenômenos reais encontrados na natureza. Portanto, uma variável hidrológica, como precipitação ou vazão, nunca será prevista com total certeza. Além disso, os fenômenos hidrológicos variam em três dimensões e também no tempo, e a consideração simultânea dessas cinco fontes de variação (incertezas, três dimensões, tempo) é bastante complicada. Dessa forma, a maioria dos modelos considera somente uma ou duas dessas fontes de variação (Chow et al., 1988).

### 2.2.1. Classificação dos Modelos Hidrológicos

Os modelos hidrológicos são geralmente classificados em modelos físicos, analógicos e matemáticos. O físico é aquele em que o sistema é representado por um protótipo em escala menor. Os analógicos são aqueles que se valem da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar no sistema mais conveniente, o processo desejado.

Os modelos matemáticos (ou digitais), são aqueles que usam equações matemáticas para representar a natureza do sistema em estudo. Neste tipo de modelo a bacia hidrográfica é substituída por um processo matemático que transforma o dado de entrada (precipitação) em um dado de saída (vazão). Sua desvantagem está na discretização de processos contínuos e na dificuldade em representar matematicamente alguns fenômenos físicos.

Segundo Fleming (1987), citado por Lopes (1994), os modelos matemáticos de simulação hidrológica podem ser basicamente classificados em duas vertentes: modelos determinísticos e modelos estocásticos.

Os modelos matemáticos determinísticos ainda podem ser:

a) **Empíricos ou “Caixa-preta”**: utilizam funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos para ajustar os valores calculados aos dados observados. Existem também os empíricos hidrológicos, os quais utilizam uma função linear que associa a vazão à precipitação;



**b) Conceituais:** fazem uso de funções que consideram os processos físicos envolvidos. Este tipo de modelo tem por base o princípio da conservação da massa aplicado a reservatório para representar o sistema da bacia hidrográfica;

**c) Concentrados:** utilizam parâmetros médios sobre toda a bacia, não levando em conta a variabilidade espacial dos processos hidrológicos;

**d) Distribuídos:** consideram as variabilidades espaciais dos processos, o que os torna capaz de representar melhor as heterogeneidades da bacia hidrográfica;

**e) Distribuído de base física:** utilizam equações diferenciais parciais da conservação da massa, energia e movimento para representar de maneira distribuída os processos hidrológicos.

Os modelos Estocásticos (Estatísticos) são aqueles em que as variáveis dos processos hidrológicos são obtidas de forma aleatória através do uso de conceitos probabilísticos.

### 2.3. Etapas da Utilização de Modelos Hidrológicos

A utilização de um modelo possui geralmente três etapas: estimativa ou ajuste dos parâmetros do modelo, verificação ou validação e previsão das variáveis do modelo.

A calibração dos parâmetros é a fase da simulação onde os parâmetros devem ser determinados segundo um ajuste para que os dados de saída do modelo (dados simulados) sejam iguais aos dados observados das variáveis as quais estão sendo simuladas. Para alguns autores (Diniz, 1994; Sorooshian e Gupta, 1995) existem dois tipos principais de calibração: um manual e outro automático. A calibração manual pode utilizar o processo de tentativa e erro, aquele que o modelador manipula os parâmetros até encontrar as melhores respostas, obtendo-se uma grande sensibilidade sobre o sistema; entretanto, este tipo de calibração, para um modelador inexperiente, pode ser um trabalho exaustivo. Na calibração

automática, perde-se um pouco desta sensibilidade, mas se ganha na rapidez da obtenção dos resultados já que ela é realizada por funções ou algoritmos pré-definidos que agilizam a busca das repostas.

Tucci (1998) apresenta classificações mais detalhadas de tipos de calibração e as coloca como métodos tradicionais de determinação de parâmetros. São elas:

- Medida direta: envolve a obtenção dos valores diretamente em campo, mapas, etc;
- Amostragem: quando o valor é uma amostra representativa e é aplicada sobre todo o sistema;
- Ajuste por tentativa e erro: de posse das variáveis de entrada e saída (como vazão), buscando-se um melhor ajuste dos hidrogramas, a partir dos parâmetros;
- Ajuste por otimização: quando se busca o melhor grupo de parâmetros através de funções objetivos que, por métodos matemáticos, automaticamente busca a menor diferença entre os dados observados e simulados.

Tucci (1998) ainda afirma que os modelos hidrológicos com estrutura conceitual/física buscaram introduzir a estimativa dos parâmetros com base em dados de campo, dispensando a existência de registros históricos. De acordo com Silva e Ewen (2000) um dos problemas associados a este tipo de abordagem é o problema da escala, já que em sua maior parte as medições são feitas em escala pontual e são expandidas para a área de estudo, resultando em perda de precisão na descrição dos processos.

A verificação ou validação do modelo consiste na simulação, utilizando os parâmetros ajustados, das variáveis utilizando por exemplo outra série de dados observados. Existem diferentes métodos de validação, tais como a divisão de dados, uso de duas ou mais bacias, etc. (Klemeš, 1986; Ewen e Parkin, 1996; Figueiredo, 1999; Braga, 2001).

Ewen e Parkin (1996) fazem uma discussão sobre alguns métodos existentes, dando ênfase àqueles propostos por Klêmes (1986), dentre os quais estão:

- Teste da divisão da amostra: baseia-se na divisão da amostra disponível em duas partes: uma para a calibração e outra para validação;
- Teste de divisão da amostra diferenciada: nele os dados são divididos de acordo com a razão de alguma variável envolvida, para se fazer a validação em condição oposta aquela da calibração. Por exemplo, com a variável precipitação, pode-se calibrar para um período seco e validar-se para um chuvoso (úmido);
- Teste da bacia homogênea ou vizinha: são usados dados de duas bacias. Calibra-se com os dados de uma bacia e faz-se a validação com os da outra;
- Teste da bacia homogênea ou vizinha diferenciada: este teste é semelhante ao teste de divisão da amostra diferenciada, sendo que são dados de bacias diferentes. Ou seja, calibra-se com o período seco de uma bacia e valida-se com o período úmido de outra.

A previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para a quantificação de suas respostas a diferentes entradas. Os dados de saída são utilizados para verificar se o modelo representa bem o sistema em condições diferentes daquelas utilizadas no ajuste/calibração.

Um modelo só é confiável quando suas suposições, entradas e parâmetros, estimam (Sorooshian e Gupta, 1995) os melhores resultados. O modelo deve ser selecionado de acordo com o tipo de estudo a ser realizado e suas qualificações devem interagir com a necessidade do modelador. O importante é que bons resultados sejam encontrados para a região estudada.

## 2.4. Alguns Exemplos de Modelos Hidrológicos

A partir do surgimento dos computadores e o desenvolvimento de máquinas cada vez mais velozes, foram desenvolvidos inúmeros modelos matemáticos de simulação. Atualmente, existem centenas de modelos hidrológicos, cada um com características peculiares ou bastantes comuns. Dentre eles, podem ser citados:

a) **O modelo SWAT (*Soil Water Assessment Tool*):** desenvolvido pelo Agricultural Research Service e pela Texas A&M University em 1996 objetivando a análise dos impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade química da água (King et al., 1996). Ele é um modelo físico, do tipo distribuído e a bacia hidrográfica pode ser subdividida em sub-bacias de modo a refletir a diferença de tipo de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo, sendo possível a subdivisão de centenas a milhares de células, cada célula representando uma sub-bacia. O escoamento superficial é estimado usando a equação de Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service-SCS* (USDA-SCS, 1972). Segundo Oliveira (2001), uma limitação do modelo SWAT é avaliar a alteração na produção de água em função das alterações na cobertura do solo quando a bacia apresentar um alto grau de impermeabilização, ou seja com valores de CN superiores a 80.

b) **O modelo SHE (*Système Hydrologique Européen*):** desenvolvido por um consórcio europeu de institutos de hidrologia (Bathurst, 1986a; Bathurst, 1986b; Bathurst et al., 1995), consiste de um modelo distribuído, de base física, cujas equações físicas são resolvidas através do método de diferenças finitas. A bacia é discretizada através de malhas (horizontal e vertical). Segundo Lopes (2003), devido à sua concepção, o modelo requer um grande número de informações, tornando difícil sua utilização.

c) **O modelo NAVMO (*Niederschlag, Abfluss, Verdunstungs Modell*, Kleeberg et al., 1989):** é um modelo diário, conceitual e distribuído e considera o sistema da bacia através de uma divisão da mesma em sub-bacias de produção e trechos de acompanhamento do fluxo. A precipitação é transformada no escoamento total em cada sub-bacia. A vazão total é a soma dos escoamentos superficial, sub-superficial e

subterrâneo, os quais são controlados por dois sistemas de reservatórios: um superficial e outro sub-superficial. O escoamento subterrâneo é controlado por uma função de transformação do excesso de água proveniente do reservatório sub-superficial. O método CN do Serviço de Conservação do Solo - SCS (McCuen, 1982) é usado para avaliar o armazenamento de água nos reservatórios do sistema, o qual é associado às condições do solo e do seu uso, sendo apropriado, portanto, para uma avaliação das alterações ocorridas na bacia.

No presente trabalho o modelo NAVMO será utilizado, para avaliar os efeitos da variabilidade climática e do uso do solo sobre o escoamento na bacia do Alto Paraíba que é limitada pelo açude Epitácio Pessoa (açude Boqueirão), o qual abastece importantes cidades da região, e onde os processos hidrológicos são complexos e altamente variáveis e ainda não haviam sido avaliados através de um modelo distribuído. Uma avaliação dessa natureza é de fundamental importância para o planejamento, uso, manejo e gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente em regiões e bacias hidrográficas sujeitas à escassez de água como a do açude de Boqueirão.

No Brasil este modelo foi inicialmente utilizado por Figueiredo et al. (1991; 1993). Eles o utilizaram num estudo das prováveis causas da diminuição do volume de armazenamento do açude público de Sumé, o qual capta água da bacia hidrográfica do Rio Sucurú (748,6 km<sup>2</sup>). Eles concluíram que o problema de enchimento do açude não é devido à variação da pluviosidade, e sim devido à presença de armazenamentos a montante do reservatório.

Na literatura encontram-se outras aplicações deste modelo, como o trabalho realizado por Lopes (1994), que calibrou e validou o modelo NAVMO para avaliar o escoamento na bacia do Piancó (4550 km<sup>2</sup>), encontrando bons resultados.

Figueiredo et al. (1999), avaliaram a influência da discretização da bacia no escoamento simulado pelo modelo na mesma região (bacia do rio Piancó), concluindo que a discretização não afeta as características do hidrograma. O modelo também foi utilizado para avaliação dos impactos do uso do solo e da influência dos açudes sobre o escoamento para o açude Sumé (Figueiredo e Srinivasan, 1999).

Braga (2001) estudou os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento através de aplicações do modelo NAVMO à bacia do alto rio Piranhas

concluindo que estes efeitos afetam diretamente a formação do escoamento nas bacias da região.

Figueiredo e Braga (2002) discutiram e apresentaram a calibração e os resultados da validação dos parâmetros mais sensíveis do modelo para aquela bacia. Lacerda Júnior (2002) utilizou este modelo para fazer uma avaliação dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do mesmo com dados de bacias do Cariri paraibano, concluindo que os parâmetros mais sensíveis do modelo sofrem variação quando aumenta o tamanho da bacia.

## **2.5. Estudos Sobre Impactos de Mudanças Climáticas e Uso do Solo**

### **2.5.1. Impactos de Mudanças Climáticas**

No que diz respeito às alterações climáticas resultantes do aquecimento global, ficou reconhecido, desde que este problema começou a ser discutido, que poderiam ocorrer alterações importantes no regime hidrológico, o que acarretaria impactos significativos em vários sectores da economia, da sociedade e do ambiente (Cunha et al., 2002), influenciando diretamente no planejamento, gerenciamento e gestão dos recursos hídricos. Do ponto de vista hidrológico, as variabilidades no clima, resultantes tanto de processos naturais como de atividades humanas, afetam o escoamento gerado nas bacias hidrográficas.

As mudanças de origem natural são aquelas oriundas somente do clima. Fenômenos como o ENSO (El Niño Oscilação Sul) ou La Niña provêm do aquecimento ou resfriamento das águas superficiais do Oceano Pacífico (Hastenrath & Heller, 1997, citado por Gomes Filho et al., 1999), podendo inibir ou favorecer a formação de nuvens sobre a região do Atlântico Equatorial, incluindo o leste da Amazônia e o semi-árido Nordeste (Cruz et al., 1999), e, conseqüentemente, a precipitação.

Já as mudanças climáticas originadas de atividades humanas (antropogênica), podem ter como causa a mudança no uso do solo (Ribot et al., 1996), podendo resultar numa degradação do ambiente, ou a emissão de gases de efeito estufa causando um aumento na temperatura global (Tucci, 1998).

À escala global, os últimos resultados apresentados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), apontam para uma elevação da temperatura média global entre 1,4°C a 5,8°C até 2100, segundo o cenário de emissão de gases considerado. As evidências de mudanças na temperatura média global e mudanças nos padrões geográficos, sazonais e verticais de temperatura atmosférica, sugerem uma influência humana no clima global (IPCC, 1995). O Brasil vem acompanhando esta tendência mundial. Segundo Hulme e Sheard (1999), a temperatura média anual subiu aproximadamente 0,5° C durante os últimos cem anos. O IPCC (1995), também afirma que temperaturas mais altas regem um ciclo hidrológico mais vigoroso, o que se traduz em perspectivas para ocorrência de secas ou cheias severas para alguns lugares. A prevista diminuição da precipitação acompanhada por um aumento da evapotranspiração potencial, relacionada com o aumento da temperatura, tenderá a provocar uma diminuição das disponibilidades de água (Cunha et al., 2002).

Os recursos naturais das zonas semi-áridas tendem a ser escassos e são facilmente prejudicados pelas modificações nos padrões das precipitações e pela ação humana (Ribot et al., 1996, citados por Braga e Figueiredo, 2000). A vulnerabilidade a que está exposta a maior parte do Nordeste brasileiro, em decorrência da instabilidade climática, resulta num quadro de destruição de lavouras, desemprego e fome (Cruz et al., 1999) devido à reduzida produção de água nas bacias hidrográficas.

Modelar mudanças climáticas é muito difícil, envolve simular o comportamento intrínseco complexo de processos oceânicos e atmosféricos, alguns dos quais não são completamente entendidos (Ribot et al., 1996). Na escala global, são muito utilizados os modelos de circulação global (MCGs), que possuem como elemento central um modelo detalhado, tri-dimensional da atmosfera, envolvendo o tempo (Warr and Smith, 1995). Os processos climáticos na escala global são complexos e envolvem um grande número de interações e variáveis, mas já estão sendo reproduzidos com razoável precisão por modelos integrados (Cunha et al., 2002). Segundo Viner e Hulme (1997), para avaliar os impactos das mudanças climáticas, existe uma necessidade clara para representações consistentes de futuras mudanças no clima chamados de “cenários de mudanças climáticas”.

Em zonas semi-áridas estudos envolvendo cenários futuros são relevantes devido à possibilidade de inserir as variabilidades dos fatores climáticos e também as degradações, devidas a ação humana, como formas de obtenção de previsões através destes cenários. É sob a conjuntura de variabilidade climática e uso indevido da terra que o

subdesenvolvimento e a calamidade social são mais comuns de acontecer (Ribot et al., 1996), resultando no flagelo devido à redução da oferta de água.

Muitos estudos vêm sendo realizados no sentido de analisar os efeitos do clima utilizando MCGs (Kite, 1993, Bogardi et al., 1994, Conway et al., 1996, Medeiros, 1994; Tucci e Damiani, 1994) para simular cenários da atmosfera os quais servem como dados de entrada de modelos de simulação do escoamento na escala da bacia, enquanto outros simulam os efeitos das variabilidades alterando simplesmente os níveis de variáveis climáticas como a temperatura, evapotranspiração, precipitação (Kite e Waititu, 1981 e Némec e Schaake, 1982, citados por Kite, 1993 e Vieux et al., 1998; Braga, 2001).

### **2.5.2. Impactos do Uso do Solo**

A variabilidade no uso e ocupação do solo de uma bacia hidrográfica, resultantes principalmente de atividades antrópicas, tais como desmatamento, reflorestamento e urbanização, entre outras, têm impactos consideráveis sobre o comportamento hidrológico da mesma e em particular no que se refere à geração de escoamento superficial.

O desenvolvimento humano, que vem aumentando as áreas para culturas, pastagens e açudes, faz com que a vegetação nativa venha sendo destruída e o solo empobrecido devido às grandes e intensificadas atividades nas terras. O impacto causado pela retirada da cobertura vegetal, devido ao desmatamento, reflete-se nos parâmetros de infiltração da água no solo, e conseqüentemente, no escoamento superficial.

O valor CN do método do SCS (McCuen, 1982), é um parâmetro que está associado ao solo e as condições de uso no cálculo da capacidade de armazenamento de água no solo. Este número, o qual depende das características e do tipo do uso do solo, pode variar dentro de uma escala que vai de 0 (solo com permeabilidade infinita) a 100 (solo totalmente impermeável). Os solos com florestas apresentam alta capacidade de infiltração (Pritchett, 1979) e, conseqüentemente, a quantidade de escoamento superficial produzida é pequena.

O coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) é um parâmetro utilizado no cálculo da velocidade de fluxo que vai afetar o escoamento. Alterações nas condições de cobertura vegetal, causadas principalmente pelo desmatamento, provocam modificações nos valores



do coeficiente de rugosidade de Manning e conseqüentemente no processo de escoamento, (Chow, 1959; Shih e Rahi, 1982).

O homem interfere no meio em que vive buscando as melhores condições para o seu sustento modificando, entretanto, as condições do ambiente em sua volta e criando a necessidade da avaliação da sua própria interferência. Quantificar a influência sobre o escoamento é de interesse geral visto que a mudança no uso do solo é uma constante em nossos dias e, em terras áridas, onde a água é um recurso escasso, o antropismo é presente e aumenta a cada dia, piorando a situação para o armazenamento da água. Com este propósito, existem estudos que consideram as mudanças do uso do solo isoladamente de outros fatores, utilizando dados reais de mudanças no uso do solo, ou ainda utilizando cenários hipotéticos ou arbitrários.

Os efeitos das alterações nas condições naturais de uso do solo sobre o escoamento podem ser percebidos, principalmente, nas vazões médias e mínimas e no comportamento das enchentes. “Estudos experimentais existentes mostram que existe aumento do escoamento médio em pequenas bacias hidrográficas rurais com o aumento do desmatamento” (Tucci e Clarke, 1997). A classificação dos principais tipos de alterações do uso do solo é mostrada na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 - Classificação Sobre a Mudança e Uso do Solo.**

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Desmatamento</li> <li>▪ Reflorestamento</li> <li>▪ Impermeabilização</li> </ul>
O uso da superfície	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Urbanização</li> <li>▪ Reflorestamento para exploração sistemática</li> <li>▪ Desmatamento: extração de madeira, cultura de subsistência; culturas anuais; culturas perenes.</li> </ul>
Método de alteração	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Queimada</li> <li>▪ Manual</li> <li>▪ Equipamentos</li> </ul>

Fonte: Tucci e Clarke (1997).

Para avaliar estes impactos, existem estudos que englobam uma só bacia, mudando suas condições de cobertura vegetal, e estudos em bacias semelhantes, com características similares, mas com coberturas diferentes permitindo a análise da influência sobre o escoamento (McCulloch e Robinson, 1993, Tucci e Clarke, 1997).

Na literatura encontram-se diversos artigos sobre bacias experimentais, que mostram que o desmatamento produz o aumento do escoamento superficial em bacias rurais (Lal, 1983). No entanto, para as bacias de médio e grande porte os efeitos ainda são pouco conhecidos (Tucci e Clarke, 1997).

Lørup et al. (1998), citados por Braga (2001), em região semi-árida, avaliaram efeitos de uso do solo pela combinação de testes estatísticos e por modelagem hidrológica. Buscaram distinguir efeitos de variabilidade climática e efeitos de mudança de uso do solo através de metodologia empregada por Refsgaard et al. (1989) apud Lørup et al. (1998). De posse dos resultados concluíram que a maioria dos efeitos de uso do solo sobre o escoamento está ligada a um aumento na densidade populacional da bacia, comprovando que as alterações do escoamento estão realmente ligadas à mudança no uso do solo já que o crescimento populacional gerou uma intensificação das atividades nas terras, existindo influência discernível do uso do solo independentemente da variabilidade climática.

No Brasil, Figueiredo e Srinivasan (1999) utilizaram o modelo NAVMO para avaliar os impactos causados pelo uso do solo e a influência dos açudes sobre o escoamento na bacia hidrográfica do açude de Sumé. Os diferentes tipos de uso de solo foram reproduzidos através de três tipos de cenários. No primeiro cenário, que representa o ressurgimento da vegetação foi considerada uma redução de 40% no valor CN e nos outros cenários, que representavam o desmatamento acelerado da caatinga, foram considerados um aumento de 40% do valor CN, no cenário 2, e de 80% no cenário 3. De acordo com os resultados obtidos concluíram que houve um aumento médio de 120% em relação ao volume anual e de 80% em relação às vazões máximas anuais.

Lacerda Júnior (2002) utilizou este mesmo modelo para fazer uma avaliação dos efeitos de escala e uso do solo na sua parametrização com dados de bacias do Cariri paraibano, a Bacia Representativa de Sumé com suas sub-bacias e áreas experimentais. Ele concluiu que o parâmetro de evaporação (EET) variou pouco entre as escalas da bacia, sugerindo que não existe efeito significativo, provavelmente devido à estabilidade climática (temperatura) da região. Quanto aos efeitos provocados pelo tipo de uso do solo sobre os parâmetros do modelo NAVMO, ele constatou que o valor médio do parâmetro de

evapotranspiração (EET) é 30% menor nas áreas desmatadas do que nas áreas vegetadas. Este comportamento deve-se à redução da evapotranspiração provocada pela ausência da vegetação. O efeito da precipitação foi também marcante, com os volumes e vazões máximas variando conforme o nível de precipitação e a escala (Figura 2.2).

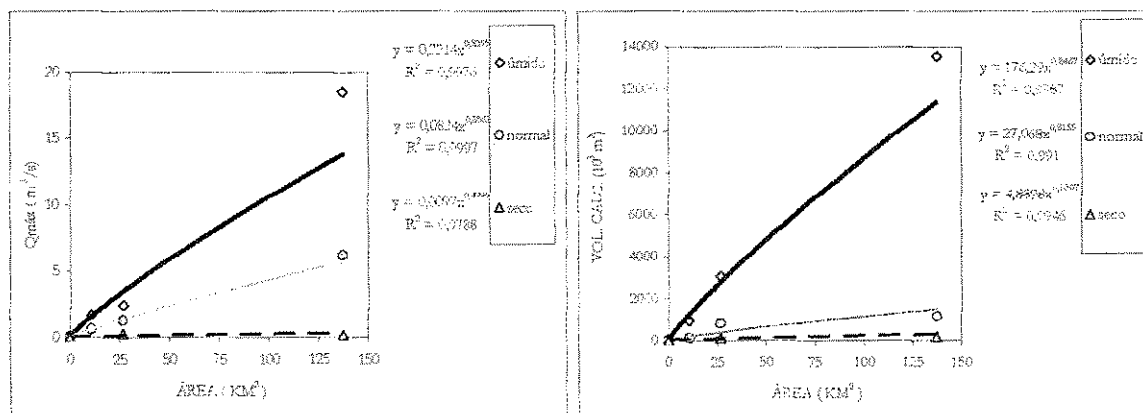


Figura 2.2 - Vazões Máximas e Volumes Simulados (Lacerda Júnior, 2002).

### 2.5.3. Impactos Conjuntos de Mudanças Climáticas e Uso do Solo

Os resultados do estudo realizado por Kite (1993) usando dados de saída de um MCG como entrada de um modelo hidrológico, considerando também as mudanças no uso do solo, associadas com cenários resultantes do efeito estufa, mostram que o escoamento aumenta consideravelmente com o aumento da precipitação e com a redução da evapotranspiração devido à mudança no uso do solo. Kite (1993) percebeu que o uso do solo associado à mudança climática aumentou o número de picos embora não tenha ocorrido grande mudança nos valores máximos. Um estudo que considere as mudanças do uso do solo, associadas às mudanças no clima, é muito relevante uma vez que estes fatores afetam diretamente a formação e produção do escoamento nas bacias hidrográficas. Modelos hidrológicos que considerem essas características são importantes na simulação de mudanças do uso do solo (Figureiredo e Srinivasan., 1999) e cenários climáticos.

Estudos avaliando os efeitos de fatores climáticos e uso do solo em conjunto, foram desenvolvidos por Braga (2001) no Nordeste do Brasil, onde foram avaliados os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo, tanto isolados quanto em conjunto, sobre o escoamento simulado na região do alto rio Piranhas (14.850 km<sup>2</sup>), localizada no semi-árido paraibano, através do modelo hidrológico NAVMO, o qual é distribuído e pode considerar a variabilidade desses fatores. Para tanto, o modelo foi validado para a região e foram estabelecidos cenários para os quais as variações foram introduzidas sendo possível avaliar aqueles fatores mais relevantes ou que mais afetaram o escoamento.

Segundo Braga (2001) a simulação do escoamento considerando a variabilidade de fatores isolados e em conjunto permitiu detectar que o efeito de um fator isolado é sempre menor do que quando combinados (e.g., precipitação e uso do solo). Braga estudou, entre outras situações, o efeito dos fatores abaixo sobre o escoamento expresso pela razão entre a vazão média simulada para um determinado cenário,  $Q$ , e a vazão média natural  $Q_n$  (Figuras 2.3 e 2.4).

- a) variação da precipitação;
- b) variação da temperatura, que afeta o processo de evapotranspiração;
- c) desmatamento e reflorestamento;
- d) variação da temperatura (evaporação) e da precipitação em conjunto;
- e) variação da temperatura (evaporação), da precipitação e do uso do solo em conjunto.

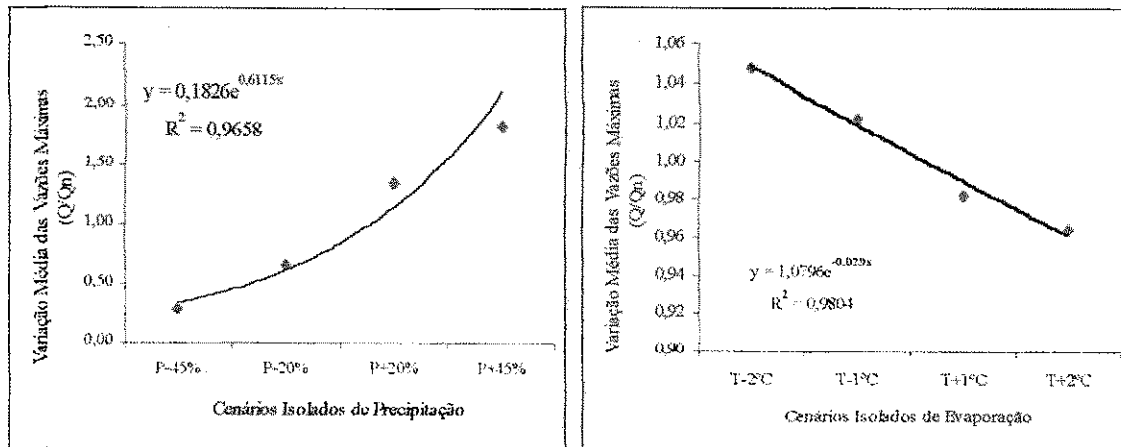


Figura 2.3 - Razão  $Q/Q_n$  para Cenários de Precipitação e Evaporação (Braga, 2001).

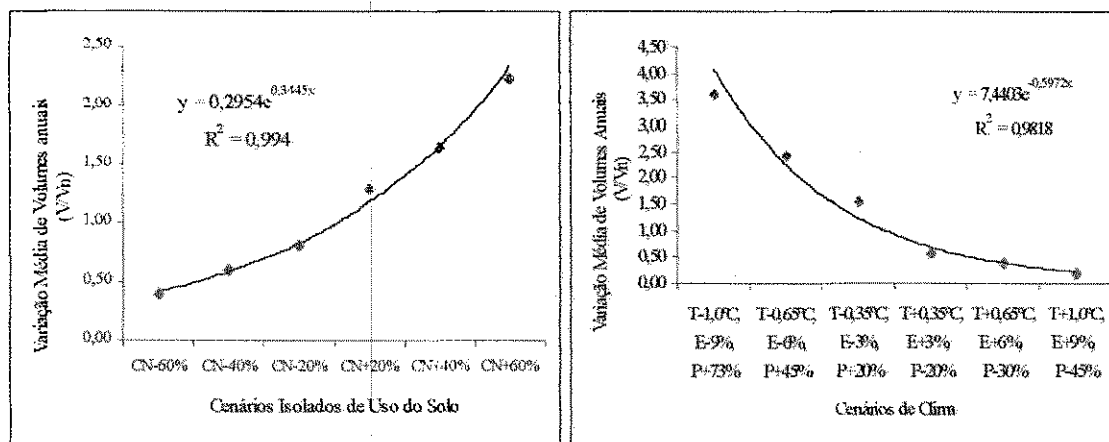


Figura 2.4 - Razão  $V/V_n$  para Cenários de Uso do Solo e Clima (Braga, 2001).

## 2.6. Estudos do Efeito de Escala sobre o Escoamento

A complexa heterogeneidade de solos, vegetação e topografia, cada uma delas com sua própria escala, e suas interações com estímulos meteorológicos que variam no tempo e no espaço produzem efeitos complexos. Em consequência, observa-se que os processos hidrológicos podem apresentar comportamentos distintos de acordo com as escalas espaço-temporais do sistema (bacia) e dos processos analisados (Wood, 1995; Mediondo e Tucci, 1997).

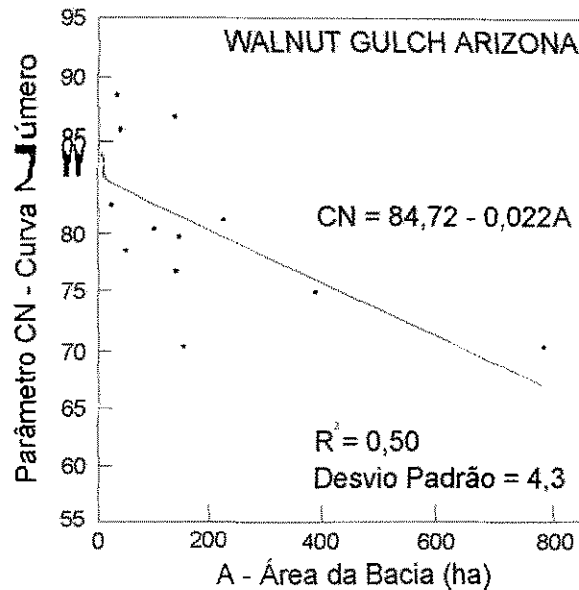
A escala da bacia exerce influência nos valores dos parâmetros devido à heterogeneidade do clima e do solo. Conforme Singh (1995) devido à variabilidade dos fatores climáticos e físicos aumentar com a área, as heterogeneidades são pequenas em escalas menores e grandes em escalas maiores.

Por outro lado, os parâmetros físicos de uma bacia podem ser afetados pela modificação das condições de uso do solo e fatores climáticos (Bathurst et al, 1996; Figueiredo, 1998; Chiew et al, 1995).

Para Mediondo e Tucci (1997), a representação dos processos hidrológicos em diferentes escalas tem esbarrado nos seguintes aspectos principais:

- A heterogeneidade espacial dos sistemas hídricos e a incerteza com a qual os parâmetros e processos são medidos em diferentes escalas;
- A dificuldade de representar os processos caracterizados e analisados na microescala para outras escalas da bacia hidrográfica;
- A falta de relação entre os parâmetros de modelos matemáticos com as diferentes configurações espaciais encontradas na natureza.

Alguns estudos realizados demonstraram que a escala da bacia hidrográfica realmente afeta os parâmetros relativos aos processos hidrológicos. Dentre estes, tem-se o estudo de Simanton et al. (1996), os quais encontraram uma relação entre o parâmetro CN do método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos e a área da bacia, utilizando três diferentes métodos em 18 bacias localizadas no Estado do Arizona (Estados Unidos). Eles concluíram que o parâmetro CN diminuiu com a escala da bacia (Figura 2.5) e atribuíram esse comportamento à variabilidade espacial da precipitação e as perdas por infiltração nos canais arenosos presentes nas grandes bacias hidrográficas.



**Figura 2.5 - Variação do Parâmetro CN com a Escala da Bacia Hidrográfica (Simanton et al., 1996).**

Lacerda Júnior (2002) realizou um estudo do efeito de escala sobre os parâmetros CN e de rugosidade de Manning (Chow, 1959), com base em dados observados na Bacia Representativa de Sumé e da Bacia Experimental de Sumé que é uma sub-bacia da bacia do Alto Paraíba, levando em consideração as condições de umidade antecedente. Os resultados mostraram que esses parâmetros variaram conforme a escala da bacia (e.g., Figura 2.6).

Os resultados de Lacerda Júnior (2002) foram empregados no modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989) para a simulação do escoamento. Os parâmetros do modelo, ALFA do escoamento e EET da evapotranspiração, também variaram conforme a escala (e.g., Figuras 2.7 e 2.8).

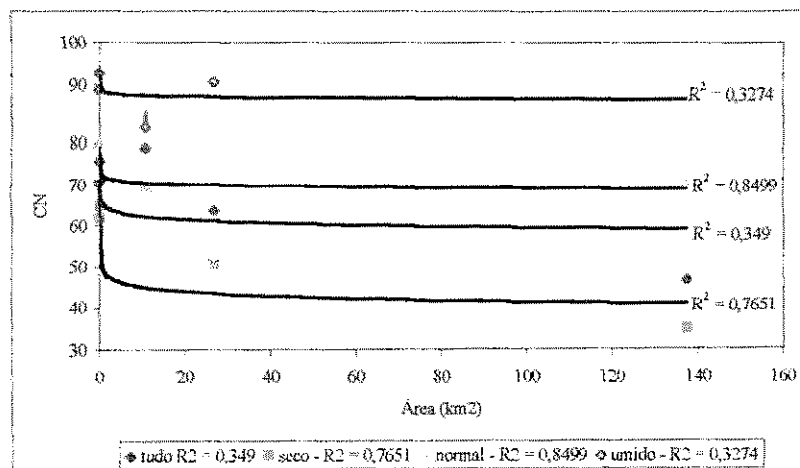


Figura 2.6 - Variação do Valor de CN com a Escala da Bacia (Lacerda Júnior, 2002).

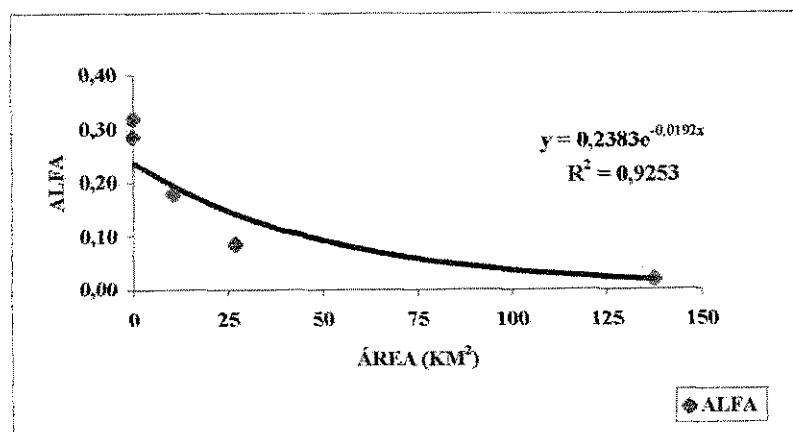


Figura 2.7 - Variação do Parâmetro ALFA com a Escala da Bacia com Valores CN Conforme Condição Antecedente (Lacerda Júnior, 2002).

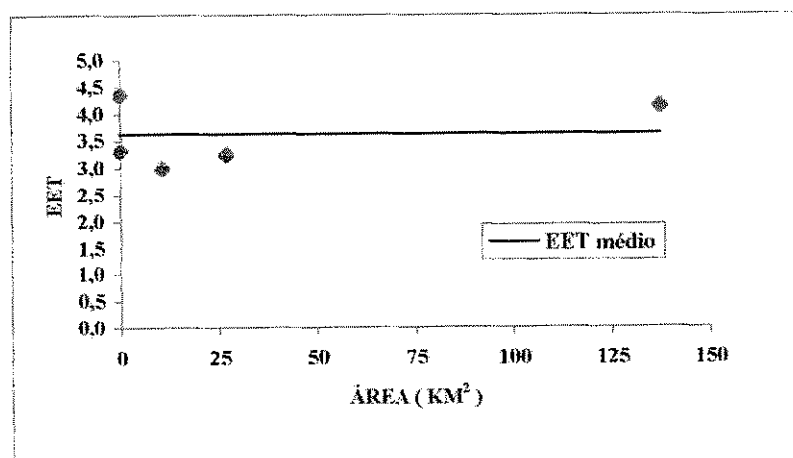


Figura 2.8 - Variação do Parâmetro EET com a Escala da Bacia com Valores CN Conforme Condição Antecedente (Lacerda Júnior, 2002).



## 2.7. Comentários Finais

As variabilidades de fatores climáticos e do uso do solo são características marcantes nas regiões semi-áridas em geral. O estudo dos efeitos que estes fatores podem causar sobre o escoamento e sobre os sistemas de recursos hídricos é de fundamental importância, pois estas regiões sofrem grandes alterações com a degradação da vegetação nativa (caatinga).

A literatura vem mostrando a importância da realização de estudos de avaliação nesse sentido, de modo a se quantificar os impactos tanto do uso do solo quanto do clima sobre o escoamento. No semi-árido do Nordeste do Brasil, ainda são necessários estudos dessa natureza. O número de estudos nesta região é pequeno e muito deles não avalia o efeito conjunto de fatores climáticos e uso do solo sobre o escoamento.

Ainda não havia sido feita uma avaliação dos efeitos da variabilidade climática e do uso do solo sobre o escoamento na bacia do Alto Paraíba que é limitada pelo açude Epitácio Pessoa (açude Boqueirão), o qual abastece importantes cidades da região, e onde os processos hidrológicos são complexos, altamente variáveis e ainda não foram avaliados através de um modelo distribuído. A bacia tem sofrido com as variações do clima, com secas frequentes e redução do aporte de água (Albuquerque e Galvão, 2001). Uma avaliação através de um modelo distribuído que considere fatores climáticos e físicos do solo, já testado na região semi-árida, era necessária. O modelo NAVMO agrega esses requisitos e será utilizado para tal finalidade.

## CAPÍTULO 3

### 3. O MODELO NAVMO

#### 3.1. Características Gerais do Modelo NAVMO

O modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989), “Niederschlag, Abfluss, Verdunstungs Modell” (modelo de precipitação, vazão, evaporação), foi desenvolvido no Instituto de Recursos Hídricos da Universidade de Bundeswehr, Munique, Alemanha, para simular o escoamento.

O NAVMO é um modelo diário, determinístico, conceitual e distribuído, o qual permite que sejam consideradas as variabilidades tanto de fatores climáticos (evaporação e precipitação) quanto do sistema da bacia.

O processo de transformação da precipitação efetiva em escoamento superficial utiliza a equação do balanço hídrico que é aplicada à bacia através de dois reservatórios hipotéticos: um superficial e outro sub-superficial que controlam o escoamento. Para avaliar a capacidade de armazenamento de água nos reservatórios, os quais são dependentes do tipo e das condições de uso do solo, é utilizado o método CN (Curva Número) desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos – SCS (McCuen, 1982). O método é associado ao uso do solo e pode ser mudado para avaliações de cenários (Lopes, 1994).

Este modelo requer uma divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias. O escoamento total gerado em cada sub-bacia é obtido através da soma das vazões do escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo. A Figura 3.1 mostra o fluxograma do modelo NAVMO.

São utilizados como dados de entrada os valores de precipitação, evaporação, vazões observadas e as características físicas das sub-bacias como: área, cotas, declividades, características geométricas dos canais.

O cálculo da precipitação média no modelo NAVMO pode ser feito através da aplicação de duas metodologias, que são versões modificadas do método de Thiessen e do método do Ponto Reticular ou método das quadrículas (Kleeberg et al., 1989).

A propagação do escoamento pode ser feita utilizando diferentes métodos como, por exemplo, o método de Williams (1969), o método de Kalinin-Miljukov (1958), apud Fread (1985), e o método da velocidade de fluxo. O modelo apresenta também critérios alternativos para avaliar a qualidade dos resultados como desvios médios, desvio hidrológico, centróides dos hidrogramas, diferenças entre valores observados e calculados (volumes e picos), além da comparação entre os hidrogramas simulado e observado.

### **3.2. Lâminas dos Escoamentos nas Sub-Bacias**

As lâminas dos escoamentos no modelo NAVMO são determinadas para cada sub-bacia, considerando um sistema de reservatórios, conforme apresentado no esquema físico mostrado na Figura 3.2. Cada reservatório possui a função de controlar os componentes do fluxo total (Lopes, 1994).

O escoamento superficial é calculado a partir do reservatório superficial, que é abastecido pela precipitação e sobre ele age a evaporação potencial. Quando o reservatório superior enche, ocorre o transbordamento. Parte da lâmina do transbordamento do reservatório superficial irá abastecer o reservatório sub-superficial e outra parte será transformada no escoamento direto após aplicação de uma função de transformação.

O escoamento sub-superficial é calculado a partir do reservatório sub-superficial que é alimentado por uma parte do transbordo do reservatório superficial. A evaporação deste reservatório é calculada em função do seu déficit de umidade. Quando esta parcela é suficiente para encher o reservatório sub-superficial faz surgir uma lâmina de transbordamento, a qual se dividirá em duas lâminas. Uma dará origem ao escoamento sub-superficial e a outra será usada no cálculo do escoamento subterrâneo. O escoamento total simulado na saída da sub-bacia é a soma dos três escoamentos. Os hidrogramas em cada caso são obtidos através de funções de transformação e adicionados para que seja obtido o hidrograma total. Nas Figuras 3.1 e 3.2 observam-se as diversas etapas dos processos considerados para o cálculo da vazão total.

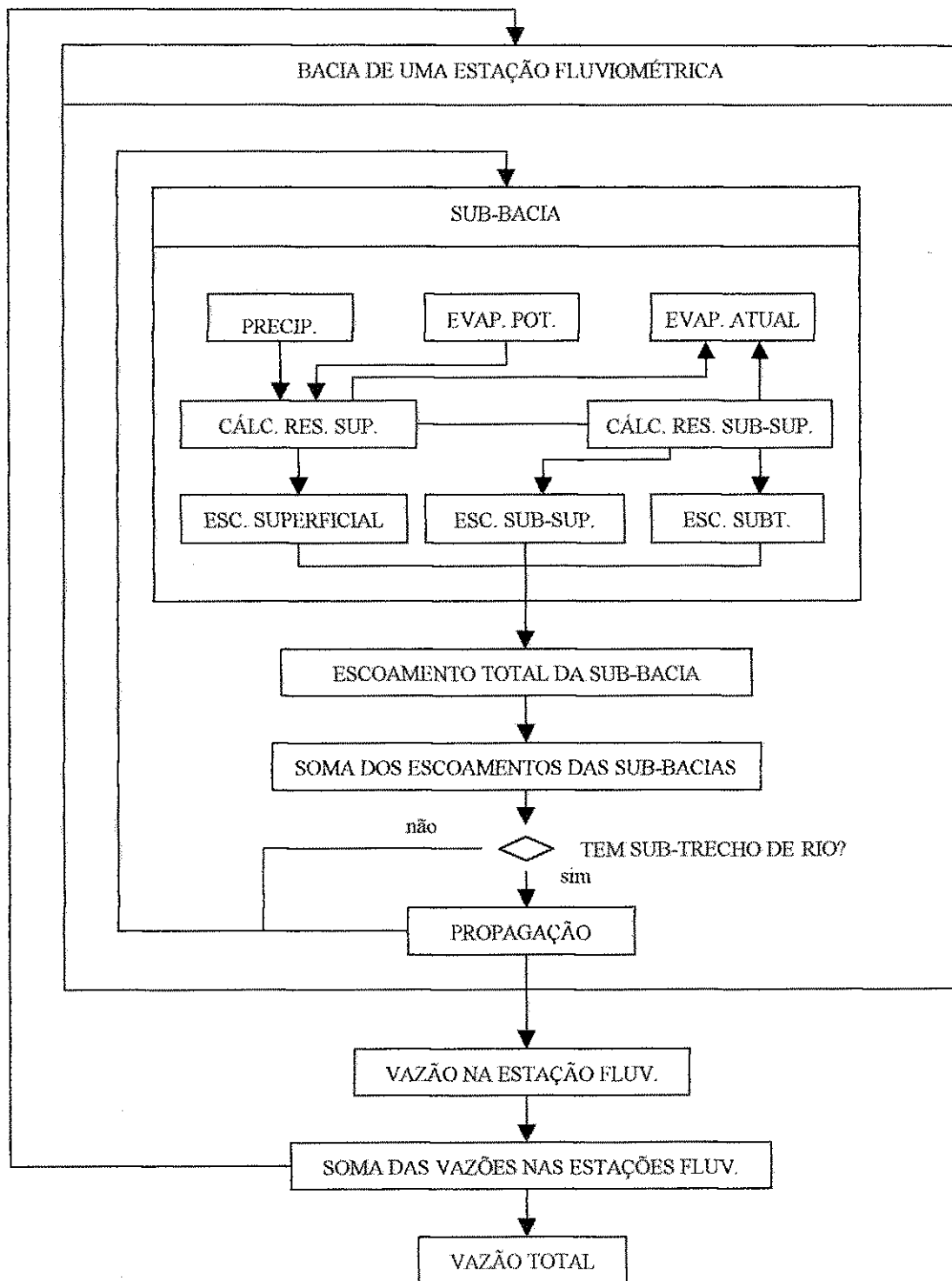


Figura 3.1 - Fluxograma do Modelo NAVMO (Kleeberg et al., 1989)

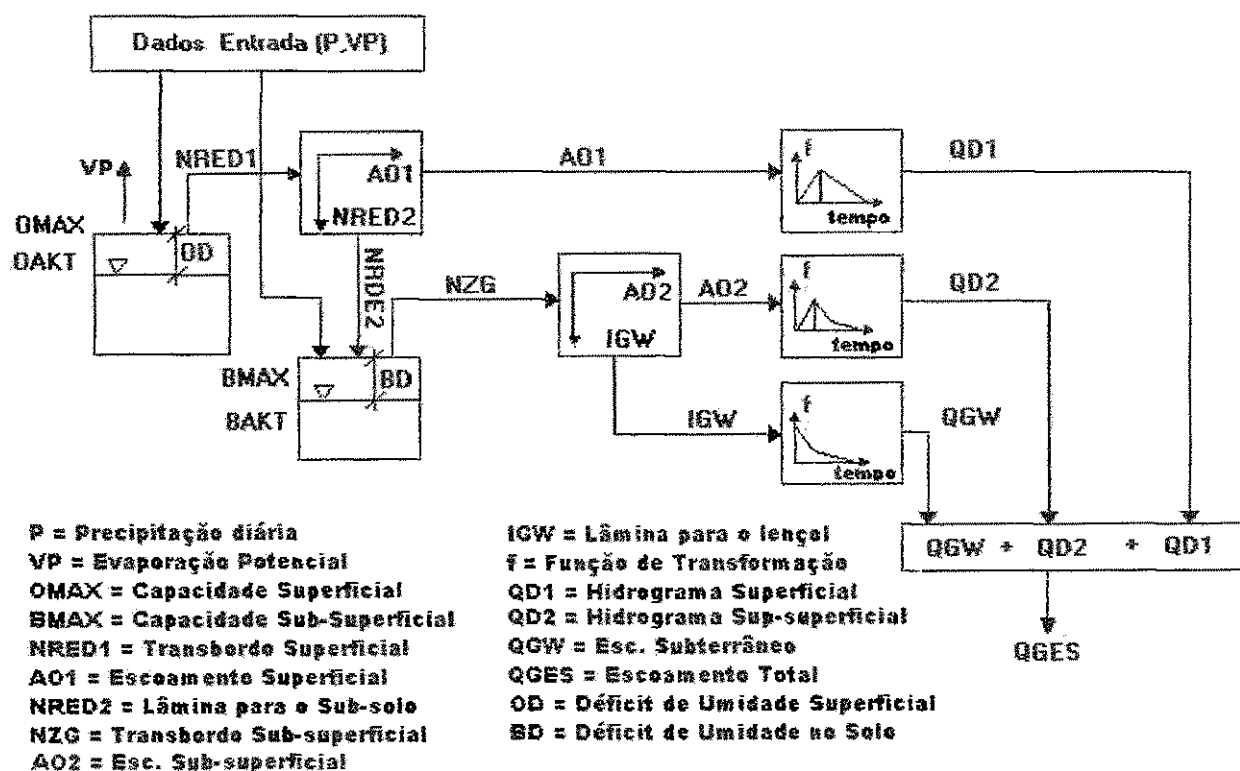


Figura 3.2 - Representação do Processo de Precipitação-Vazão-Evaporação no Modelo NAVMO (adaptado de Figueiredo e Braga, 2002).

As equações para os cálculos das lâminas dos escoamentos serão apresentadas a seguir.

### 3.3. Equações Para o Cálculo das Lâminas dos Escoamentos

#### 3.3.1. Lâmina do Escoamento Superficial

A lâmina [mm/dia] do escoamento superficial direto (AO1) é calculada em termos do transbordamento do reservatório superficial. A parcela que se converte em lâmina do escoamento direto é dada por:

$$AO1 = ALFA \times NRED1(t) \quad (3.1)$$

ALFA [-] é o fator de partição, a ser calibrado, da lâmina do transbordamento do reservatório superficial NRED1 [mm/dia], dado pela equação:

$$NRED1(t) = N(t) - OD(t-1) - VA(t) \quad (3.2)$$

$N(t)$  é a precipitação [mm/dia] média diária calculada pelo método do Ponto Reticular modificado, isto é:

$$N_{I,t} = \frac{\sum_{s=1}^4 N_{n,s,t} / D_s^{RAST}}{\sum_{s=1}^4 1 / D_s^{RAST}} \quad (3.3)$$

com:  $N_{I,t}$  – precipitação calculada para a sub-bacia I no intervalo de tempo t;

$N_{n,s,t}$  – precipitação na estação pluviométrica n, mais próxima do centro da sub-bacia I dentro do quadrante s, no intervalo de tempo t;

RAST – fator de correção dependente da distância do posto.

$OD(t-1)$  é o déficit [mm/dia] de umidade antecedente no reservatório superficial e  $OD(t)$  é o déficit [mm/dia] de umidade atual no reservatório superficial dado pela seguinte equação:

$$OD(t) = OMAX - OAKT \quad (3.4)$$

OMAX é a capacidade máxima do reservatório superficial e OAKT o estado de umidade inicial do mesmo. OMAX é calculado em função da capacidade de armazenamento do solo pela equação:

$$OMAX = 0,1 \times S \times e^{-4 \times GEBGEF} \quad (3.5)$$

GEBGEF é a declividade [-] da superfície e S é a capacidade [mm/dia] de armazenamento do reservatório dado por:

$$S = 25,4 (1000/CN - 10) \quad (3.6)$$

VA (t) é a evaporação [mm/dia], durante o intervalo de tempo t. A evaporação (VA) assume valor potencial até que a superfície esteja completamente seca e o déficit de umidade do reservatório superficial (OD) atinja a capacidade do reservatório superficial (OMAX).

Quando o reservatório superficial atingir o nível mínimo de umidade, ou seja, secar completamente, dá-se então o início da evaporação da água no sub-solo, aumentando seu déficit de umidade (BD). A evaporação atual do sub-solo é calculada multiplicando-se a evaporação potencial (VP) [mm/dia], pelo fator de partição EET a ser calibrado no modelo.

A outra parcela do transbordamento (NRED2) do reservatório superficial vai alimentar o reservatório sub-superficial.

### 3.3.2. Lâmina do Escoamento Sub-superficial

NRED2 é a parcela do transbordamento [mm/dia] do reservatório superficial que supre o reservatório sub-superficial, sendo dado pela equação:

$$NRED2(t) = (1 - ALFA) \times NRED1 \quad (3.7)$$

O transbordamento do reservatório sub-superficial, NZG [mm/dia], é dado por:

$$NZG(t) = NRED2(t) - BD(t-1) \quad (3.8)$$

BD (t-1) é o déficit de umidade antecedente [mm/dia] do reservatório sub-superficial e BD (t) é o déficit de umidade atual [mm/dia] do reservatório sub-superficial dado pela diferença entre a capacidade máxima do reservatório sub-superficial (BMAX) e sua umidade atual (BAKT), isto é:

$$BD (t) = BMAX - BAKT \quad (3.9)$$

BMAX é tomado igual a capacidade de armazenamento do solo S dado pela equação 3.6.

A lâmina [mm/dia] do escoamento sub-superficial é determinada em termos do transbordamento do reservatório sub-superficial (NZG). A parcela desse transbordamento que se converte em lâmina do escoamento sub-superficial (AO2), é então calculada pela equação:

$$AO2(t) = BETA \times NZG (t) \quad (3.10)$$

BETA é o fator de partição [-] do transbordamento do reservatório sub-superficial.

A outra parcela do transbordamento do reservatório sub-superficial vai alimentar o lençol subterrâneo.

### 3.3.3. Lâmina do Escoamento Subterrâneo

A parcela do transbordamento do reservatório sub-superficial que alimenta o lençol subterrâneo, IGW [mm/dia], é calculada pela seguinte equação:

$$IGW (t) = (1-BETA) \times NZG (t) \quad (3.11)$$



### 3.3.4. Escoamento Total

As distribuições no tempo dos escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo, são dadas por funções de transformação das lâminas. O hidrograma superficial (QD1) é obtido através da aplicação de duas funções lineares que transformam a lâmina do escoamento superficial (AO1) em hidrograma, sendo uma para a subida do hidrograma e outra para a recessão. Para o escoamento sub-superficial (QD2), a transformação da lâmina (AO2) em hidrograma é feita através de uma função linear para a subida do hidrograma e por uma função exponencial para a recessão. Detalhes sobre as funções de transformação são apresentados no Anexo A.

O escoamento subterrâneo (QGW) é calculado de uma função não linear. A soma das vazões superficial (QD1), sub-superficial (QD2) e subterrâneo (QGW) fornece o escoamento total diário, QGES [ $m^3/s$ ], isto é:

$$QGES(t) = \frac{QD1(t) + QD2(t) + QGW(t)}{86400} \quad (3.12)$$

### 3.4. Propagação do Escoamento nos Canais

Sendo o modelo distribuído, o hidrograma de uma sub-bacia serve como hidrograma de entrada do trecho de rio da bacia subsequente (Kleeberg et al., 1989). A propagação do escoamento é feita nos trechos de rios cuja seção é considerada trapezoidal. A equação de Manning é utilizada para o cálculo das velocidades de escoamento na calha principal e nos planos de inundação. O modelo NAVMO pode utilizar as metodologias de Williams (1969), Kalinin-Miljukov (Fread, 1985) e velocidade de fluxo para propagar o escoamento. Todos os métodos são hidrológicos e fundamentados no método de Muskingum (Braga, 2001).

Maiores informações sobre o modelo NAVMO e suas equações podem ser encontrados em Kleeberg et al. (1989), Lopes (1994), Braga (2001) e Lacerda Júnior (2002).

### 3.5. Dados Requeridos pelo Modelo NAVMO

O modelo NAVMO requer dados diários de precipitação, evaporação e vazão. Para cada sub-bacia são necessárias as informações de área, declividade média, valor de CN (Curva Número) e coordenadas dos centróides das mesmas. Nas sub-bacias onde ocorre propagação do escoamento o modelo exige ainda a declividade dos trechos de rios, as características das calhas do rio como profundidade e declividades do leito e dos planos laterais (Anexo B), bem como o coeficiente de Manning-Strickler (inverso do coeficiente de rugosidade de Manning) para o leito principal e os planos laterais.

### 3.6. Pesquisas Recentes Utilizando o Modelo NAVMO

No Brasil este modelo foi inicialmente utilizado por Figueiredo et al. (1991; 1993). Eles o utilizaram na simulação do escoamento na bacia de Piancó e em um estudo das prováveis causas da diminuição do volume de armazenamento do açude público de Sumé, o qual capta água da bacia hidrográfica do Rio Sucurú (748,6 km<sup>2</sup>).

Na literatura encontram-se outras aplicações deste modelo, como o trabalho realizado por Lopes (1994), que calibrou e validou o modelo NAVMO para avaliar o escoamento na bacia do Piancó (4550 km<sup>2</sup>), encontrando bons resultados. Figueiredo e Srinivasan (1999), avaliaram os impactos do uso do solo e da presença dos açudes sobre o escoamento superficial a montante do açude público de Sumé. Braga (2001) estudou os efeitos de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento através de aplicações do modelo NAVMO à bacia do alto rio Piranhas concluindo que estes efeitos afetam diretamente a formação do escoamento nas bacias da região. Figueiredo e Braga (2002) discutiram e apresentaram a calibração e os resultados da validação dos parâmetros mais sensíveis do modelo para aquela bacia. Lacerda Júnior (2002) utilizou este modelo para fazer uma avaliação dos efeitos de escala e uso do solo na parametrização do mesmo com dados de bacias do Cariri paraibano, concluindo que os parâmetros mais sensíveis do modelo sofrem variação quando aumenta o tamanho da bacia.

## CAPÍTULO 4

### 4. ÁREA DE ESTUDO E BASE DE DADOS

#### 4.1. A Bacia do Alto Rio Paraíba - PB

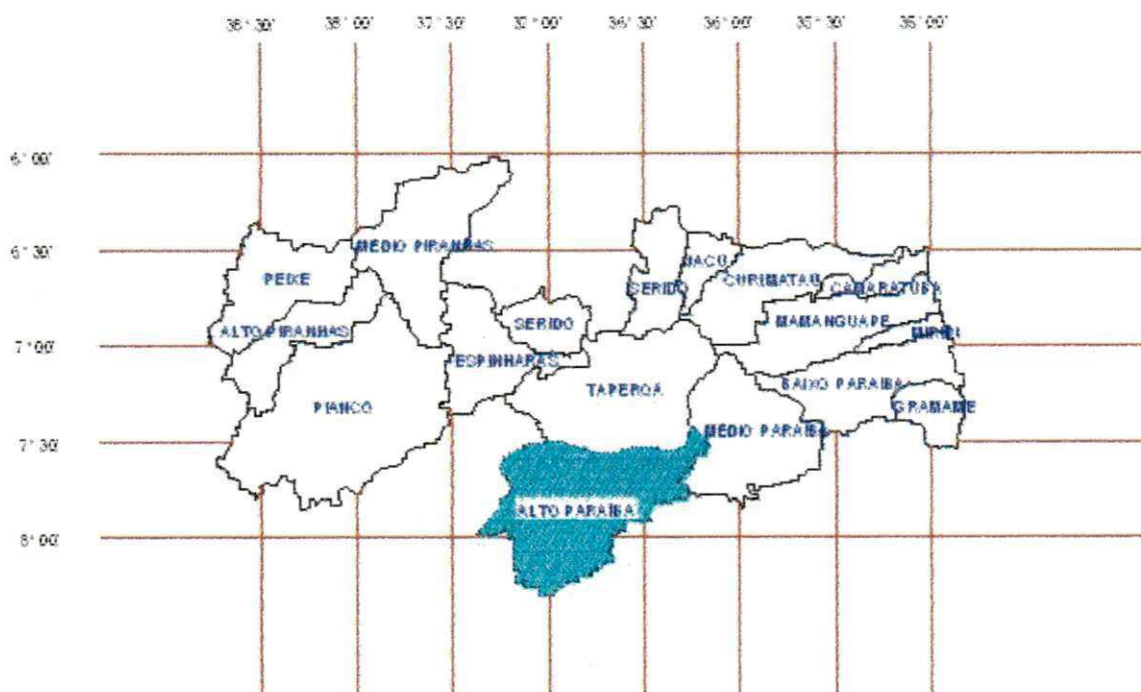
A Bacia do Alto Paraíba (Figura 4.1) situa-se na parte sudoeste do Planalto da Borborema, no Estado da Paraíba, nas latitudes de 7°20'45'' e 8°26'21'' S e entre as longitudes de 36°07'36'' e 37°21'15'' W. Limita-se ao sul e a oeste com o Estado de Pernambuco, e ao norte e a leste com as bacias de Taperoá e do Médio Paraíba (PDRH, Paraíba, 1997).

A Bacia está inserida na microrregião homogênea dos Cariris Velhos contendo total ou parcialmente os municípios: Barra de São Miguel, Boqueirão, Camalaú, Congo, Monteiro, Ouro Velho, Prata, São João do Tigre, São Sebastião do Umbuzeiro e Sumé (PDRH, Paraíba, 1997).

Boqueirão é o município com maior percentual na área da bacia 20,33% (PDRH, Paraíba, 1997). Nele se encontra localizado o açude Público Eptácio Pessoa (Boqueirão), o qual é responsável pelo abastecimento de água de Campina Grande e outras comunidades do chamado Compartimento da Borborema, que vem sofrendo reduções na oferta de água nos últimos anos (Albuquerque e Galvão, 2001).

A seca que atingiu o Nordeste brasileiro entre 1997 e 1999, reduziu o volume armazenado no reservatório a menos de 30% de sua capacidade (estimada em cerca de 450.000.000 m<sup>3</sup>), levando a um sério racionamento de água nas cidades por ele abastecidas e à suspensão da descarga de fundo que regularizava o rio Paraíba a jusante. Em março de 1999, quando o nível atingido indicava que só haveria condições de abastecimento por mais 6 meses, caso continuasse a prática da irrigação às margens do açude, o Ministério Público conseguiu liminar da Justiça Federal, suspendendo a irrigação, (Vieira, 2002).

No entanto, o desenvolvimento da região é bastante afetado pelas variabilidades do clima da região e pelo uso do solo, pois a urbanização e o desmatamento afetam a vazão afluente que chega aos açudes, podendo comprometer a disponibilidade de água e, portanto, tudo que depende diretamente destes mananciais. Com base nestas características, sobressai-se no contexto estadual atraindo a atenção de estudiosos para que sejam fornecidos os melhores subsídios para o gerenciamento dos seus recursos hídricos.



**Figura 4.1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Paraíba no Estado da Paraíba (divisão por bacias hidrográficas).**

## 4.2. Características Climáticas e Fisiográficas da Bacia do Alto Paraíba

### 4.2.1. Clima

A bacia do Alto Paraíba possui clima semi-árido quente, com a estação seca atingindo um período que compreende de 9 a 10 meses (PDRH, Paraíba, 1997).

O regime pluviométrico na bacia do Alto Paraíba apresenta precipitação média anual da ordem de 600mm, mas com grande variabilidade interanual (350 e 800 mm). Os totais anuais se concentram em um período de quatro meses, que geralmente, corresponde aos meses de fevereiro, março, abril e maio (Figura 4.2 e Tabela 4.1). Foram utilizados dados diários disponíveis de 80 postos pluviométricos (ver Tabela 4.4), a partir dos quais foram calculados os totais médios mensais mostrados na Figura 4.2 e apresentados na Tabela 4.1.

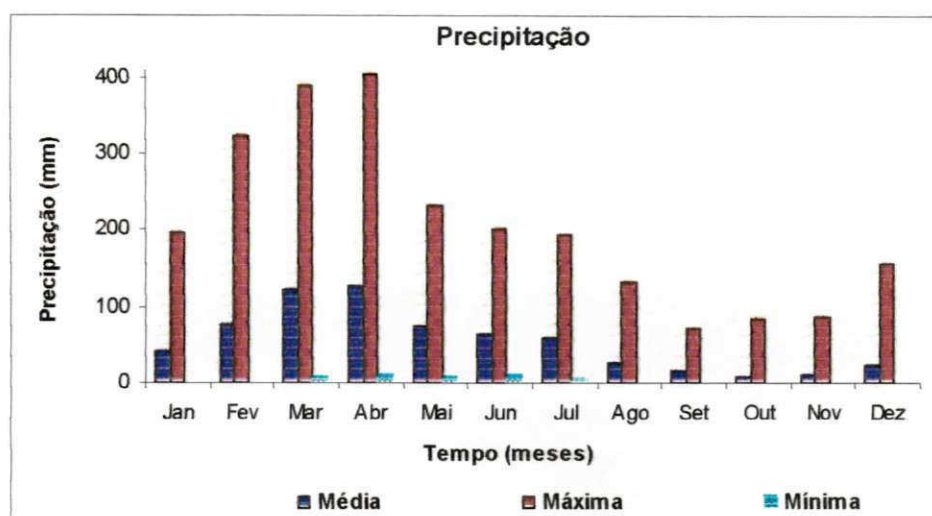


Figura 4.2 - Precipitação Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.

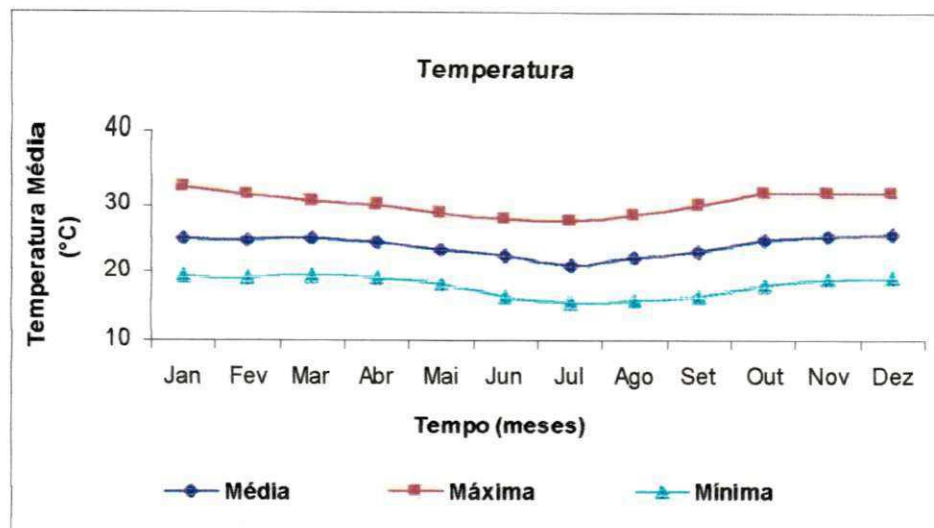
Tabela 4.1 – Precipitações Médias Mensais Observadas na Bacia do Alto Paraíba.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>Máx</b>	195,1	324,4	398,8	405,8	202,1	202,2	193,5	131,4	72,2	85,1	86,9	156,2
<b>Média</b>	41,7	78,5	123,0	126,2	74,2	62,7	57,9	25,9	15,3	8,9	10,6	22,5
<b>Mín</b>	0,2	0,7	5,9	7,7	4,4	6,6	2,4	1,1	0,2	0,0	0,0	0,0

Fonte: Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste (SUDENE, 1990)

As variações de temperatura atingem mínimas mensais de 18 e 22°C entre os meses de julho e agosto, e máximas mensais de 28 e 31°C entre os meses de novembro e dezembro. Na Figura 4.3 são mostrados os valores das temperaturas médias mensais, observados nas estações climatológicas de Monteiro e Ouro Velho, as quais estão localizadas na região do Alto Paraíba e na estação de Campina Grande, a qual foi incluída devido a pouca disponibilidade de dados em escala regional e também com o objetivo de captar melhor a variabilidade dos fatores climáticos na região.

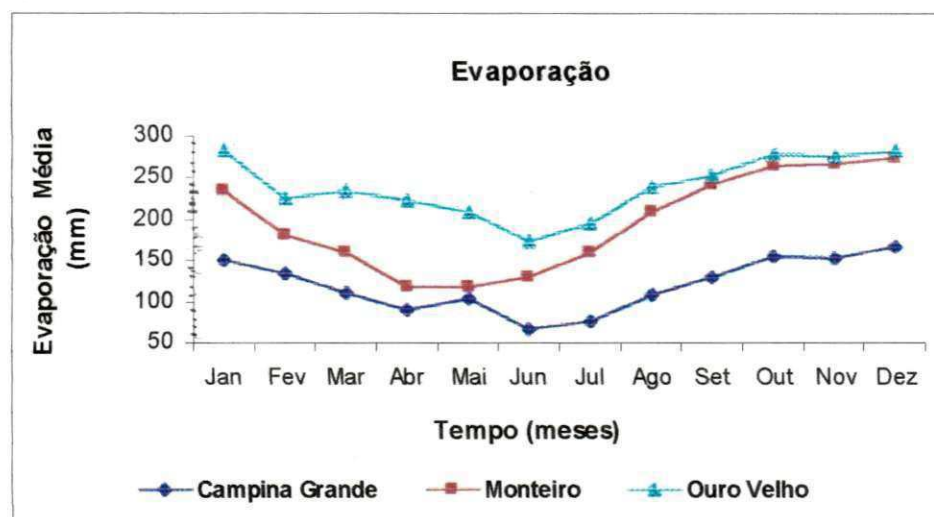




**Figura 4.3 - Temperatura Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.**

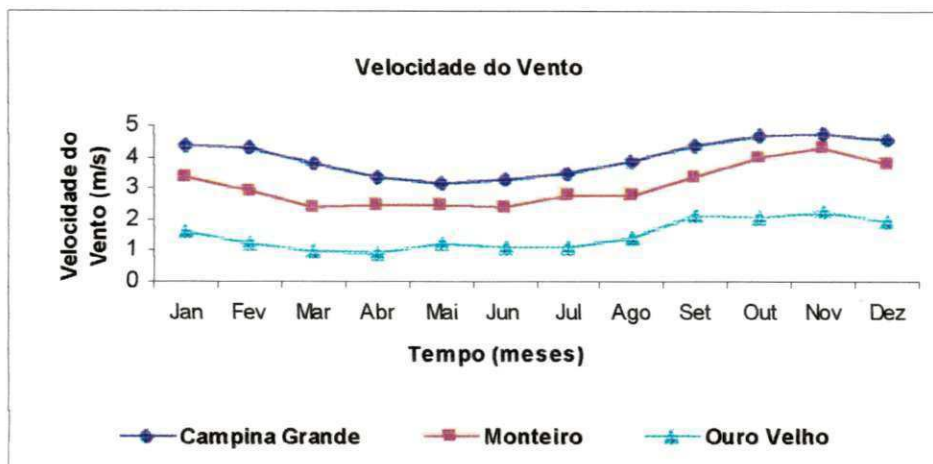
A insolação apresenta variações nos valores médios mensais da seguinte forma: de janeiro a julho a duração efetiva é de 7 a 8 horas diárias, e de agosto a dezembro é de 8 a 9 horas.

Os totais anuais da evaporação, medidos em tanque Classe A, variam entre 2500 a 3000 mm com valores decrescentes de oeste para leste. Na Figura 4.4 são mostrados os valores das evaporações médias mensais, observados nas estações climatológicas de Monteiro, Ouro Velho e Campina Grande.



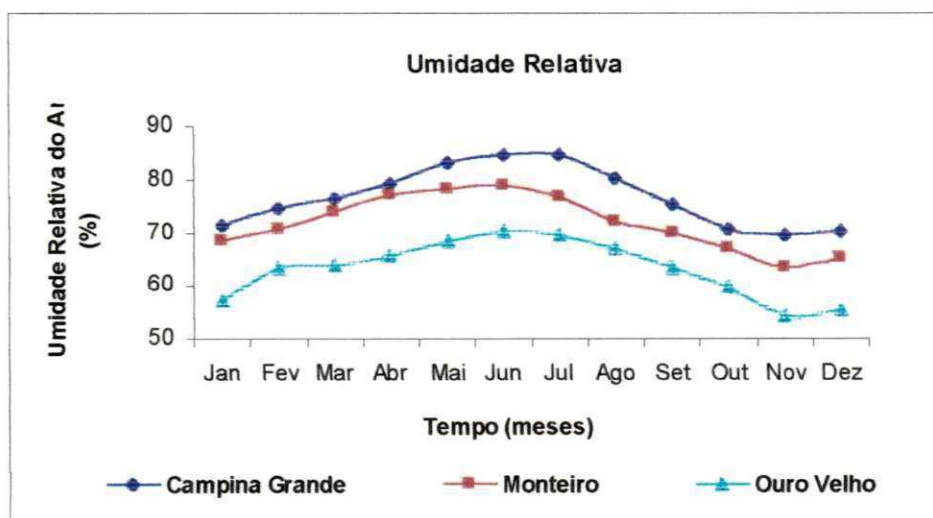
**Figura 4.4 - Evaporação Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.**

Quanto à velocidade do vento na região da bacia, os valores alcançados não variam muito ao longo do ano. Na Figura 4.5 são apresentados os valores da velocidade do vento média mensal observados nas estações climatológicas de Campina Grande, Monteiro e Ouro Velho.



**Figura 4.5 - Velocidade Média Mensal do Vento na Região do Alto Paraíba-PB.**

A umidade relativa do ar alcança uma média mensal de 60 a 75%, observando-se que os valores máximos ocorrem, geralmente, no mês de junho e os mínimos em dezembro. Na Figura 4.6 são apresentados os valores da Umidade relativa do ar média mensal observados nas estações climatológicas de Monteiro, Ouro Velho e Campina Grande.



**Figura 4.6 - Umidade Relativa Média Mensal do Ar na Região do Alto Paraíba-PB.**

Quanto à radiação global (Figura 4.7) observa-se que os valores mínimos mensais ocorrem, geralmente entre os meses de junho e julho, e os máximos entre outubro e novembro.

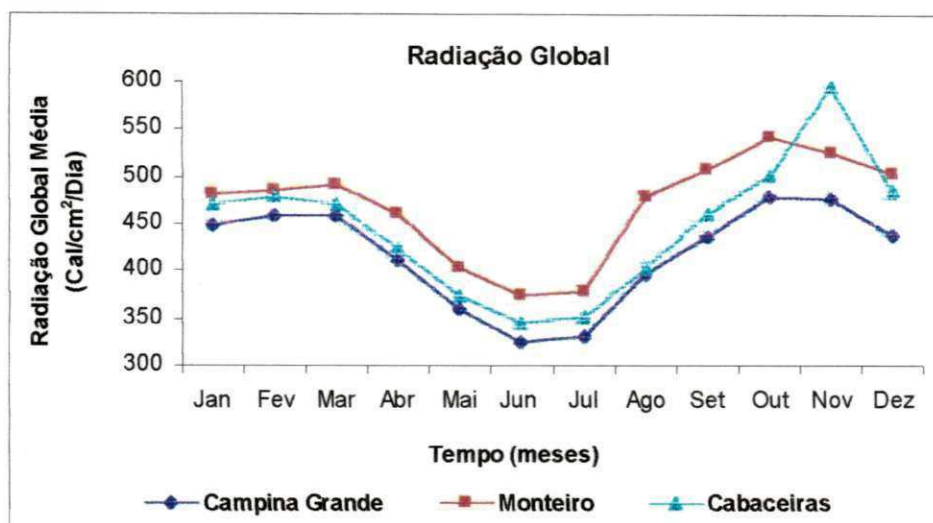


Figura 4.7 - Radiação Global Média Mensal na Região do Alto Paraíba-PB.

## 4.2.2 Geologia

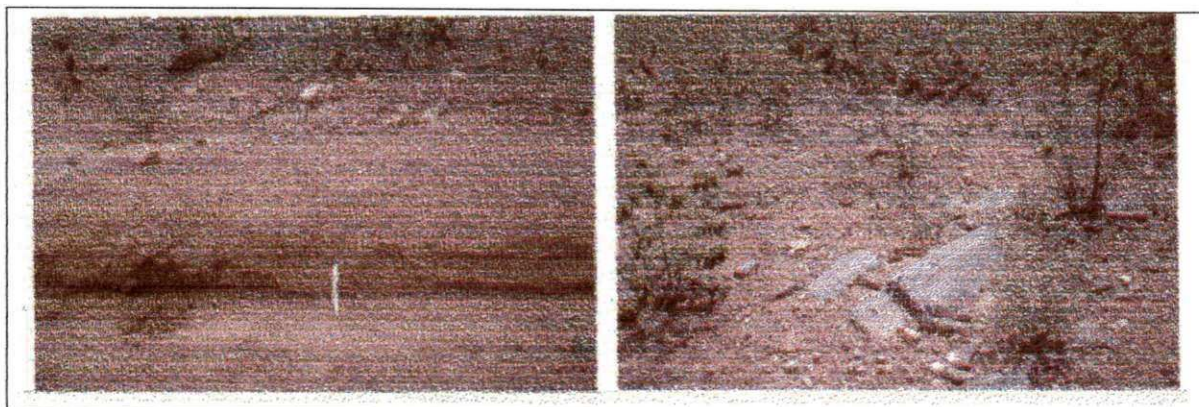
A geologia da área da bacia do Alto Paraíba é constituída de compartimentos geológicos classificados como formações oriundas do proterozóico e do arquezóico, notando-se quartzitos, gnaisses e migmatitos, além de micaxistos e litologia associada ao complexo gnáissico. Há também ocorrência de rochas vulcânicas e plutônicas de idades diversas (PDRH, Paraíba, 1997).

## 4.2.3 Solo

Os solos predominantes na bacia do Alto Paraíba são do tipo Bruno Não-Cálcico, que cobrem todo o cristalino existente na área da bacia (PDRH, Paraíba, 1997). Este tipo



de solo (Figura 4.8), se caracteriza por ser pouco espesso (40 cm), pedregoso e com permeabilidade moderada.



**Figura 4.8 - Tipo de Solo Predominante na Bacia do Alto Paraíba.**

#### **4.2.4. Relevo**

O relevo da bacia do Alto Paraíba que se encontra inserida na escarpa sudoeste do Planalto da Borborema apresenta-se com os níveis mais altos superiores a 600 metros em um relevo ondulado, forte ondulado (Figura 4.9 Dir.) e em algumas áreas também montanhoso (PDRH, Paraíba, 1997).

#### **4.2.5. Vegetação**

A vegetação predominante na região da bacia é a do tipo Caatinga hiperxerófila, floresta caducifólia e subcaducifólia (Figura 4.9 Esq.). Esta vegetação caracteriza-se pela perda das folhas no verão, exceto em áreas onde existe vegetação rasteira constituída por herbáceos espinhosos, arbustos e aglomerados rasteiros.

As espécies dominantes são: Caroá-Catingueira, Coroa de Frade, Faveleiro, Umburana, Umbuzeiro, Juazeiro, Jurema, Macambira, Marmeleiro, Mimosa, Mofumbo, Oiticica, Pinhão Bravo, Velame, e Xiquexique. Nas áreas desmatadas e utilizadas na

agricultura, predomina as culturas de palma forrageira, agave, algodão além de milho e feijão (PDRH, Paraíba, 1997).



**Figura 4.9 - Vegetação (Esq.) e Relevo (Dir.) Predominantes na Bacia do Alto Paraíba.**

#### **4.2.6. Área de Drenagem**

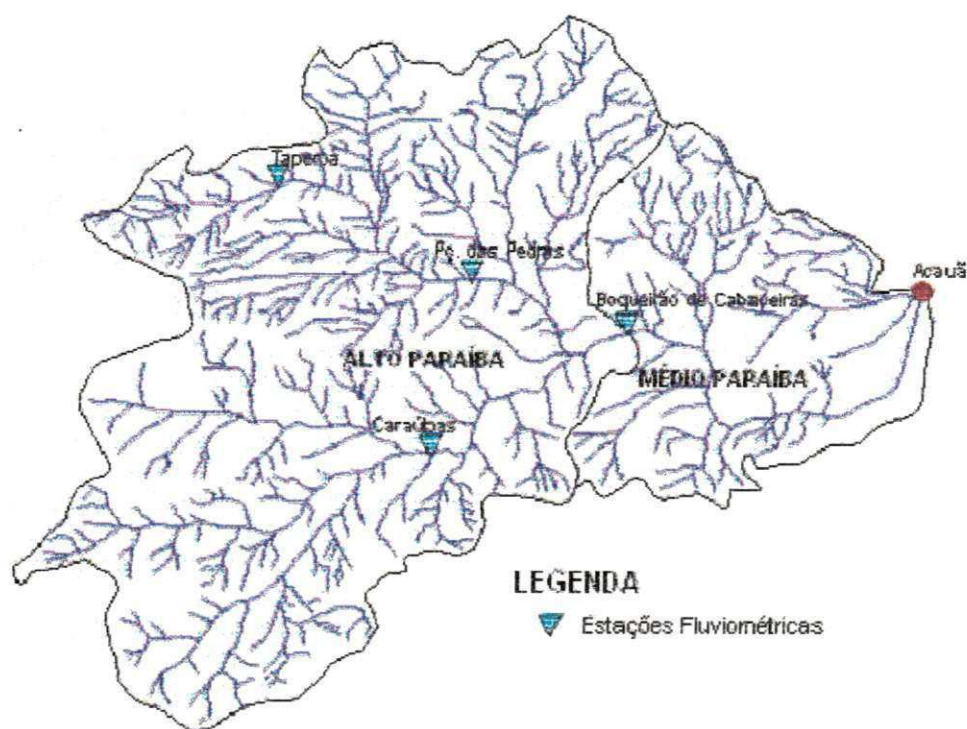
A área da Bacia do Alto Paraíba, limitada pelo açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) é de aproximadamente 12.377 km<sup>2</sup> (Figura 4.10). Tem como rio principal, o rio Paraíba que nasce na confluência dos rios Sucurú e do Meio no município de Sumé.

### **4.3. Base de Dados**

#### **4.3.1. Dados Hidroclimatológicos**

A partir da área delimitada, foram selecionados os postos fluviométricos e pluviométricos, bem como as estações climatológicas, os quais foram operados pela SUDENE (Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste) e processados pelo DNAEE (Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica) através do programa MSDHD.





**Figura 4.10 - Hidrografia da Bacia do Alto Paraíba-PB.**

Os postos fluviométricos (veja localização na Figura 4.10) e seus respectivos períodos são mostrados na Tabela 4.2, num total de quatro (4) postos com dados diários de vazão. Estes postos delimitam as principais sub-bacias da região.

**Tabela 4.2 – Estações Fluviométricas Selecionadas e suas Sub-bacias Correspondentes.**

Código	Nome da Estação	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )
38841500	Taperoá (1923 – 1958)	618
38850000	Poço das Pedras (1970 – 1985)	3260
38830000	Caraúbas (1973 - 1985)	5168
38855300	Boqueirão (1922 – 1952)	12377

Fonte: PDRH-PB (1997)

Os dados de evaporação disponíveis (Tabela 4.3), são os valores médios diários observados na estação de Ouro Velho (SUDENE, 1982). Sendo estes utilizados por já terem sido testados e usados em trabalhos anteriores (e.g. Lacerda Júnior, 2002; Lopes, 2003).

Tabela 4.3 – Evaporação Média Diária em (mm) na Estação de Ouro Velho.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
E (mm)	9,40	8,25	8,21	8,16	7,05	5,92	6,55	7,91	8,56	9,08	9,69	9,41

Fonte: Série Hidrologia nº 14 (SUDENE, 1982).

Os postos pluviométricos foram selecionados buscando uma distribuição homogênea dentro dos 12.377 km<sup>2</sup> da área da bacia. Neste trabalho foram utilizados os dados diários de precipitação de 80 postos (Tabela 4.4), dos quais 60 estão localizados no estado da Paraíba, 19 inseridos em Pernambuco e 01 no Rio Grande do Norte.

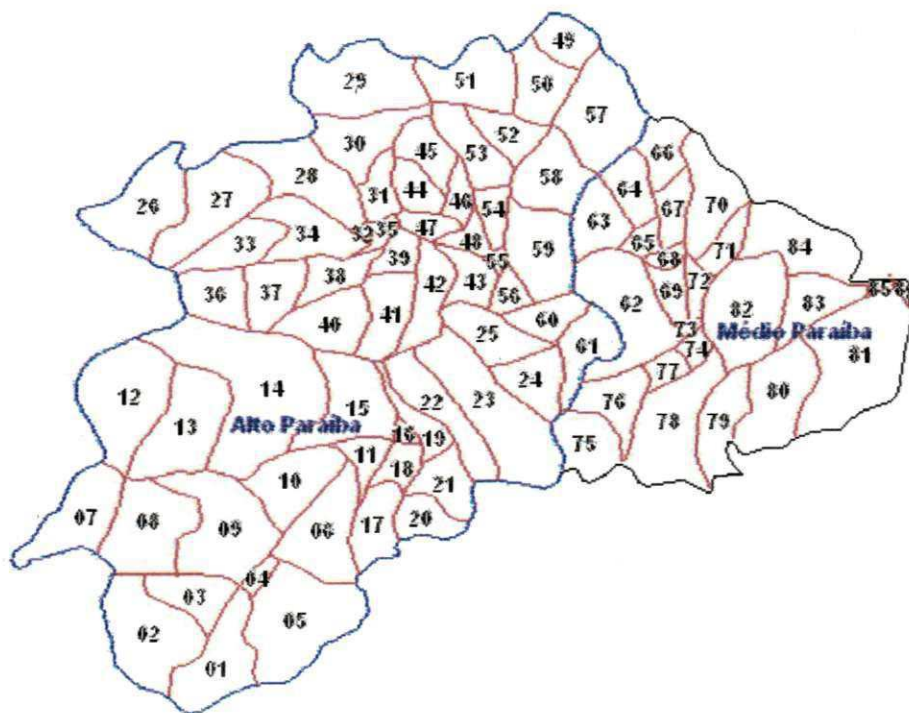
Tabela 4.4 – Postos Pluviométricos Selecionados.

Posto	Código	Nome da Estação	Estado	Posto	Código	Nome da Estação	Estado
1	3848428	Campina Grande	PB	41	3846969	Serra Branca	PB
2	3837028	Picuí	PB	42	3865149	Sertânia	PE
3	3846434	Taperoá	PB	43	3846739	São José dos Cordeiros	PB
4	3848145	Alagoa Nova	PB	44	3835734	São José do Espinharas	PB
5	3855779	Monteiro	PB	45	3835882	São Mamede	PB
6	3845045	Patos	PB	46	3837552	Sossego	PB
7	3846894	São João do Cariri	PB	47	3846475	Santo André	PB
8	3836715	Santa Luzia	PB	48	3866066	Santa Maria da Paraíba	PB
9	3845448	Teixeira	PB	49	3845113	Santa Teresinha	PB
10	3847128	Soledade	PB	50	3858467	Umbuzeiro	PB
11	3857044	Cabaceiras	PB	51	3848579	Ingá	PB
12	3845583	Desterro	PB	52	3849604	Mogeirol	PB
13	3847188	Pocinhos	PB	53	3849232	Acaú	PB
14	3858006	Bodocongó	PB	54	3849545	Pilar	PB
15	3837488	Barra de Santa Rosa	PB	55	3848174	Alagoa Grande	PB
16	3856498	Caraúbas	PB	56	3858439	Mata Virgem	PB
17	3845236	Fazenda Porcos	PB	57	3858065	Aroeiras	PB
18	3845514	Mãe D'água de Dentro	PB	58	3849636	Itabaiana	PB
19	3837953	Olivedos	PB	59	3856828	Camalaú	PB
20	3837507	Pedra Lavrada	PB	60	3856345	Sucurú	PB
21	3846231	Salgadinho	PB	61	3836957	Equador	RN
22	3866128	São João do Tigre	PB	62	3866731	Cimbres	PE
23	3856314	Sumé	PB	63	3865566	Henrique Dias	PE
24	3847218	Fazenda Santa Teresa	PB	64	3866762	Pesqueira	PE
25	3837796	Algodão	PB	65	3866281	Muquem	PE
26	3838575	Bananeiras	PB	66	3866384	Canhoto	PE
27	3847979	Boqueirão	PB	67	3857905	Jataúba	PE
28	3857534	Barra de São Miguel	PB	68	3849006	Mulungu	PB
29	3847698	Católé	PB	69	3857726	Mulungu	PE
30	3856667	Congo	PB	70	3857727	Vila Pará	PE
31	3856278	Coxixola	PB	71	3847555	Boa Vista	PB
32	3827973	Cuité	PB	72	3859111	Macaparana	PE
33	3845945	São José do Egito	PE	73	3855432	Jardim	PE
34	3848741	Fagundes	PB	74	3855626	Jabitacá	PE
35	3858039	Fazenda Lagoa dos Marcos	PB	75	3854898	Irajaí	PE
36	3847505	Gurjão	PB	76	3865889	Arcoverde	PE
37	3846185	Juazeirinho	PB	77	3857891	Taquaritinga do Norte	PE
38	3845289	Passagem	PB	78	3858653	Surubim	PE
39	3855383	Prata	PB	79	3858684	Bom Jardim	PE
40	3857471	Riacho Santo Antonio	PB	80	3858399	Machados	PE

Fonte: Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste (SUDENE, 1990)

### 4.3.2 Dados Fisiográficos

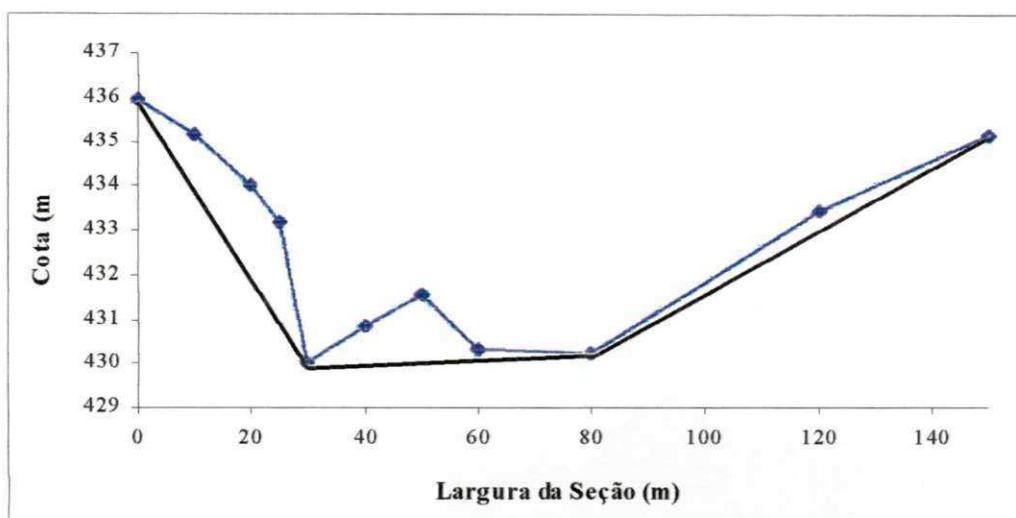
De posse de mapas da SUDENE, a região limitada pela estação de Boqueirão de Cabaceiras (Figura 4.10) foi dividida, conforme requerido pelo modelo NAVMO, em 61 sub-bacias (Figura 4.11), buscando-se coincidir cada uma das estações fluviométricas com a saída de uma dada sub-bacia, possibilitando a comparação de escoamentos simulados e observados. Embora não tenha sido utilizada na pesquisa, a parte média da bacia do rio Paraíba é também mostrada na Figura 4.11.



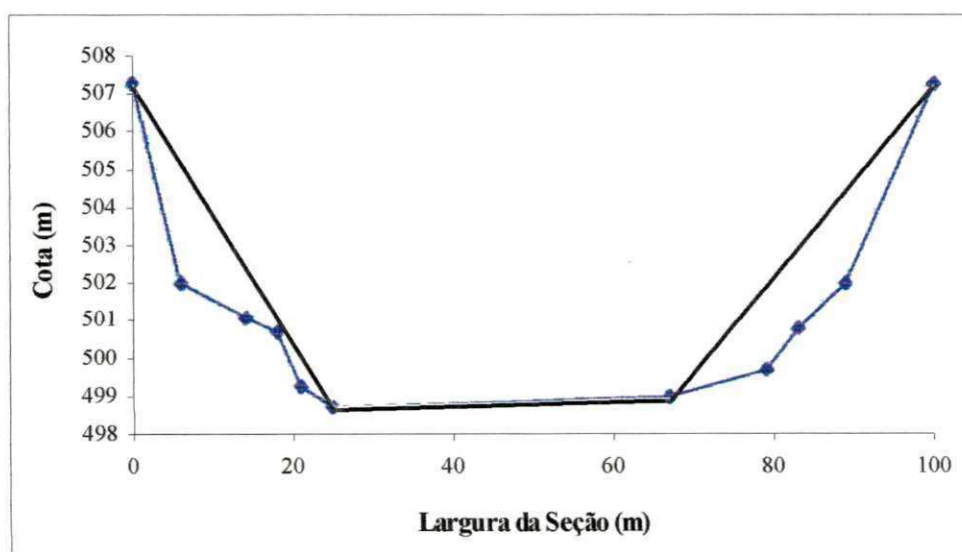
**Figura 4.11 - Bacia do Alto Paraíba – PB (divisão em Sub-bacias).**

As estações fluviométricas de Caraúbas, Taperoá, Poço das Pedras e Boqueirão de Cabaceiras, indicadas na Tabela 4.2, têm seções de saída nas sub-bacias 19, 27, 42 e 61 respectivamente (ver Figura 4.11). Os dados das áreas das sub-bacias, coordenadas cartesianas dos seus centróides, cotas e comprimentos de trechos de rios, foram obtidos a partir dos mapas da SUDENE e são apresentados no Anexo B.

O método de Williams foi utilizado para a propagação do fluxo nos canais. Os dados das seções onde ocorre a propagação, conforme requerido pelo modelo (Anexo B), foram determinados com base em medições feitas de cada uma das seções transversais das estações consideradas. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram as seções de Poço das Pedras e Taperoá, obtidas em levantamentos topográficos realizados no período de 01 a 05 de maio de 2003.



**Figura 4.12 - Características Topográficas da Seção de Poço das Pedras com Definição da Seção Principal Utilizada.**



**Figura 4.13 - Características Topográficas da Seção de Taperoá com Definição da Seção Principal Utilizada.**



## CAPÍTULO 5

### 5. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO NAVMO

#### 5.1. Calibração

Os parâmetros que mais afetam o escoamento no modelo NAVMO (ALFA, EET e CN) foram calibrados considerando a variabilidade do clima e uso do solo sobre o escoamento na bacia do Alto Paraíba (~14.000km<sup>2</sup>) e suas sub-bacias, comparando-se vazões máximas e volumes anuais simulados com os observados. Foram utilizados dados diários das quatro (4) estações fluviométricas na região (ver Figura 4.10) e de 80 postos pluviométricos (ver Tabela 4.4). Para a variabilidade do clima os anos foram classificados (ver Cadier, 1996; Figueiredo e Srinivasan, 1999) em anos secos ( $P < 600$  mm/ano), normais ( $600 \leq P \leq 800$  mm/ano) e úmidos ( $P > 800$  mm/ano).

A umidade inicial do solo foi fixada em 5%, o que corresponde a um déficit de umidade de 95%, devido ao fato de que as simulações são conduzidas para um período que inicia na fase de estiagem (geralmente 1 de Janeiro de cada ano).

Devido aos diferentes períodos de dados observados nas estações fluviométricas selecionadas para a simulação na bacia do Alto Paraíba (ver Tabela 4.10), não foi possível calibrar todas as bacias da região (Taperoá, Caraúbas, Poço das Pedras e Boqueirão de Cabaceiras) com as mesmas séries anuais de dados. Portanto, para as bacias de Taperoá e Boqueirão de Cabaceiras utilizou-se a série anual de dados de 1922 a 1952 e um banco de dados de pluviometria específico foi montado abrangendo o período em consideração. Um outro banco de dados de pluviometria foi preparado para as bacias de Caraúbas e Poço das Pedras para o período de 1973 a 1982.

Os valores de ALFA, EET e de CN foram calibrados por tentativa e erro, comparando-se hidrogramas, vazões máximas e volumes anuais. O trabalho de Lacerda Júnior, (2002) que estabeleceu correlações entre estes parâmetros e a escala das bacias

Experimental e Representativa de Sumé para anos secos, normais e úmidos, serviu de referência. Foram utilizados os dados de evapotranspiração potencial constantes da Tabela 4.3, a partir dos quais o parâmetro EET pode ser ajustado conforme os critérios definidos (vazão máxima, volumes anuais e hidrogramas). Os valores calibrados de ALFA, EET e CN encontram-se nas Tabelas 5.1 a 5.12. As Tabelas 5.1 a 5.6 são para as bacias de Taperoá e Boqueirão de Cabaceiras e as Tabelas 5.7 a 5.12 para as bacias de Caraúbas e Poço das Pedras.

**Tabela 5.1 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.**

<b>Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Picos</b>						
<b>Ano</b>	<b>ALFA</b>		<b>EET</b>		<b>CN</b>	
	<b>Taperoá</b>	<b>Boqueirão</b>	<b>Taperoá</b>	<b>Boqueirão</b>	<b>Taperoá</b>	<b>Boqueirão</b>
1923	0,70	0,01	2,31	7,50	90,4	59,0
1925	0,25	0,20	5,10	6,20	53,4	59,4
1927	0,25	0,15	5,15	6,30	72,4	69,0
1929	0,26	0,01	3,00	6,50	91,4	31,2
1931	0,10	0,09	2,50	3,00	48,4	67,9
1934	0,04	0,01	3,10	6,80	93,4	68,3
1935	0,38	0,01	3,10	6,80	85,4	26,0
1945	0,07	0,01	4,10	6,50	76,4	47,9
1947	0,21	0,01	4,00	6,80	98,4	24,5
1948	0,33	0,01	3,70	8,80	95,4	14,3
<b>Média</b>	<b>0,26</b>	<b>0,05</b>	<b>3,61</b>	<b>6,52</b>	<b>80,5</b>	<b>46,8</b>

**Tabela 5.2 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.**

<b>Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Picos</b>						
<b>Ano</b>	<b>ALFA</b>		<b>EET</b>		<b>CN</b>	
	<b>Taperoá</b>	<b>Boqueirão</b>	<b>Taperoá</b>	<b>Boqueirão</b>	<b>Taperoá</b>	<b>Boqueirão</b>
1937	0,12	0,01	4,10	6,20	64,0	29,4
1938	0,20	0,17	4,10	6,20	39,8	40,6
1941	0,12	0,01	4,10	6,50	75,3	29,3
1943	0,20	0,12	4,10	6,20	52,8	44,9
1946	0,25	0,15	4,10	6,20	66,8	43,9
1950	0,08	0,01	4,10	6,50	61,8	13,0
1952	0,55	0,24	4,10	6,50	64,6	49,4
<b>Média</b>	<b>0,22</b>	<b>0,10</b>	<b>4,10</b>	<b>6,33</b>	<b>60,7</b>	<b>35,8</b>



Tabela 5.3 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Picos						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão
1926	0,05	0,01	4,10	6,20	77,4	67,0

Tabela 5.4 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Volumes						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão
1923	0,71	0,07	2,31	6,50	94,4	71,7
1925	0,08	0,07	5,00	5,50	64,4	72,0
1927	0,15	0,14	5,50	5,60	50,4	75,7
1929	0,05	0,03	5,00	5,50	55,4	78,3
1934	0,07	0,02	4,03	6,67	77,5	71,1
1935	0,04	0,01	4,60	8,12	72,4	29,2
1945	0,04	0,01	4,95	7,77	78,0	68,4
1947	0,05	0,01	4,68	6,53	87,6	69,3
1948	0,14	0,01	4,09	6,70	82,5	43,7
<b>Média</b>	<b>0,15</b>	<b>0,04</b>	<b>4,46</b>	<b>6,54</b>	<b>73,6</b>	<b>64,4</b>

Tabela 5.5 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Volumes						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão
1937	0,17	0,12	4,10	5,20	52,8	47,1
1939	0,20	0,01	3,70	7,50	58,8	43,7
1941	0,06	0,01	4,10	6,40	35,8	31,0
1946	0,18	0,05	4,30	7,50	62,8	48,1
1949	0,40	0,01	4,20	6,10	67,7	26,8
1950	0,10	0,02	4,37	6,12	59,8	44,8
1952	0,34	0,30	4,45	5,16	63,8	50,7
<b>Média</b>	<b>0,21</b>	<b>0,07</b>	<b>4,17</b>	<b>6,28</b>	<b>57,4</b>	<b>41,7</b>

Tabela 5.6 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Volumes						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão	Taperoá	Boqueirão
1924	0,08	0,01	3,73	5,76	88,2	86,5
1940	0,08	0,02	3,51	4,86	82,8	73,0
<b>Média</b>	<b>0,08</b>	<b>0,02</b>	<b>3,62</b>	<b>5,31</b>	<b>85,5</b>	<b>79,8</b>

Tabela 5.7 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Picos						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Caraúbas	Pç.Pedras	Caraúbas	Pç.Pedras	Caraúbas	Pç.Pedras
1973	0,13	0,18	4,60	4,50	68,7	69,0
1975	0,12	0,15	4,70	4,50	68,7	75,0
1978	0,13	0,18	4,70	4,60	70,8	71,2
<b>Média</b>	<b>0,13</b>	<b>0,17</b>	<b>4,67</b>	<b>4,50</b>	<b>69,4</b>	<b>71,7</b>

Tabela 5.8 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Picos						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Caraúbas	Pç.Pedras	Caraúbas	Pç.Pedras	Caraúbas	Pç.Pedras
1979	0,16	0,20	5,20	5,00	50,5	56,0
1981	0,18	0,21	5,10	5,00	55,0	59,8
<b>Média</b>	<b>0,17</b>	<b>0,21</b>	<b>5,15</b>	<b>5,00</b>	<b>52,8</b>	<b>57,9</b>

Tabela 5.9 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.

Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Picos						
Ano	ALFA		EET		CN	
	Caraúbas	Pç.Pedras	Caraúbas	Pç.Pedras	Caraúbas	Pç.Pedras
1974	0,04	0,05	4,20	4,10	73,2	86,1
1977	0,02	0,03	4,30	4,20	78,1	82,8
<b>Média</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>4,25</b>	<b>4,15</b>	<b>75,7</b>	<b>84,5</b>

**Tabela 5.10 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Normais.**

<b>Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Volumes</b>						
<b>Ano</b>	<b>ALFA</b>		<b>EET</b>		<b>CN</b>	
	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>
1973	0,12	0,13	4,80	4,70	74,2	75,9
1975	0,12	0,13	4,60	4,50	71,3	76,0
1978	0,12	0,13	4,80	4,70	73,5	76,4
<b>Média</b>	<b>0,12</b>	<b>0,13</b>	<b>4,73</b>	<b>4,63</b>	<b>73,0</b>	<b>76,1</b>

**Tabela 5.11 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Secos.**

<b>Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Volumes</b>						
<b>Ano</b>	<b>ALFA</b>		<b>EET</b>		<b>CN</b>	
	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>
1976	0,13	0,14	5,40	5,20	53,5	60,2
1979	0,13	0,14	5,60	5,30	54,4	44,9
1982	0,13	0,14	5,90	5,85	45,4	65,0
<b>Média</b>	<b>0,13</b>	<b>0,14</b>	<b>5,63</b>	<b>5,45</b>	<b>51,1</b>	<b>56,7</b>

**Tabela 5.12 – Valores de ALFA, EET e CN para Anos Úmidos.**

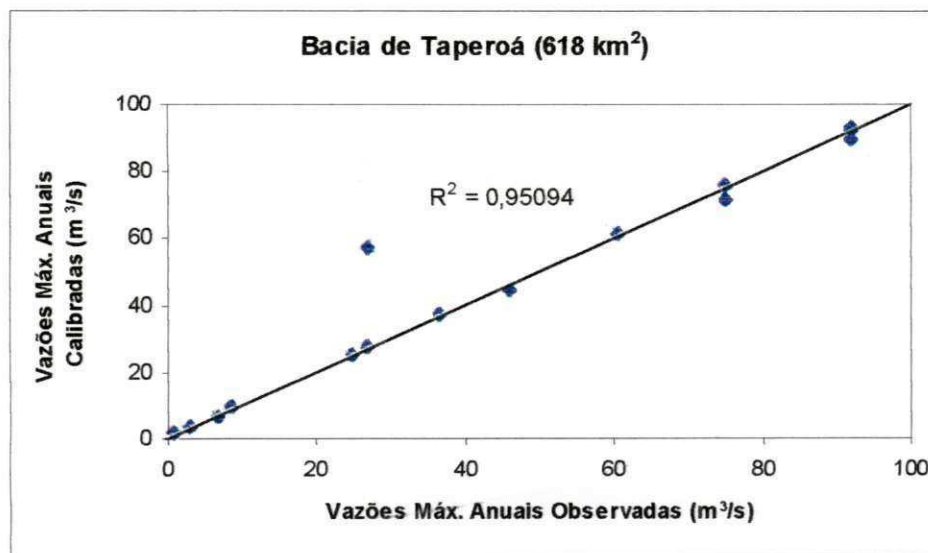
<b>Valores Calibrados dos Parâmetros e de CN Comparando-se os Volumes</b>						
<b>Ano</b>	<b>ALFA</b>		<b>EET</b>		<b>CN</b>	
	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>	<b>Caraúbas</b>	<b>Pç.Pedras</b>
1974	0,03	0,04	4,50	4,57	82,6	84,0
1977	0,03	0,04	4,30	4,20	73,4	83,7
<b>Média</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>4,40</b>	<b>4,39</b>	<b>78,0</b>	<b>83,9</b>

## 5.2. Análise e discussão da calibração

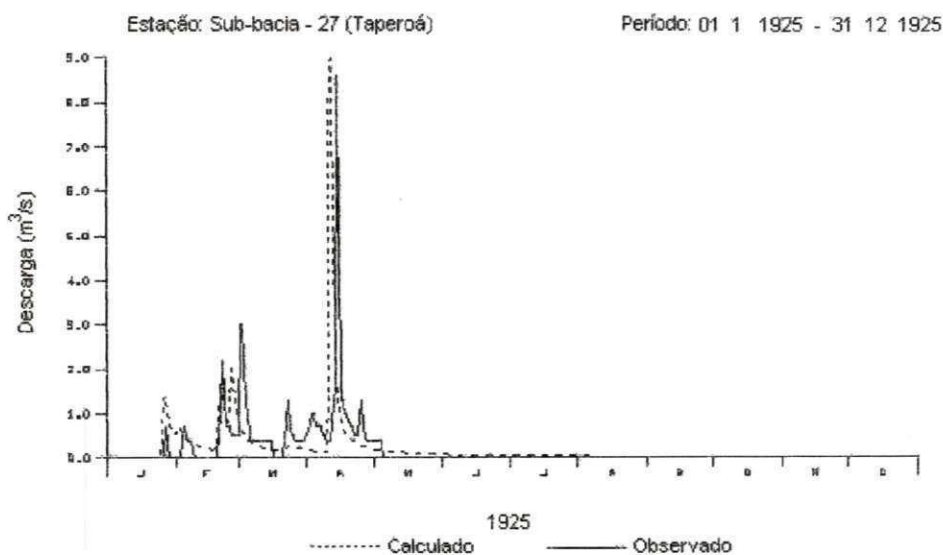
Os resultados são apresentados e discutidos neste item com relação aos volumes e vazões máximas anuais, através de gráficos de valores anuais simulados x valores anuais observados, do coeficiente de determinação e da comparação de hidrogramas diários simulados e observados, escolhidos para cada uma das bacias simuladas num dado ano.

### 5.2.1. Bacia de Taperoá - 618 km<sup>2</sup> (1923 – 1958)

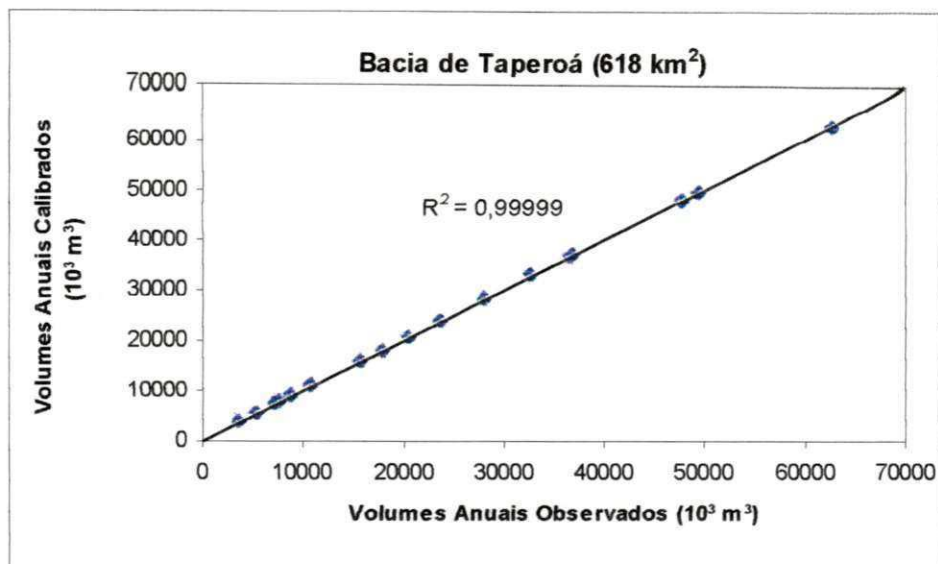
As Figuras 5.1 a 5.4 mostram alguns resultados obtidos com os parâmetros calibrados. De um modo geral, os resultados obtidos foram razoáveis, pois apresentaram boa correlação com os dados observados, com valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,9 (Figuras 5.1 e 5.3). Os hidrogramas simulados representaram bem os hidrogramas observados, porém, em alguns casos, observou-se uma defasagem no tempo com relação às vazões máximas (Figuras 5.2 e 5.4).



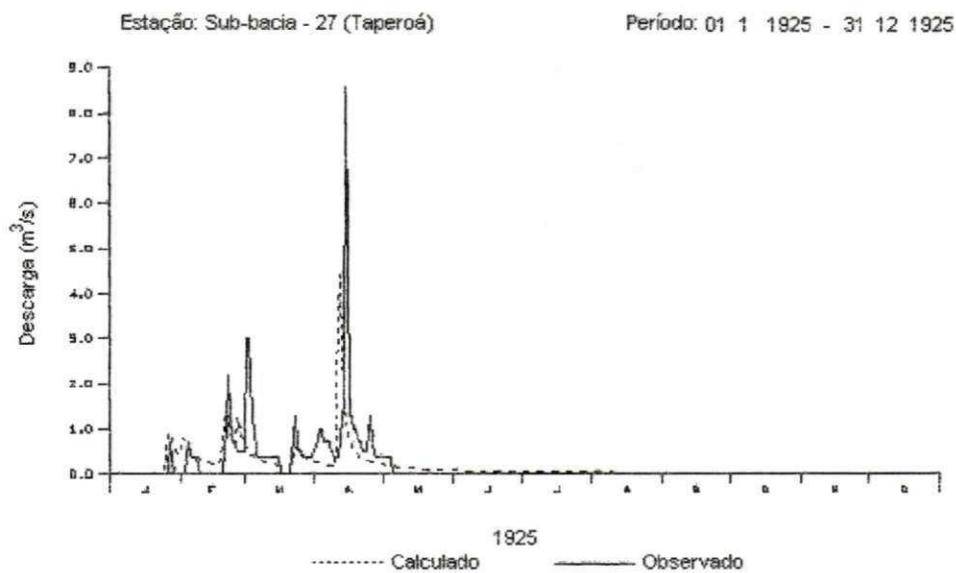
**Figura 5.1 - Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Taperoá.**



**Figura 5.2 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Taperoá em 1925 com Parâmetros Calibrados pela Vazão Máxima.**



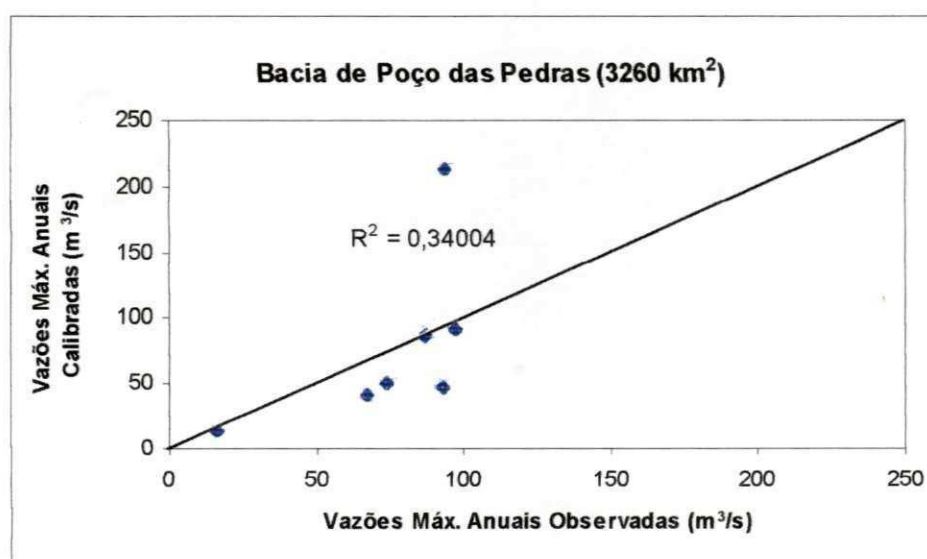
**Figura 5.3 - Volumes Anuais Observados e Calibrados na Bacia de Taperoá.**



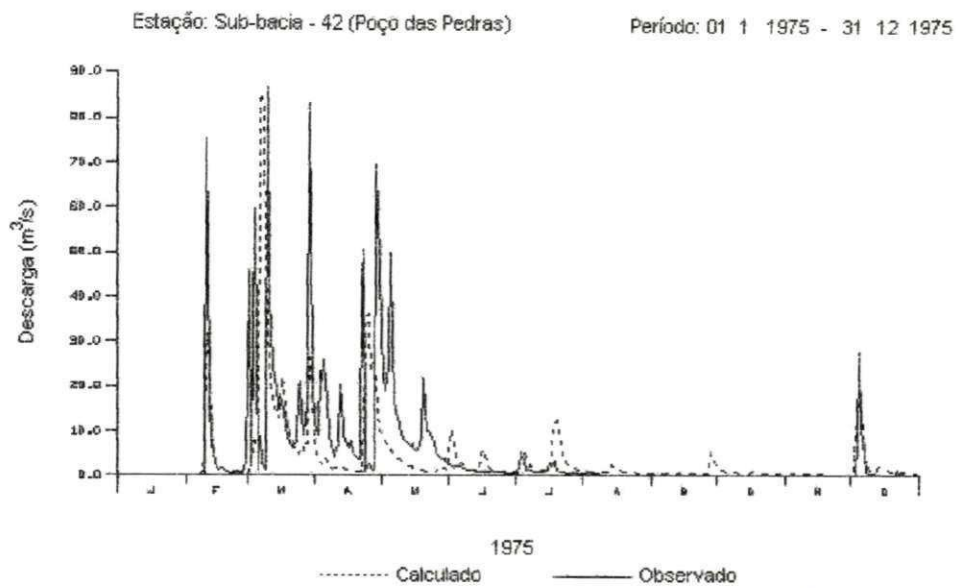
**Figura 5.4 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Taperoá em 1925 com Parâmetros Calibrados pelo Volume.**

### 5.2.2. Bacia de Poço das Pedras – 3260 km<sup>2</sup> (1970 – 1985)

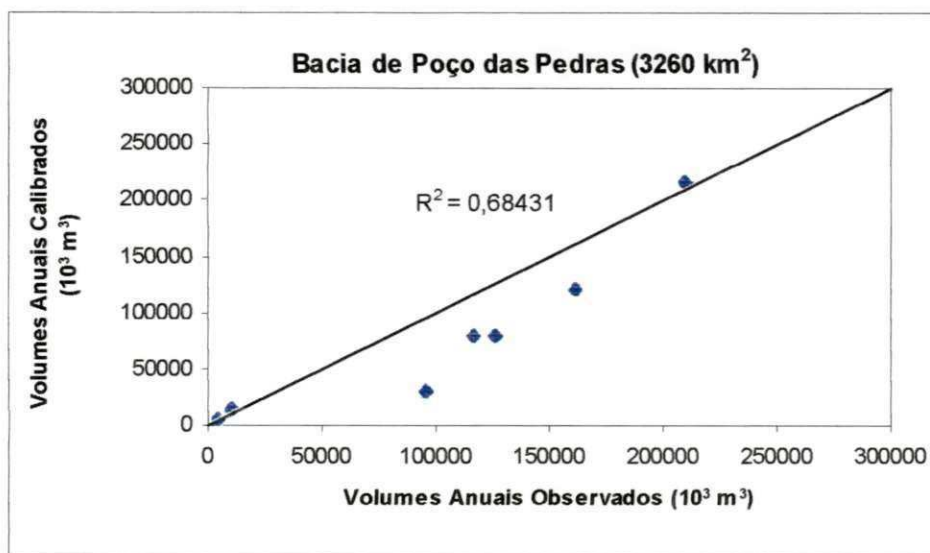
De um modo geral, os resultados obtidos para as vazões máximas anuais simuladas no processo de calibração (Figura 5.5) não foram bons para a bacia de Poço das Pedras. O coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,34$ ) demonstra esse fato, porém este resultado é fortemente influenciado pelo ano de 1977 que apresenta uma superestimação em relação ao valor observado. Excluindo-se este ano, o valor de  $R^2$  sobe para 0,67. Já os resultados encontrados para os volumes anuais (Figura 5.7) são bastante razoáveis, pois para esta bacia apresentaram boa correlação com os dados observados ( $R^2$  acima de 0,6). Os hidrogramas simulados (Figuras 5.6 e 5.8) mostram uma boa representação para esta bacia.



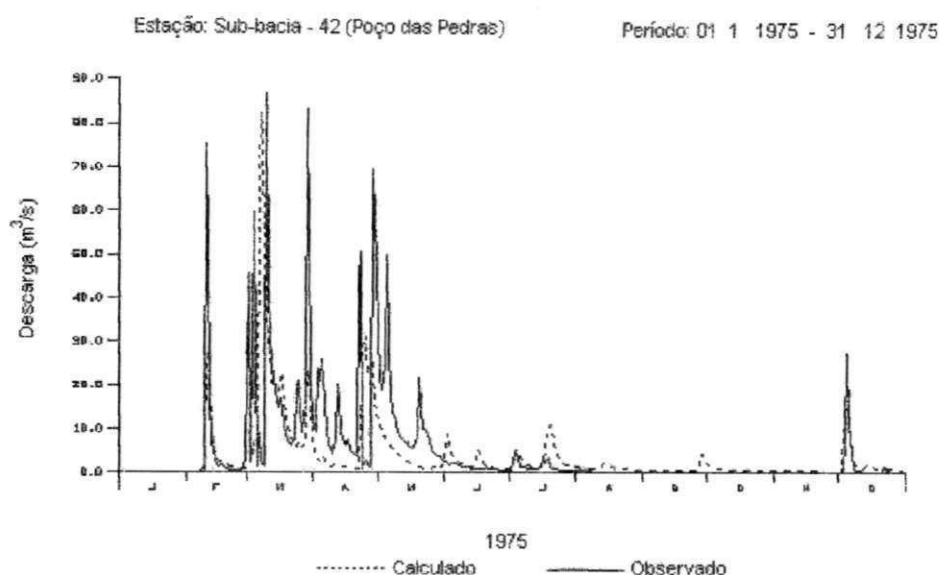
**Figura 5.5 - Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Poço das Pedras.**



**Figura 5.6 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Poço das Pedras em 1975 com Parâmetros Calibrados pela Vazão Máxima.**



**Figura 5.7 - Volumes Anuais Observados e Calibrados na Bacia de Poço das Pedras.**

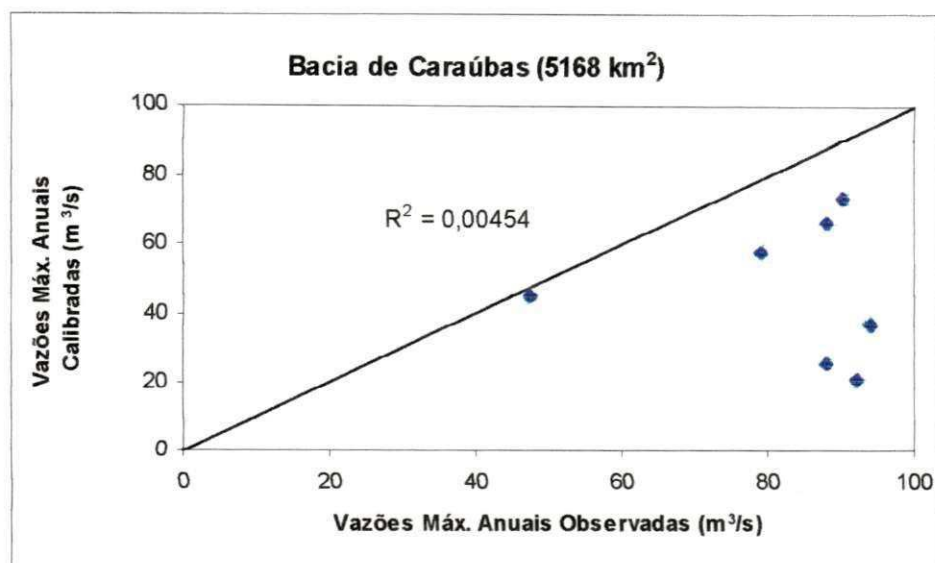


**Figura 5.8 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Poço das Pedras em 1975 com Parâmetros Calibrados pelo Volume.**

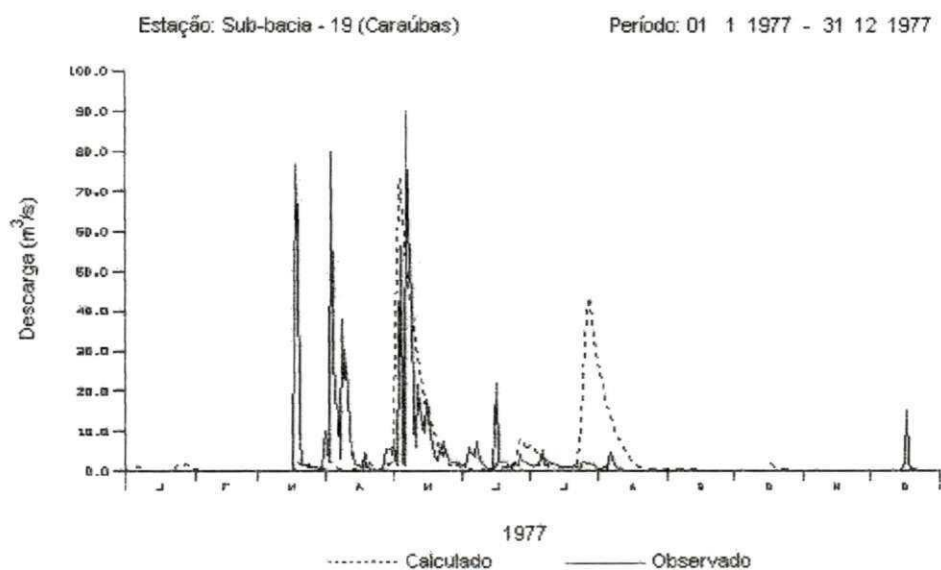
### 5.2.3. Bacia de Caraúbas (1973 – 1985)

Os resultados obtidos para as vazões máximas anuais simuladas no processo de calibração para bacia de Caraúbas (Figura 5.9) não foram bons. O valor de  $R^2$  mostra que o modelo não representou bem este processo. No entanto, os resultados encontrados para os volumes anuais (Figura 5.11) apresentaram-se razoáveis, com  $R^2$  acima de 0,8. Os hidrogramas apresentados nas Figuras 5.10 e 5.12 mostram boa representação das vazões para esta bacia.

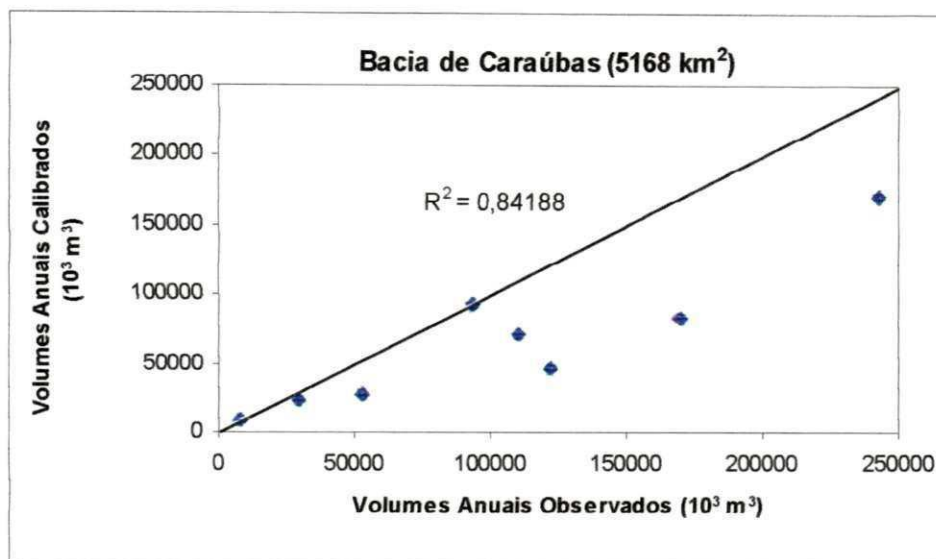




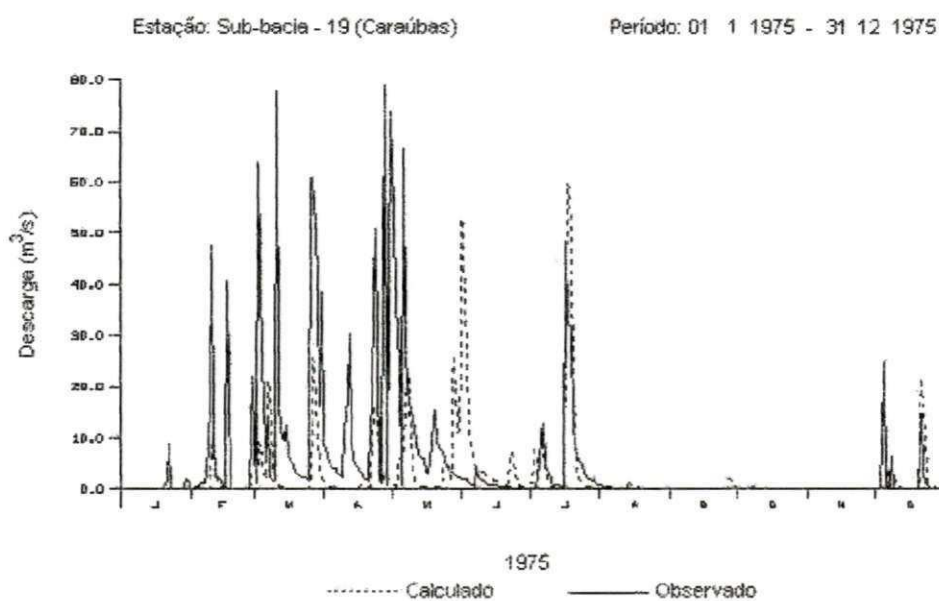
**Figura 5.9 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Caraúbas.**



**Figura 5.10 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Caraúbas em 1977 com Parâmetros Calibrados pela Vazão Máxima.**



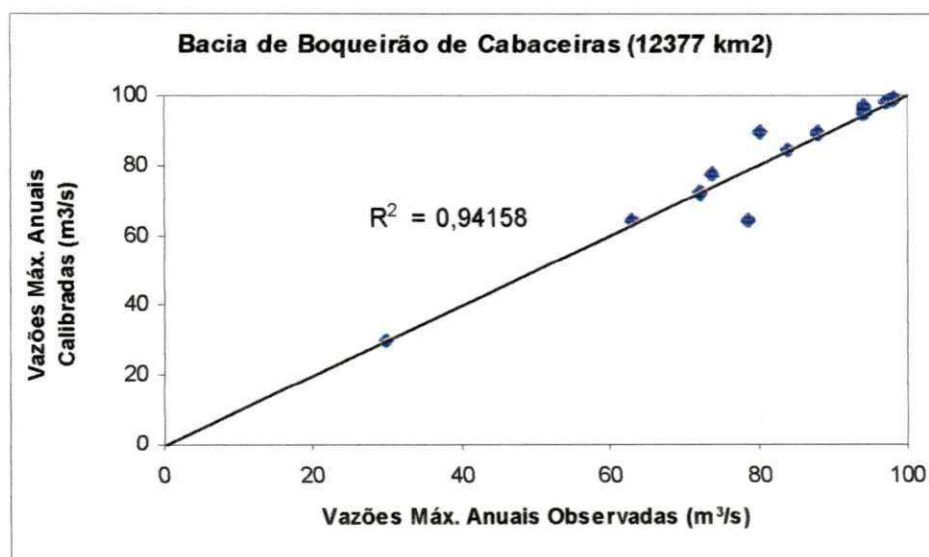
**Figura 5.11 - Comparação Entre os Volumes Anuais Observados e Calibrados na bacia de Caraúbas.**



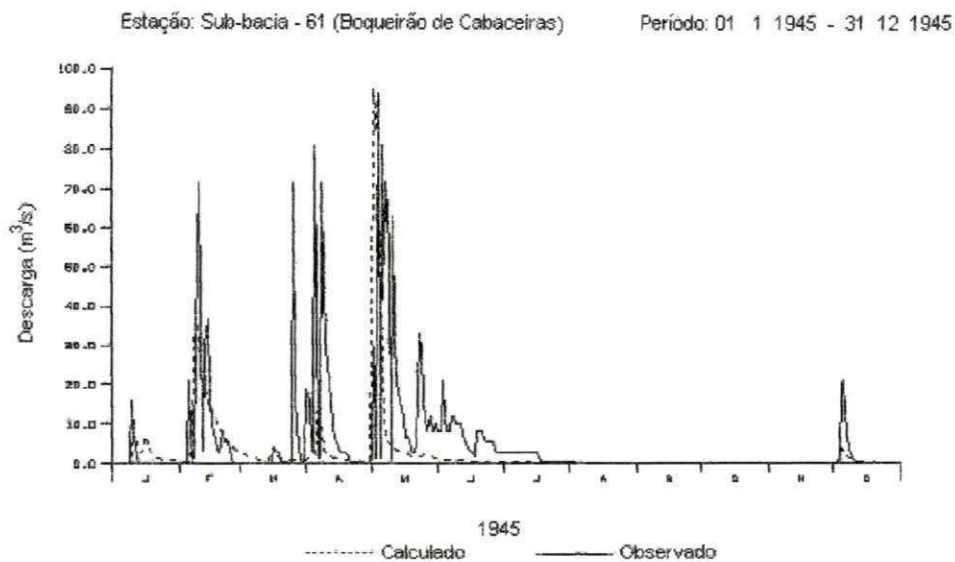
**Figura 5.12 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Caraúbas em 1975 com Parâmetros Calibrados pelo Volume.**

#### 5.2.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras (1922 – 1952)

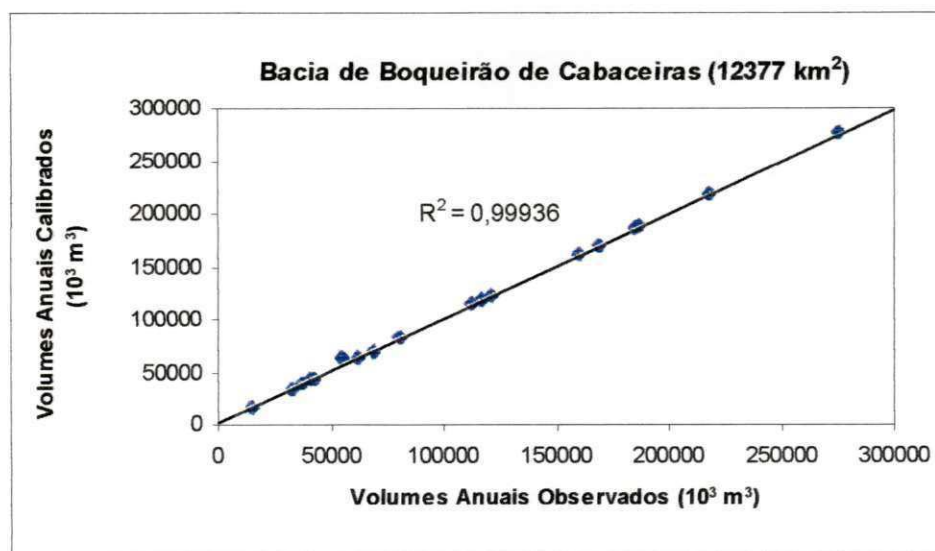
As Figuras 5.13 a 5.16 mostram os resultados obtidos para esta bacia com a calibração dos parâmetros. As vazões máximas e volumes anuais simulados no processo de calibração do modelo para a bacia de Boqueirão de Cabaceiras são bastante razoáveis, pois apresentaram boa correlação com os dados observados ( $R^2$  acima de 0,9). Os hidrogramas apresentados mostram uma boa representação tanto das vazões máximas como dos volumes anuais.



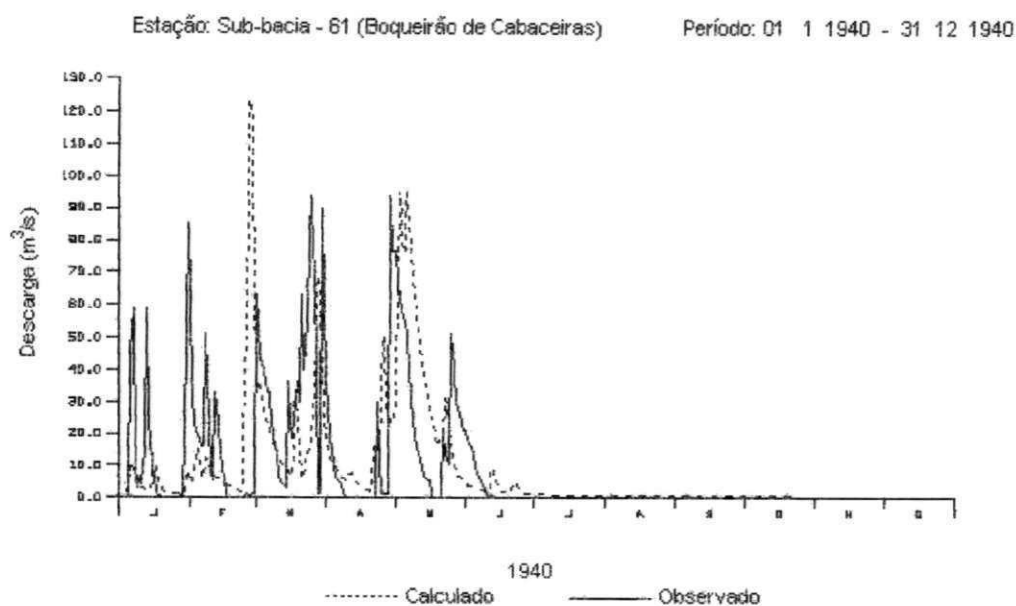
**Figura 5.13 - Vazões Máximas Anuais Observadas e Calibradas na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.**



**Figura 5.14 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras em 1945, com Parâmetros Calibrados pela Vazão Máxima.**



**Figura 5.15 - Volumes Anuais Observados e Calibrados na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras.**



**Figura 5.16 - Hidrogramas Observado e Calibrado na Bacia de Boqueirão de Cabaceiras em 1940, com Parâmetros Calibrados pelo Volume.**

### 5.3. Análise da Validação do Modelo

Com o objetivo de se verificar a consistência dos valores do parâmetro ALFA, obtidos na calibração através das vazões máximas e volumes do escoamento nas bacias de Poço das Pedras e Caraúbas, novos valores foram definidos com base na proporcionalidade entre as áreas das bacias e nos valores calibrados para Taperoá e Boqueirão de Cabaceiras.

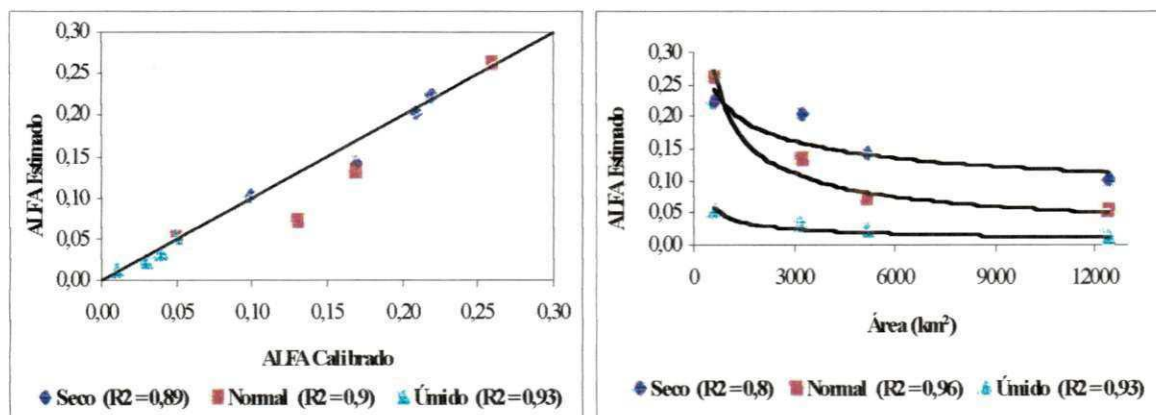
Na tabela 5.13 são apresentados os valores obtidos considerando a pluviometria anual, para as bacias de Poço das Pedras e de Caraúbas, determinados a partir dos valores médios de ALFA obtidos para Taperoá e Boqueirão de Cabaceiras. As Figuras 5.17 e 5.18 comparam os valores de ALFA estimados e calibrados pelas vazões máximas e volumes e suas relações com a área da bacia.

Para os anos que foram calibrados foi feita uma nova simulação com as bacias de Caraúbas e Poço das Pedras utilizando os valores de ALFA estimados. Os resultados serão apresentados e discutidos posteriormente com relação aos volumes e vazões máximas

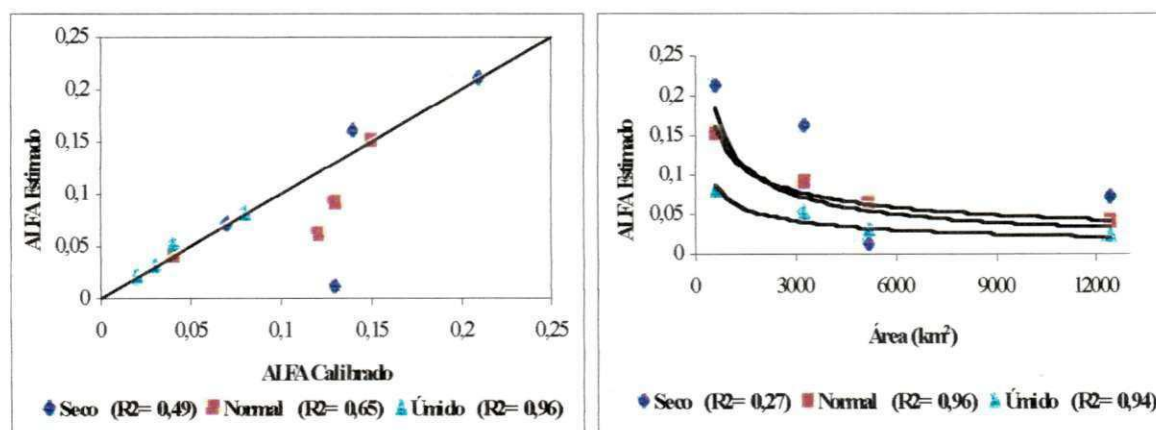
anuais, através de gráficos de valores anuais simulados x valores anuais observados, do coeficiente de determinação e da comparação de hidrogramas diários simulados e observados, escolhidos para cada uma das bacias simuladas num dado ano.

**Tabela 5.13 – Valores Médios de ALFA Obtidos a partir dos Valores de Taperoá e Boqueirão Considerando a Proporcionalidade entre as Áreas e a Pluviometria Anual.**

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	ALFA								
		Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média
Poço das Pedras	3260	0,20	0,16	<b>0,18</b>	0,13	0,09	<b>0,11</b>	0,03	0,05	<b>0,04</b>
Caraúbas	5168	0,14	0,01	<b>0,08</b>	0,07	0,06	<b>0,07</b>	0,02	0,03	<b>0,03</b>



**Figura 5.17 – Comparação de ALFA Estimado e Calibrado pelos Picos.**

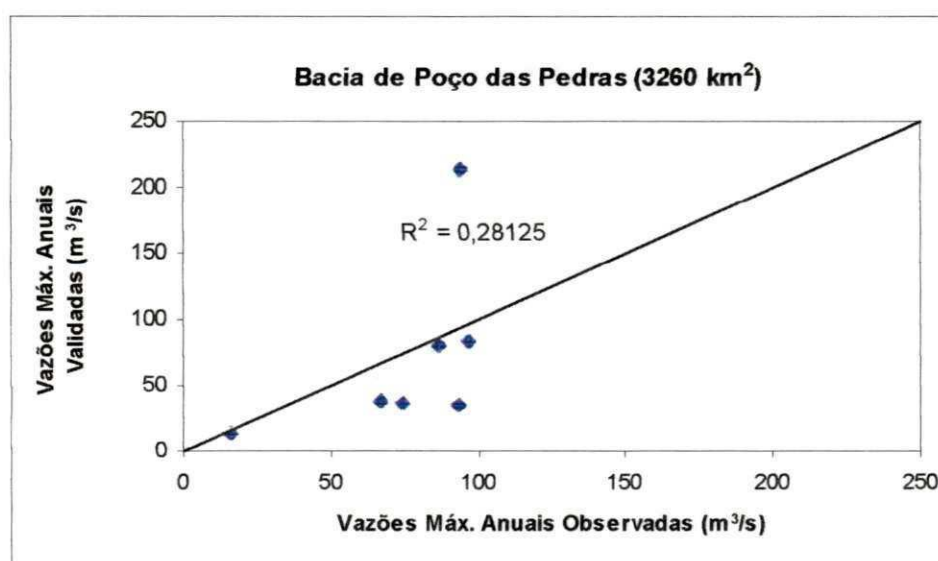


**Figura 5.18 – Comparação de ALFA Estimado e Calibrado pelos Volumes.**

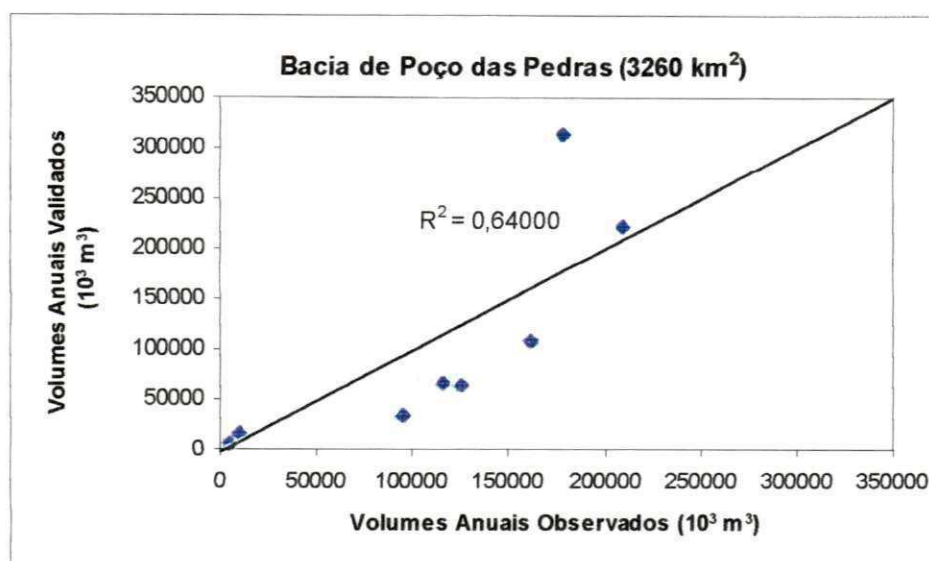


### 5.3.1. Bacia de Poço das Pedras

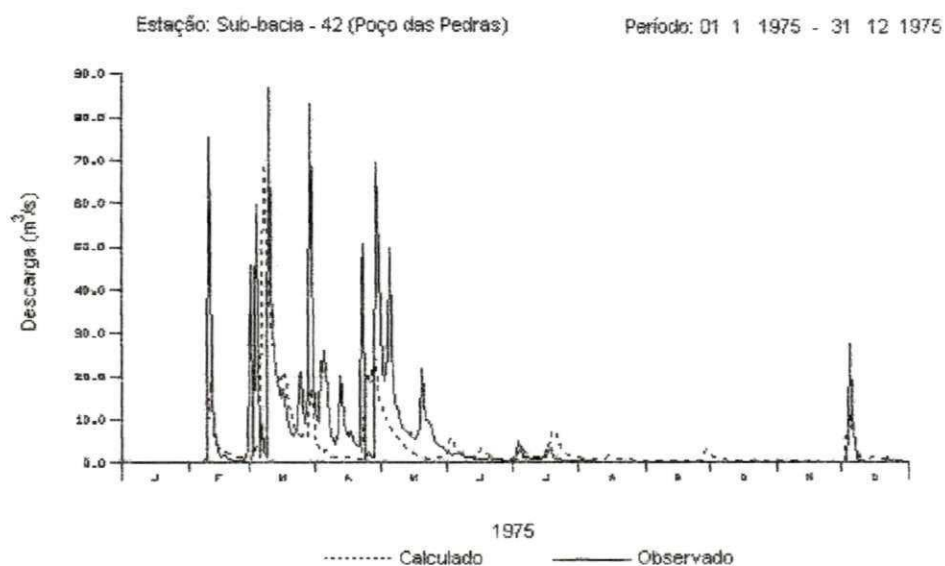
Os resultados obtidos para as vazões máximas anuais simuladas no processo de Validação (Figura 5.19) não foram bons para a bacia de Poço das Pedras, com baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,28$ ). Já os resultados encontrados para os volumes anuais (Figura 5.20) são bastante razoáveis ( $R^2 > 0,6$ ). Os hidrogramas simulados representaram bem os hidrogramas observados, porém, em alguns casos, observou-se uma defasagem no tempo com relação às vazões máximas (Figura 5.21).



**Figura 5.19 - Vazões Máximas Anuais Simuladas com parâmetros Estimados e Observadas na Bacia de Poço das Pedras.**



**Figura 5.20 - Volumes Anuais Simuladas com parâmetros Estimados e Observados na Bacia de Poço das Pedras.**

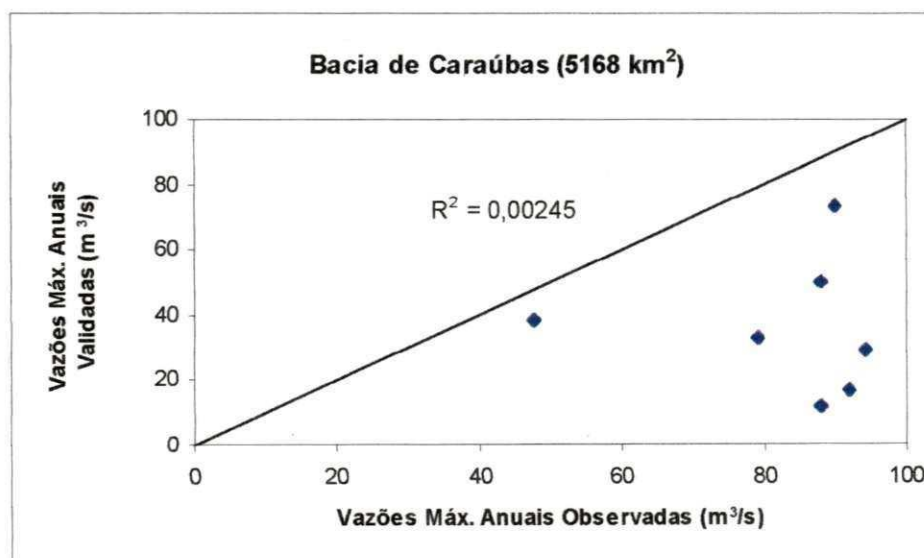


**Figura 5.21 - Hidrogramas Observado e Validado na bacia de Poço das Pedras em 1975 com Parâmetros Estimados pelo Volume.**

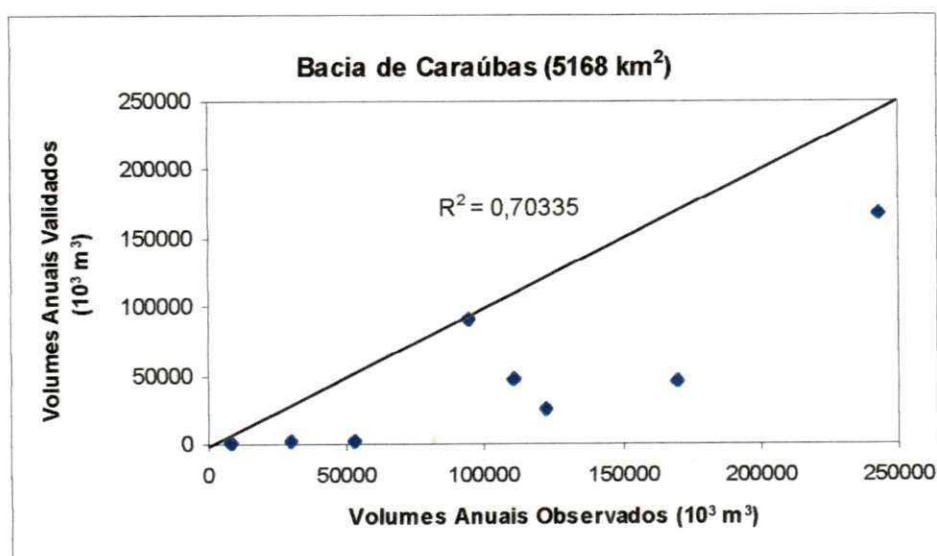


### 5.3.2 Bacia de Caraúbas

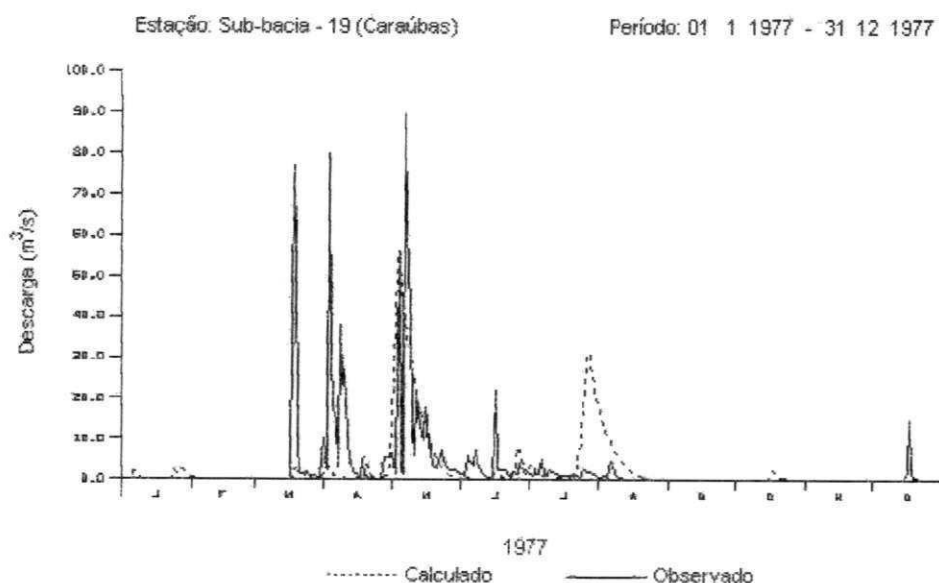
Os resultados obtidos para as vazões máximas anuais simuladas no processo de Validação (Figura 5.22) também não foram bons para a bacia de Caraúbas, já que o modelo não conseguiu explicar este processo. Já os resultados encontrados para os volumes anuais (Figura 5.23) são razoáveis, pois apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,6. Os hidrogramas simulados (Figura 5.24) mostram também uma subestimação dos picos anuais para esta bacia, e também defasados no tempo.



**Figura 5.22 - Vazões Máximas Anuais Simuladas com Parâmetros Estimados e Observadas em Caraúbas.**



**Figura 5.23 - Volumes Anuais Simulados com Parâmetros Estimados e Observados na Bacia de Caraúbas.**



**Figura 5.24 - Hidrogramas Observado e Validado na Bacia de Caraúbas em 1977 com Parâmetros Estimados pelo Volume.**

#### 5.4. Análise do Efeito de Escala

Com base nos resultados obtidos com a calibração dos parâmetros, foi feita uma análise do efeito da escala sobre os parâmetros. Nas Tabelas 5.14, 5.15 e 5.16 são apresentados os valores de ALFA, EET e CN médios dos valores obtidos nos anos secos, normais e úmidos, bem como a média destes valores nas várias áreas estudadas.

**Tabela 5.14 – Valores Médios de ALFA conforme a Escala e Pluviometria.**

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	ALFA								
		Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média
Taperoá	618	0,22	0,21	<b>0,22</b>	0,26	0,15	<b>0,21</b>	0,05	0,08	<b>0,07</b>
Poço das Pedras	3260	0,21	0,14	<b>0,18</b>	0,17	0,13	<b>0,15</b>	0,04	0,04	<b>0,04</b>
Caraúbas	5168	0,17	0,13	<b>0,15</b>	0,13	0,12	<b>0,13</b>	0,03	0,03	<b>0,03</b>
Boqueirão de Cabaceiras	12377	0,10	0,07	<b>0,09</b>	0,05	0,04	<b>0,05</b>	0,01	0,02	<b>0,02</b>

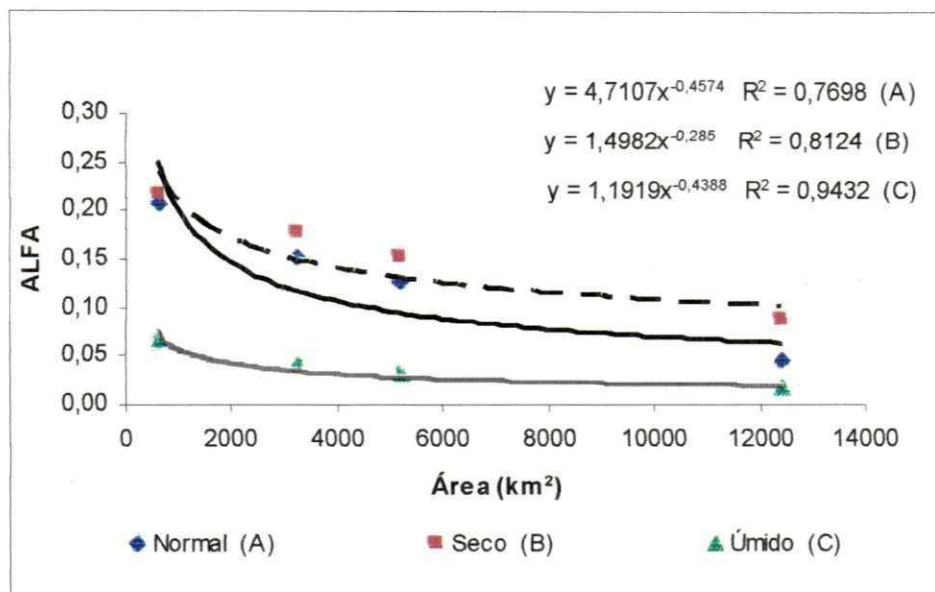
Tabela 5.15 – Valores Médios de EET conforme a Escala e Pluviometria.

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	EET								
		Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média
Taperoá	618	4,10	4,17	<b>4,14</b>	3,61	4,46	<b>4,04</b>	4,10	3,62	<b>3,86</b>
Poço das Pedras	3260	5,00	5,45	<b>5,23</b>	4,50	4,63	<b>4,57</b>	4,15	4,39	<b>4,27</b>
Caraúbas	5168	5,15	5,63	<b>5,39</b>	4,67	4,73	<b>4,70</b>	4,25	4,4	<b>4,33</b>
Boqueirão de Cabaceiras	12377	6,33	6,28	<b>6,31</b>	6,52	6,54	<b>6,53</b>	6,20	5,31	<b>5,76</b>

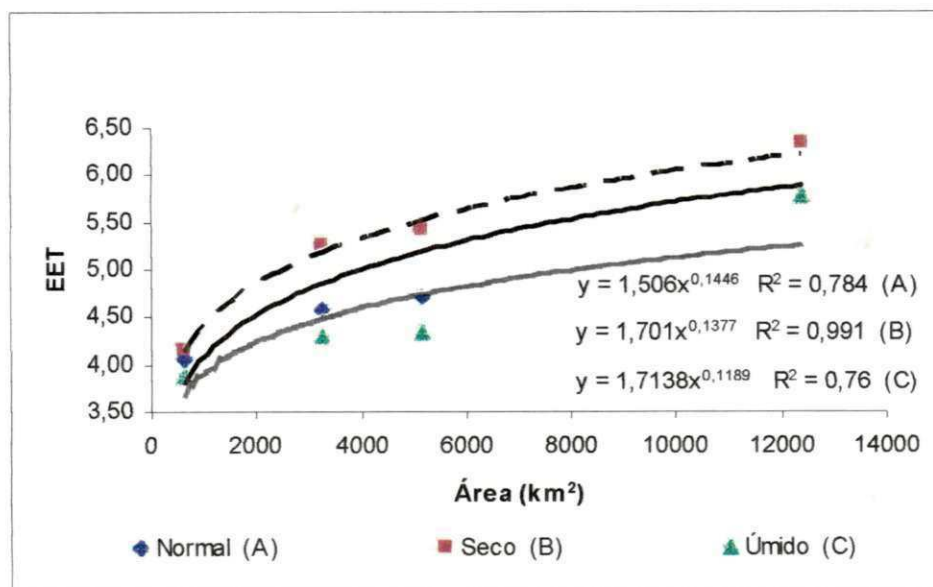
Tabela 5.16 – Valores Médios de CN conforme a Escala e Pluviometria.

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	CN								
		Anos Secos			Anos Normais			Anos Úmidos		
		Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média	Q <sub>máx.</sub>	Vol.	Média
Taperoá	618	60,7	57,4	<b>59,0</b>	80,5	73,6	<b>77,0</b>	77,4	85,5	<b>81,5</b>
Poço das Pedras	3260	57,9	56,7	<b>57,3</b>	71,7	76,1	<b>73,9</b>	84,5	83,9	<b>84,2</b>
Caraúbas	5168	52,8	51,1	<b>52,0</b>	69,4	73,0	<b>71,2</b>	75,7	78,0	<b>76,8</b>
Boqueirão de Cabaceiras	12377	35,8	41,7	<b>38,8</b>	46,8	64,4	<b>55,6</b>	67,0	79,8	<b>73,4</b>

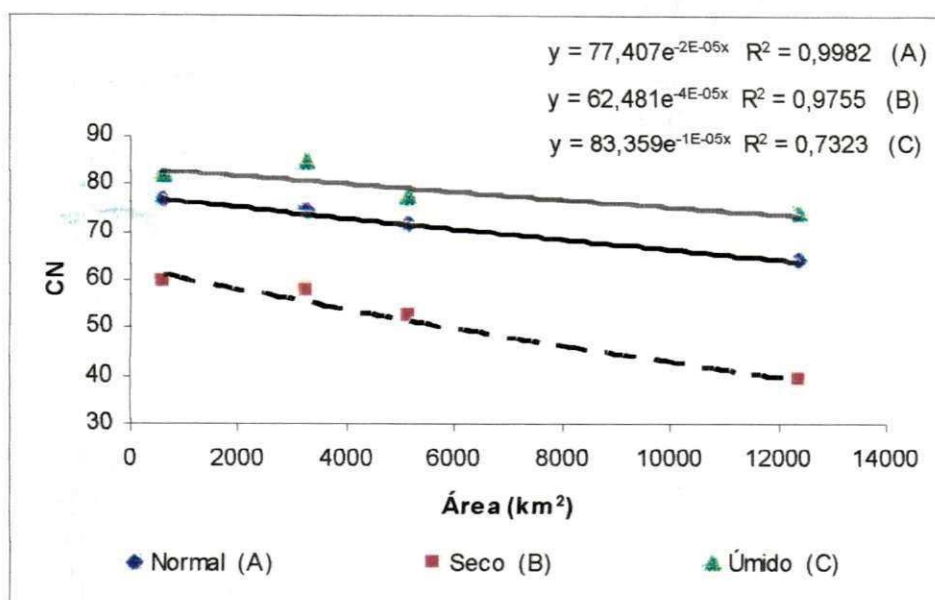
Conforme pode ser visto nas Tabelas 5.14 a 5.16, os valores de ALFA e CN decrescem com o aumento da área da bacia hidrográfica, tanto para as vazões máximas quanto para os volumes anuais. Já EET aumenta com o aumento da área da bacia. Uma análise gráfica destes comportamentos é mostrada nas Figuras 5.25 a 5.27 que relacionam os valores médios desses parâmetros com a área da bacia.



**Figura 5.25 - Variação de ALFA com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.**



**Figura 5.26 - Variação de EET com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria Anual.**



**Figura 5.27 - Variação de CN com a Escala da Bacia, em Diferentes Faixas de Pluviometria.**

Verifica-se que os valores de ALFA são maiores nos anos secos do que nos anos normais e úmidos. Nos anos úmidos, o solo apresenta-se, geralmente, com maior umidade e, portanto, requer um menor valor para este parâmetro do escoamento superficial direto. Conforme se vê, os valores de ALFA nos anos normais encontram-se entre os valores dos anos secos e úmidos.

Com relação a EET, percebe-se que ocorre uma variação pequena (Figura 5.26), para as diferentes faixas de pluviosidade e que os mesmos aumentam à medida que a escala da bacia aumenta. O aumento de EET com a escala deve-se ao fato de que a ocorrência da cobertura vegetal aumenta com a área da bacia, implicando numa maior evapotranspiração.

Com relação ao parâmetro CN, os valores são menores para anos secos devido a baixa umidade em que se apresenta o solo nesses anos e, conseqüentemente, as baixas vazões.

Os resultados apresentados nas Figura 5.25 a 5.27 mostram um comportamento condizente com os resultados de Lacerda Júnior (2002) mostrados nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9, que desenvolveu seus estudos na Bacia Experimental e Representativa de Sumé, as quais estão inseridas na região de estudo desta pesquisa.

## CAPÍTULO 6

### 6. VARIABILIDADE DO CLIMA E USO DO SOLO

#### 6.1. Introdução

A variabilidade do clima e do uso do solo afeta os processos do ciclo hidrológico. A maneira tradicional de análise dos efeitos de ações naturais ou humanas no meio ambiente é através da simulação de cenários. São situações hipotéticas, possíveis de ocorrer. Para tanto, são feitas alterações nos fatores que afetam um determinado processo e os seus efeitos analisados através da resposta do sistema (bacia hidrográfica). Assim, pode-se prever, por exemplo, através da simulação de cenários os possíveis escoamentos em áreas de interesse.

A variabilidade de fatores climáticos pode ser tanto de origem natural como de origem antropogênica. Já as mudanças no uso do solo se dão principalmente pelas ações do homem que desmata áreas, refloresta outras, ou ainda, gera áreas agrícolas. Neste trabalho os principais fatores analisados são a variabilidade natural de fatores climáticos (precipitação e a evaporação) e a mudança no uso do solo. Busca-se aqui fazer a simulação de cenários mais próximos possíveis da realidade da região em estudo.

Segundo Azevedo (1999) os cenários de mudanças climáticas podem ser construídos de três maneiras: com mudanças arbitrárias, com cenários análogos, temporais e espaciais, construídos com dados registrados que podem servir de análogos ou similares para o clima futuro da região estudada, e com simulações através de modelos climáticos. Este último tipo de cenário é geralmente utilizado quando se quer avaliar a mudança climática de longo prazo oriunda do efeito estufa. Os cenários análogos consideram os dados registrados do passado (análogo temporal) ou então em uma bacia hidrográfica similar (análogo espacial) para comparação com uma situação semelhante no futuro. Os

cenários de mudanças arbitrárias pressupõem o livre arbítrio, porém deve ser construído observando-se a realidade dos processos envolvidos.

## 6.2 Cenários para as Simulações da Variabilidade do Clima e Uso do Solo

A maioria das avaliações, que trata com regimes hidrológicos e com recursos hídricos, considera a variabilidade isolada de um dado fator mantendo-se os demais constantes no tempo (Arnell, 1996 apud Azevedo, 1999; Bathurst et al., 1996). Isto não reflete verdadeiramente a realidade física, já que as condições do solo dependem do clima e o escoamento varia com esses fatores. Assim sendo, deve-se, portanto, considerar os fatores climáticos e o uso do solo conjuntamente e não apenas isoladamente, já que são fatores relevantes na geração do escoamento nas bacias hidrográficas. Contudo, a avaliação do efeito de um fator isolado pode ser de interesse particular e, portanto, não deve ser evitada. A Figura 6.1 mostra um esquema para avaliação de impactos de fatores de clima e uso do solo sobre os recursos hídricos.

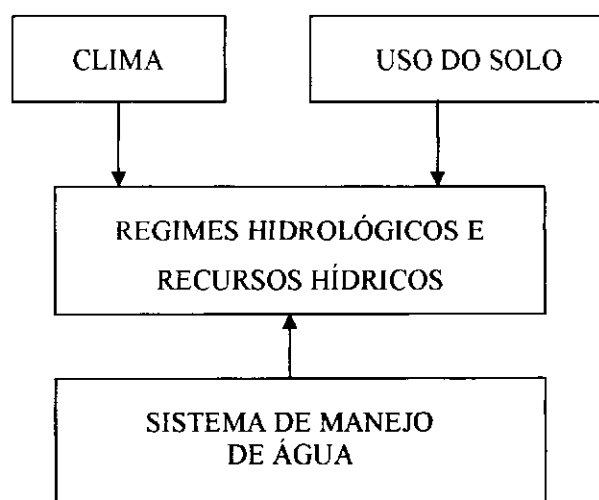


Figura 6.1 - Esquema para Avaliação de Impactos de Fatores de Clima e Uso do Solo sobre Recursos Hídricos (Arnell, 1996, apud Azevedo, 1999).

Os seguintes cenários podem ser construídos para efeito comparativo:

- Cenários isolados: consideram a variabilidade de um fator apenas (e.g., precipitação, temperatura, evaporação ou uso do solo);
- Cenários de fatores de clima em conjunto: consideram a variabilidade de mais de um fator climático (e.g., evaporação e precipitação);
- Cenários de fatores de clima e uso do solo conjuntos: consideram a variabilidade de todos os fatores (clima e uso do solo).

O estabelecimento de cenários com base na variabilidade de um ou mais fatores climáticos deve ser feita de modo a representar a real variação destes fatores. Deste modo, os cenários detalhados adiante foram estabelecidos considerando este aspecto.

#### **6.2.1. Cenários para a Simulação da Variabilidade da Precipitação**

Os cenários para simulação dos efeitos da variabilidade da precipitação foram determinados a partir da variabilidade natural da série. A variabilidade mensal da precipitação, obtida a partir da média regional na área de estudo, mostra que as precipitações variam bastante em relação à média. A partir dos dados observados, pôde-se arbitrar acréscimos e reduções uniformes sobre os valores diários em toda a série. Foram selecionados cinco cenários de simulações:  $\pm 60\%$ ,  $-73\%$ ,  $-30\%$  e  $+27\%$  em relação à média, os quais foram determinados em função da variabilidade da temperatura e evaporação como será explicado posteriormente.

#### **6.2.2. Cenários para a Simulação da Variabilidade da Evaporação**

A variabilidade da evaporação foi considerada através de um modelo de cálculo da evaporação baseado na temperatura e outros fatores. Para a região do estudo, foram



considerados os dados de fatores climáticos das estações de Campina Grande (1961-1990), Monteiro (1961-1990) e Ouro Velho (1973-1980).

Como mostrado anteriormente, existiram temperaturas máximas de até 31°C e mínimas de 18°C, sendo a temperatura média de 23,5°C. A partir daí cinco variações nas temperaturas mensais foram escolhidas: ±6°C, ±4°C e +0,5°C em relação à média. Outros fatores climáticos considerados foram a radiação, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar, os quais serviram para a estimativa da evapotranspiração utilizando três métodos (Chow et al., 1988): o método do balanço de radiação, o método aerodinâmico, e o método de Penman (método combinado da radiação e aerodinâmico).

#### a) Método da Radiação ou do Balanço de Energia

A evaporação é calculada em função da radiação líquida e do calor latente de vaporização pela equação:

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \rho_w} (86400) \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.1)$$

onde  $R_n$  é a radiação líquida em  $\text{W/m}^2$ ,  $l_v$  é o calor latente de vaporização ( $\text{J/Kg}$ ) dado por:

$$l_v = 2,501 \cdot 10^6 - 2370 \cdot T \quad (\text{J/kg}) \quad (6.2)$$

sendo  $T$  a temperatura do ar em °C e  $\rho_w$ , a massa específica da água ( $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

#### b) Método Aerodinâmico

No método aerodinâmico, a evaporação é dependente do déficit de saturação, da velocidade do vento e das condições de superfície, sendo dada por:

$$E_a = B(e_s - e_a) \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.3)$$

sendo  $e_s$  e  $e_a$ , as pressões de vapor nas condições saturada e atual, respectivamente, e B é dado por:

$$B = \frac{0,622k^2 \rho_a u_z}{p_b \rho_w \left[ \ln \left( \frac{z_2}{z_o} \right) \right]^2} 86,40 \quad (\text{mm/dia Pa}) \quad (6.4)$$

onde  $k$  é a constante de Von Karman ( $k = 0,4$ ),  $\rho_a$  é a massa específica do ar ( $1,2 \text{ g/m}^3$ ),  $u_z$  é a velocidade do vento (m/s) na altura  $z_2$  ( $z_2 = 200 \text{ cm}$ ),  $z_o$  (em cm) é a altura de rugosidade da superfície natural (Tabela 6.1),  $p_b$  é a pressão barométrica ( $p_b = 101,3 \text{ kPa}$ ),  $\rho_w$  é a massa específica da água ( $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ).

**Tabela 6.1 – Altura de Rugosidade para Diferentes Condições de Superfície.**

Tipo de Superfície	Altura de Rugosidade $z_o$ (cm)
Gelo, lama	0,001
Água	0,01 - 0,06
Gramma (acima de 10 cm de altura)	0,1 - 2,0
Gramma (de 10 a 50 cm de altura)	2 - 5
Vegetação (de 1 a 2 m de altura)	20
Árvores (10-15 m de altura)	40 - 70

Fonte: Chow et al., 1988

A pressão de saturação de vapor pode ser calculada por (Chow et al., 1988):

$$e_s = 611 e^{\left( \frac{17,27T}{237,3+T} \right)} \quad (\text{Pa}) \quad (6.5)$$

sendo T a temperatura do ar em °C. A pressão de vapor atual é calculada em função da umidade relativa do ar pela equação:

$$e_a = R_h \cdot e_s \quad (\text{Pa}) \quad (6.6)$$

onde  $R_h$  é a umidade relativa ( $0 \leq R_h \leq 1$ ).

### c) Método de Penman ou Combinado

O método Penman ou método combinado calcula a evaporação considerando os efeitos da radiação, do vento e das condições de superfície. Desse modo às equações 6.1 e 6.3 são combinadas, resultando na equação abaixo (Chow et al., 1988):

$$E = \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \right] \quad (\text{mm/dia}) \quad (6.7)$$

onde  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\gamma = 66,8 \text{ Pa/}^\circ\text{C}$ ) e  $\Delta$  é o gradiente da curva de pressão de saturação de vapor dado por:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(237,3 + T)^2} \quad (\text{Pa/}^\circ\text{C}) \quad (6.8)$$

Os métodos acima descritos têm por base fatores climáticos como temperatura, umidade e velocidade do vento, todos disponíveis para a região de estudo. Os resultados da aplicação dos três métodos (Balanço de Energia, Aerodinâmico e Penman), foram comparados com a evapotranspiração de referência  $ET_o$  (Azevedo, 1999; Chow et al, 1988), a qual pode ser obtida através da seguinte equação:

$$ET_o = k_t k_c E_t \quad (6.9)$$

onde  $k_t$  é o coeficiente de tanque classe A,  $k_c$  é o coeficiente da cultura e  $E_t$  é a evaporação do tanque classe A. Em todos os métodos foi utilizado um coeficiente de cultura unitário

( $k_c = 1$ ) para o cálculo da evapotranspiração e o valor de  $k_t$  na equação 6.9 foi tomado igual a 0,75, típico para a região de estudo.

Para a aplicação do balanço de radiação, a radiação líquida  $R_n$  foi calculada de maneira simplificada com base nos dados disponíveis de radiação global pela equação:

$$R_n = (1-\alpha)R_g \quad (\text{W/m}^2) \quad (6.10)$$

onde  $\alpha$  é o albedo e  $R_g$  a radiação global ( $\text{W/m}^2$ ). O valor do albedo foi calibrado, buscando-se aproximar a evapotranspiração calculada da observada tomada como a evapotranspiração de referência  $ET_o$ . O valor obtido no processo de calibração foi 0,23, o qual está em acordo com os valores observados para a região (em torno de 0,3).

Na aplicação do método aerodinâmico, o valor da altura de rugosidade da superfície ( $z_o$ ), foi calibrado, buscando-se uma aproximação entre a evapotranspiração calculada e a observada, tomada como a evapotranspiração de referência  $ET_o$ . O valor que melhor representou esta característica foi 0,63 cm, o qual está condizente com a região que é caracterizada por vegetação rasteira predominante, devido ao desmatamento.

Os valores da evapotranspiração observada e a calculada pelos três métodos são apresentados na Tabela 6.2. A Figura 6.2 mostra a comparação gráfica dos resultados obtidos e a Tabela 6.3 os coeficientes de determinação obtidos com as estimativas e os valores da evapotranspiração de referência.

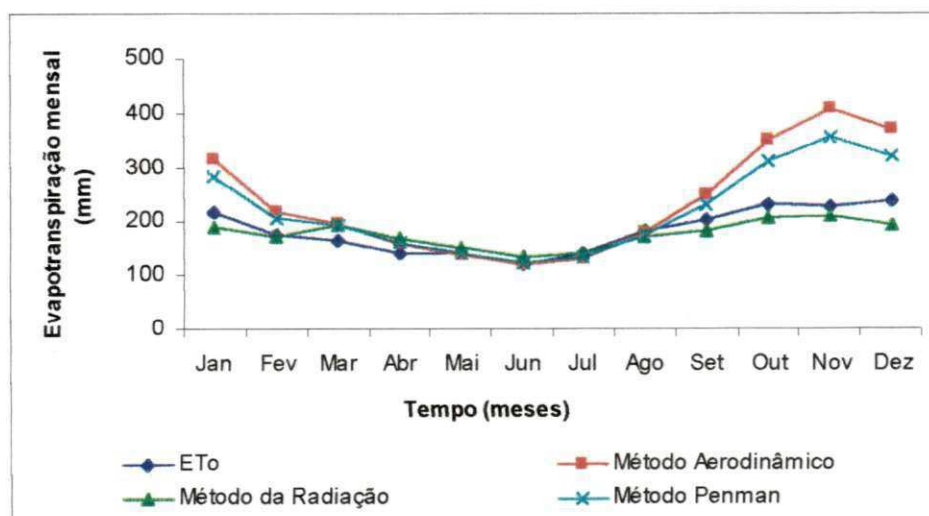
**Tabela 6.2 – Evapotranspiração Observada e a Calculada pelos Diferentes Métodos.**

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$ET_o$ (mm/mês)	220,1	178,0	165,7	142,0	141,1	121,4	140,8	182,8	205,6	231,1	230,7	239,6
$E_a$ (mm/mês)	317,2	220,1	196,7	160,8	139,4	120,4	132,1	178,9	250,8	351,8	409,8	371,1
$E_r$ (mm/mês)	190,0	174,4	192,9	170,1	153,7	136,6	143,2	173,0	184,2	207,0	210,1	193,8
$E$ (mm/mês)	283,4	208,0	195,7	163,3	143,2	124,7	135,0	177,3	233,2	313,4	356,8	324,0

**Tabela 6.3 – Coeficiente de Determinação entre a Evapotranspiração Observada e a Calculada pelas Diferentes Metodologias.**

Método	Coeficiente de Determinação ( $R^2$ )
Método Aerodinâmico (Ea)	0,936
Método da Radiação (Er)	0,797
Método de Penman (E)	0,934

Conforme se vê, os coeficientes de determinação obtidos com os métodos de Penman e Aerodinâmico são semelhantes. O método escolhido foi o de Penman que considera a combinação dos outros métodos analisados (Aerodinâmico e Radiação).



**Figura 6.2 - Evapotranspiração Observada e a Calculada pelos Métodos.**

Para avaliar o efeito da variabilidade da evapotranspiração, fez-se variar a temperatura acima e abaixo do valor médio conforme mostrado na Tabela 6.4. Para cada variação, a evapotranspiração foi calculada pelo método de Penman.

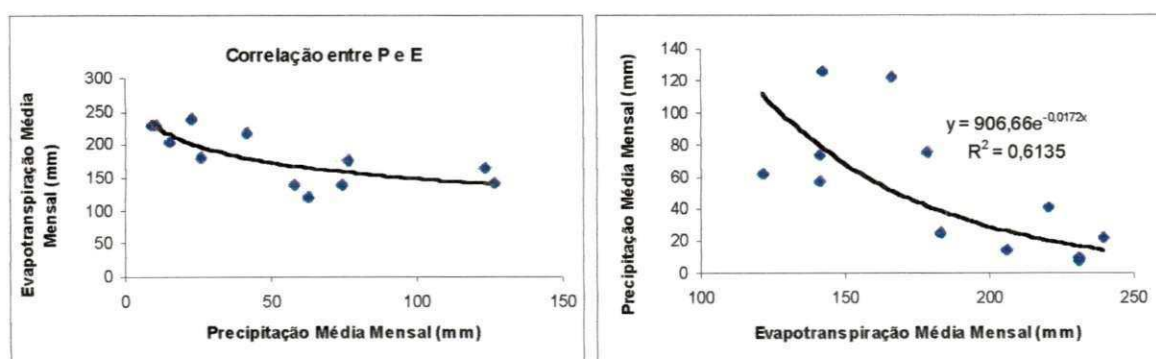
**Tabela 6.4 – Evapotranspiração (mm/dia) Calculadas a partir de Variações na Temperatura.**

$\Delta T$ (°C)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$T_m - 6^\circ\text{C}$	6,8	5,7	5,0	4,4	3,7	3,3	3,5	4,5	5,9	7,5	8,6	7,6
$T_m - 4^\circ\text{C}$	7,4	6,2	5,4	4,6	4,0	3,6	3,7	4,8	6,4	8,2	9,6	8,4
$T_m$	9,1	7,4	6,3	5,4	4,6	4,2	4,4	5,7	7,8	10,1	11,9	10,5
$T_m + 0,5^\circ\text{C}$	9,4	7,6	6,5	5,6	4,7	4,2	4,5	5,9	8,0	10,4	12,2	10,7
$T_m + 4^\circ\text{C}$	11,4	9,1	7,6	6,5	5,5	5,0	5,2	6,9	9,6	12,6	14,9	13,1
$T_m + 6^\circ\text{C}$	12,8	10,1	8,4	7,2	6,1	5,5	5,8	7,7	10,7	14,1	16,8	14,7

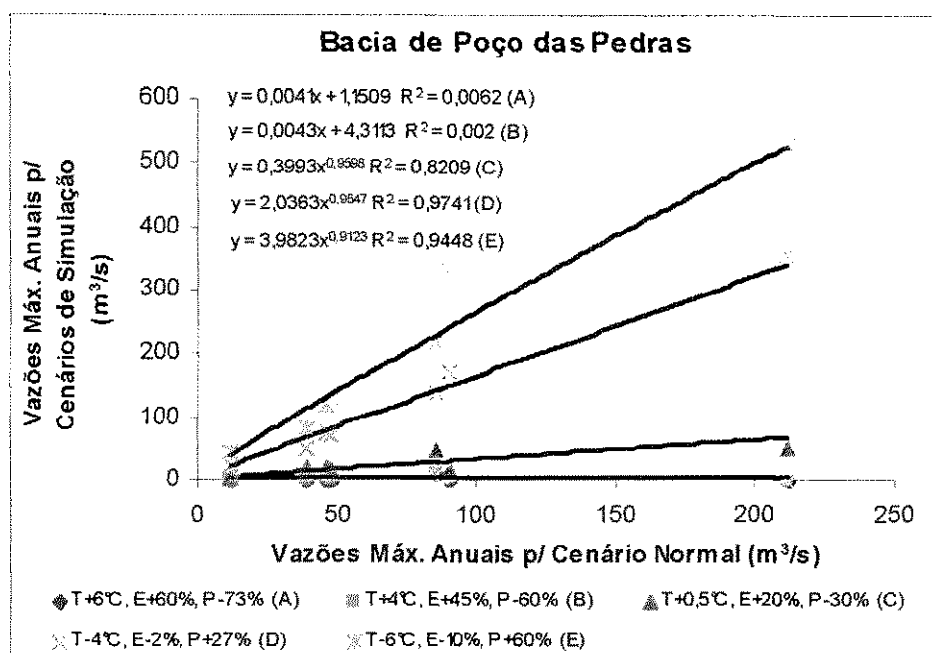
\*  $T_m$  = Temperatura Média

### 6.2.3. Cenários para as Simulações dos Efeitos dos Fatores de clima

Os cenários de clima são aqueles que incluem mudanças da precipitação e evaporação em conjunto. Para tanto, os dados destes dois fatores, na área estudada, foram correlacionados, isto é, dados de precipitações médias mensais de 80 postos pluviométricos e valores médios mensais de evapotranspiração potencial observados nas estações climatológicas de Monteiro, Ouro Velho e Campina Grande. A Figura 6.3 mostra o resultado obtido, o qual é condizente com a realidade haja vista que a evapotranspiração potencial aumenta com a diminuição da precipitação em consequência do déficit de saturação que é maior quando a precipitação é menor.



**Figura 6.3 - Correlação entre Precipitação e Evapotranspiração Potencial.**



**Figura 6.23 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**

### 6.5.3. Bacia de Caraúbas

Para a bacia de Caraúbas o efeito dos fatores de clima (precipitação e evaporação), em conjunto, sobre o escoamento simulado foi também significativo. O efeito conjunto destes fatores mostra um aumento médio máximo de até 338% no volume escoado e diminuição média máxima acima de 99% no mesmo (Tabela 6.27). Para as vazões máximas nota-se um aumento médio máximo de até 210% e diminuição média máxima de quase 100% (Tabela 6.28). Observa-se também para esta bacia um maior efeito sobre os volumes escoados do que nas vazões máximas, seguindo o comportamento dos cenários de simulação anteriores. Percebe-se mais uma vez que, para redução na temperatura (diminuição na evaporação) e acréscimo na precipitação existe um maior aumento no escoamento do que um decréscimo no volume escoado na situação inversa.

**Tabela 6.27 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**

Ano	Bacia de Caraúbas - 5.168 km <sup>2</sup>				
	$(V_{P-73\%, E+60\%}) / (V_n)$	$(V_{P-60\%, E+45\%}) / (V_n)$	$(V_{P-30\%, E+20\%}) / (V_n)$	$(V_{P+27\%, E-2\%}) / (V_n)$	$(V_{P+60\%, E-10\%}) / (V_n)$
1973	0,000	0,056	0,379	1,970	3,871
1974	0,004	0,018	0,102	2,549	5,378
1975	0,004	0,089	0,414	2,239	5,190
1976	0,022	0,135	0,408	1,817	3,243
1977	0,008	0,020	0,135	2,421	5,306
1978	0,000	0,013	0,260	2,059	4,280
1979	0,000	0,070	0,369	1,838	3,254
1982	0,000	0,000	0,242	2,338	4,558
<b>Média</b>	<b>0,005</b>	<b>0,050</b>	<b>0,289</b>	<b>2,154</b>	<b>4,385</b>

**Tabela 6.28 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**

Ano	Bacia de Caraúbas - 5.168 km <sup>2</sup>				
	$(Q_{P-73\%, E+60\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P-60\%, E+45\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P-30\%, E+20\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P+27\%, E-2\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P+60\%, E-10\%}) / (Q_n)$
1973	0,000	0,089	0,473	1,729	2,589
1974	0,011	0,039	0,257	2,543	5,333
1975	0,000	0,111	0,475	1,664	2,721
1977	0,006	0,015	0,112	1,786	2,941
1978	0,000	0,023	0,445	2,120	3,843
1979	0,000	0,098	0,543	1,464	2,063
1981	0,000	0,033	0,423	1,529	2,236
<b>Média</b>	<b>0,003</b>	<b>0,058</b>	<b>0,390</b>	<b>1,834</b>	<b>3,104</b>

Nas Figuras 6.24 e 6.25 são mostradas comparações entre valores simulados nos diferentes cenários de simulação para a bacia de Caraúbas, explicitando as correlações não-lineares existentes nos processos intrínsecos da bacia hidrográfica representados pelas tendências, seguidas pelo diversos cenários de simulação da variabilidade do clima (incluem os efeitos de temperatura, evaporação e precipitação).



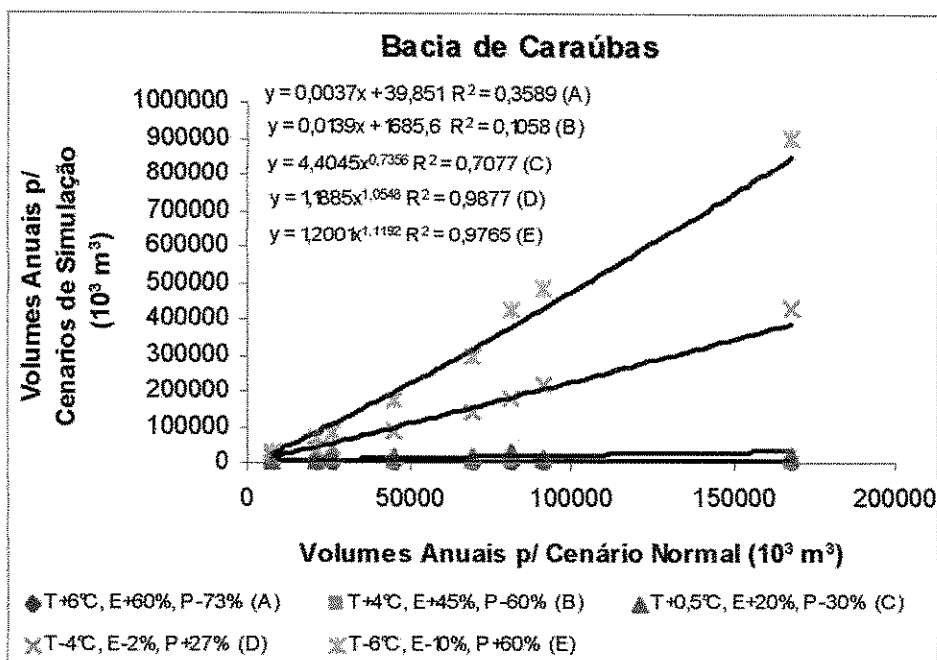


Figura 6.24 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.

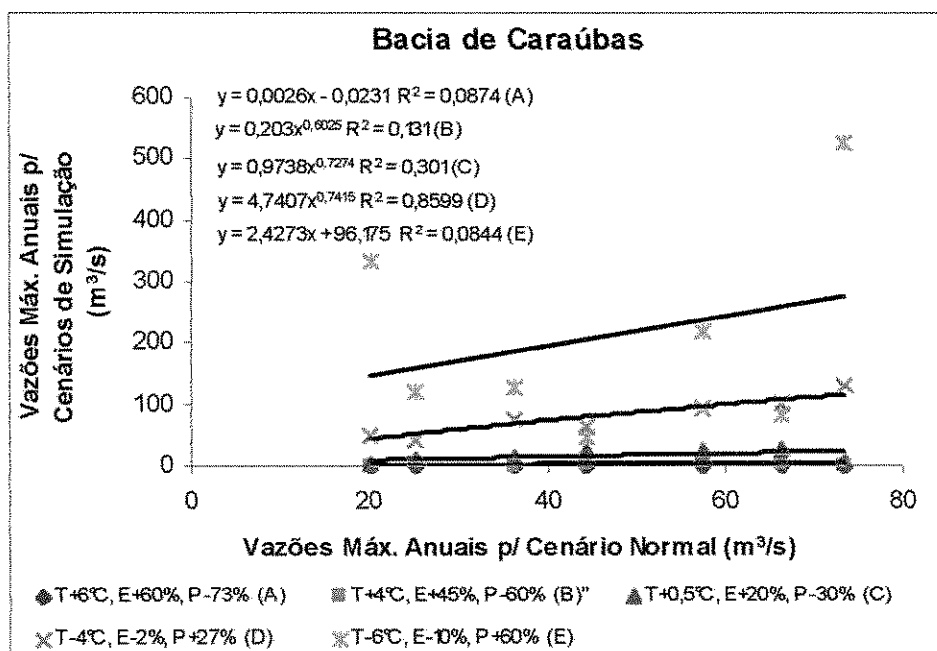


Figura 6.25 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.

#### 6.5.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras

Para a bacia de Boqueirão de Cabaceiras os fatores de clima (precipitação e evaporação), em conjunto, também afetaram significativamente o escoamento simulado. O efeito conjunto destes fatores mostra um aumento médio máximo de até 405% no volume escoado e diminuição média máxima de quase 100% no mesmo (Tabela 6.29). Para as vazões máximas nota-se um aumento médio máximo de até 361% e diminuição média máxima de 99,4% (Tabela 6.30). Percebe-se também que o efeito mais forte ocorre nos volumes escoados do que nas vazões máximas, seguindo o comportamento dos cenários anteriores. Observa-se também que para diminuição na temperatura (redução na evaporação) e aumento na precipitação existe um maior acréscimo no escoamento do que um decréscimo no volume escoado na situação inversa.

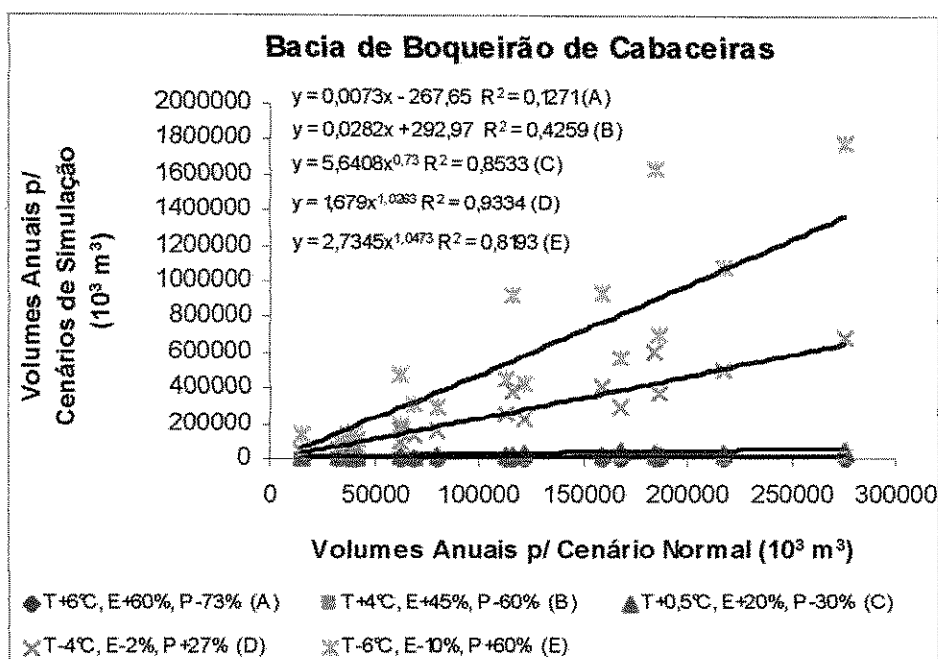
**Tabela 6.29 – Relação V/Vn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**

Ano	Bacia de Boqueirão de Cabaceiras - 12.377 km <sup>2</sup>				
	(V <sub>P-73%, E+60%</sub> )/V <sub>n</sub>	(V <sub>P-60%, E+45%</sub> )/V <sub>n</sub>	(V <sub>P-30%, E+20%</sub> )/V <sub>n</sub>	(V <sub>P+27%, E-2%</sub> )/V <sub>n</sub>	(V <sub>P+60%, E-10%</sub> )/V <sub>n</sub>
1923	0,000	0,107	0,429	1,733	2,920
1924	0,000	0,010	0,157	2,305	4,937
1925	0,000	0,000	0,191	2,125	4,580
1927	0,000	0,070	0,388	1,685	3,132
1929	0,000	0,052	0,343	2,778	7,613
1934	0,000	0,030	0,238	3,300	7,940
1935	0,000	0,000	0,406	3,205	9,591
1937	0,000	0,001	0,307	1,931	3,474
1939	0,000	0,013	0,297	2,161	3,954
1940	0,003	0,031	0,202	2,504	6,450
1941	0,000	0,006	0,258	1,860	3,001
1945	0,005	0,037	0,193	2,604	5,812
1946	0,018	0,061	0,327	2,042	3,703
1947	0,000	0,021	0,236	3,327	8,819
1948	0,004	0,052	0,343	1,791	3,377
1949	0,000	0,019	0,237	2,252	4,087
1950	0,034	0,055	0,145	2,035	3,726
1952	0,000	0,009	0,256	2,062	3,759
<b>Média</b>	<b>0,004</b>	<b>0,032</b>	<b>0,275</b>	<b>2,317</b>	<b>5,049</b>

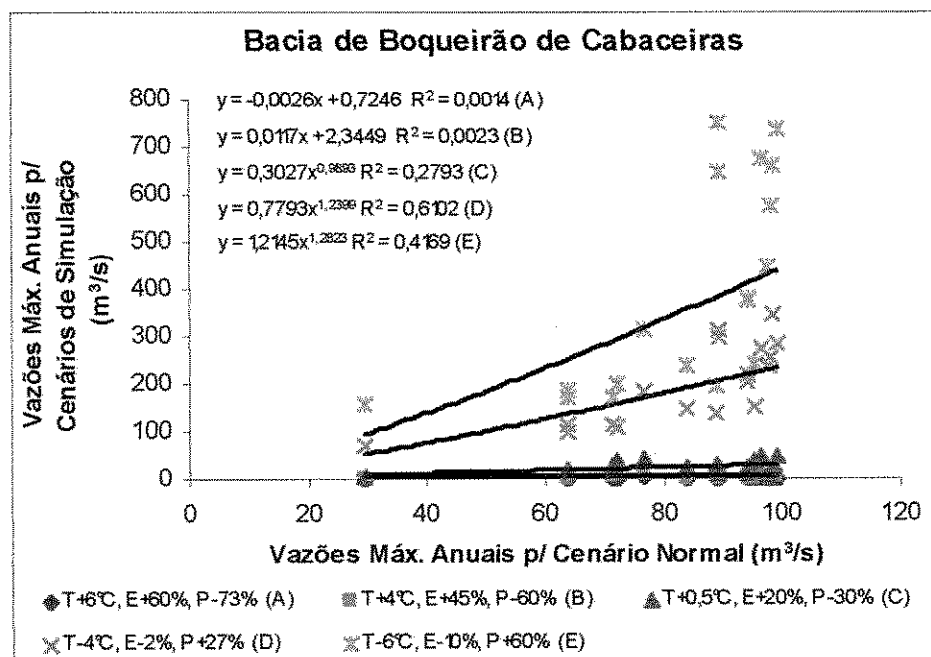
**Tabela 6.30 – Relação Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**

Ano	Bacia de Boqueirão de Cabaceiras - 12.377 km <sup>2</sup>				
	$(Q_{P-75\%, E+60\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P-60\%, E+45\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P-30\%, E+20\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P+27\%, E-2\%}) / (Q_n)$	$(Q_{P+60\%, E-10\%}) / (Q_n)$
1923	0,000	0,052	0,334	1,539	2,175
1925	0,000	0,000	0,276	1,589	2,695
1926	0,000	0,007	0,169	2,613	5,870
1927	0,000	0,005	0,281	1,746	2,858
1929	0,057	0,216	0,564	2,439	4,069
1931	0,000	0,044	0,423	1,612	2,378
1934	0,000	0,003	0,186	3,343	8,413
1935	0,000	0,027	0,285	3,521	7,252
1937	0,000	0,000	0,113	2,441	4,601
1938	0,000	0,015	0,304	1,758	2,919
1941	0,000	0,004	0,139	2,340	4,049
1943	0,000	0,000	0,208	2,444	5,299
1945	0,000	0,021	0,400	1,593	2,538
1946	0,029	0,139	0,526	1,518	2,745
1947	0,000	0,065	0,476	2,900	7,444
1948	0,001	0,065	0,499	2,854	6,998
1950	0,026	0,056	0,291	3,539	6,754
1952	0,000	0,000	0,246	2,155	3,976
<b>Média</b>	<b>0,006</b>	<b>0,040</b>	<b>0,318</b>	<b>2,330</b>	<b>4,613</b>

Nas Figuras 6.26 e 6.27 são mostradas comparações entre valores simulados nos diferentes cenários de simulação para a bacia de Taperoá, explicitando as correlações não-lineares existentes nos processos intrínsecos da bacia hidrográfica representados pelas tendências, seguidas pelo diversos cenários de simulação da variabilidade do clima (incluem os efeitos de temperatura, evaporação e precipitação).



**Figura 6.26 - Comparação Entre os Volumes Anuais Simulados nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**



**Figura 6.27 - Comparação Entre as Vazões Máximas Anuais Simuladas nos Diferentes Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima.**

## 6.6. Simulação dos Efeitos da Variabilidade do Clima e Uso do Solo

Conforme foi discutido no item 6.2.4 a análise dos efeitos da variabilidade do clima e uso do solo foi feita considerando-se a variabilidade nos valores CN, determinada com base nos valores dos anos secos e úmidos em relação aos valores dos anos normais. A variabilidade da evapotranspiração não foi considerada neste caso por apresentar pequeno efeito sobre os resultados (ver itens anteriores).

### 6.6.1. Bacia de Taperoá

A precipitação e uso do solo em conjunto levaram a uma variação dos volumes e vazões máximas anuais nos anos secos (Tabela 6.31) e úmidos (Tabela 6.32) em relação aos valores simulados nos anos normais da ordem de  $0,55 < V/V_n < 1,016$  e  $0,39 < Q/Q_n < 1,528$  em média. Como pode ser visto, os maiores efeitos foram nas vazões máximas.

**Tabela 6.31 - Relação  $V/V_n$  e  $Q/Q_n$  para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).**

Ano	Bacia de Taperoá - 618 km <sup>2</sup>	
	V/V <sub>n</sub>	
1937	0,909	
1939	0,480	
1941	0,161	
1946	0,390	
1952	0,795	
<b>Média</b>	<b>0,547</b>	
Ano	Q/Q <sub>n</sub>	
1937	0,742	
1938	0,020	
1941	0,554	
1943	0,125	
1946	0,550	
<b>Média</b>	<b>0,390</b>	

**Tabela 6.32 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).**

Ano	Bacia de Taperoá - 618 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1924	1,057	
1940	0,975	
Média	1,016	
Ano	Q/Qn	
1926	1,528	

#### 6.6.2. Bacia de Poço das Pedras

Para esta bacia, as variações nos volumes (Tabela 6.33 para anos secos) e vazões máximas anuais (Tabela 6.34 para anos úmidos) foram de  $0,165 < V/Vn < 1,046$  e  $0,431 < Q/Qn < 2,523$  em média.

**Tabela 6.33 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).**

Ano	Bacia de Poço das Pedras - 3.260 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1976	0,313	
1979	0,044	
1982	0,137	
Média	0,165	
Ano	Q/Qn	
1979	0,204	
1981	0,658	
Média	0,431	

**Tabela 6.34 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).**

Ano	Bacia de Poço das Pedras - 3.260 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1974	1,063	
1977	1,030	
Média	1,046	
Ano	Q/Qn	
1974	1,507	
1977	3,538	
Média	2,523	

### 6.6.3. Bacia de Caraúbas

Para Caraúbas, as variações nos volumes (Tabela 6.35 para anos secos) e vazões máximas anuais (Tabela 6.36 para anos úmidos) foram de  $0,282 < V/Vn < 1,152$  e  $- < Q/Qn < 1,179$  em média. O limite inferior da relação Q/Qn não existe devido a grande incoerência dos resultados em consequência da qualidade dos dados.

**Tabela 6.35 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).**

Ano	Bacia de Caraúbas - 5.168 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1976	0,400	
1979	0,329	
1982	0,116	
Média	0,282	
Ano	Q/Qn	
1979	-	
1981	-	
Média	-	

- valores desconsiderados devido a grande incoerência dos resultados

**Tabela 6.36 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).**

Ano	Bacia de Caraúbas - 5.168 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1974	1,057	
1977	1,246	
Média	1,152	
Ano	Q/Qn	
1974	0,511	
1977	1,846	
Média	1,179	

#### 6.6.4. Bacia de Boqueirão de Cabaceiras

A precipitação e uso do solo em conjunto levaram a uma variação dos volumes e vazões máximas anuais nos anos secos (Tabela 6.37) e úmidos (Tabela 6.38) em relação aos valores simulados nos anos normais da ordem de  $0,639 < V/Vn < 1,303$  e  $0,65 < Q/Qn < 1,149$ . Nestes valores, alguns anos foram desconsiderados devido à inconsistência nos resultados encontrados em consequência da qualidade dos dados.



**Tabela 6.37 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos Secos).**

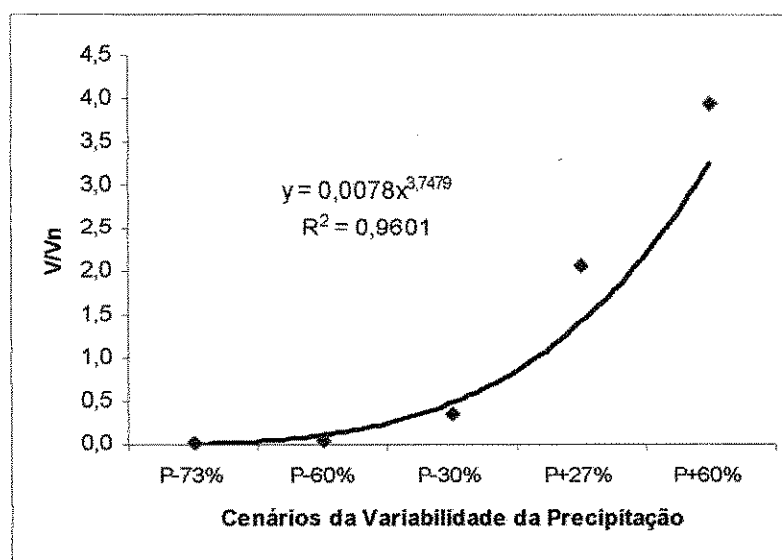
Ano	Bacia de Boqueirão de Cabaceiras - 12.377 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1937	1,241	
1939	0,379	
1941	0,336	
1946	0,414	
1952	0,824	
<b>Média</b>	<b>0,639</b>	
Ano	Q/Qn	
1938	0,748	
1943	0,346	
1946	0,844	
<b>Média</b>	<b>0,650</b>	

**Tabela 6.38 - Relação V/Vn e Q/Qn para os Cenários de Simulação da Variabilidade do Clima e Uso do solo (Anos úmidos).**

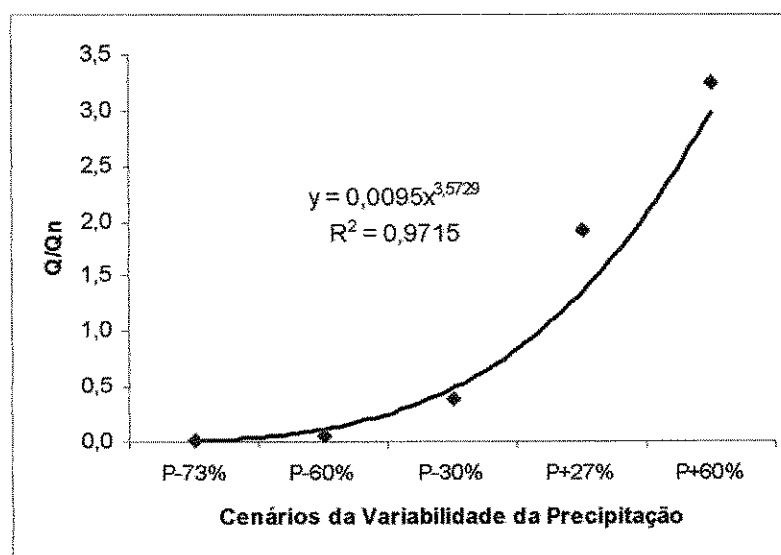
Anos úmidos	Bacia de Boqueirão de Cabaceiras - 12.377 km <sup>2</sup>	
	V/Vn	
1924	1,240	
1940	1,365	
<b>Média</b>	<b>1,303</b>	
Ano	Q/Qn	
1926	1,149	

## 6.7. Resultados Regionais

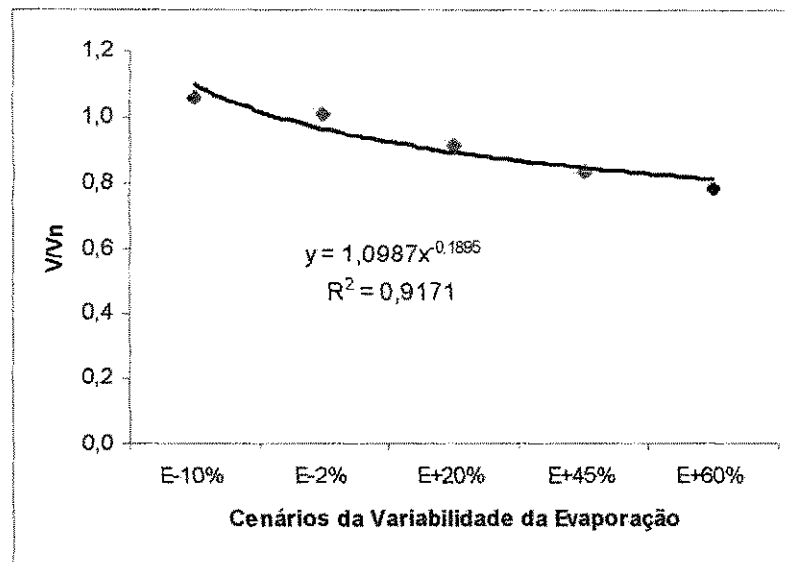
Os resultados regionais são as médias das simulações das bacias (Taperoá, Poço das Pedras, Caraúbas e Boqueirão de Cabaceiras). Assim, pode-se ter idéia do comportamento regional em cada um dos cenários de simulação tanto com relação à variação média dos volumes anuais como em relação à variação média das vazões máximas anuais. Os resultados regionais são apresentados nas Figuras 6.28 a 6.33. Verifica-se que existe uma forte correlação entre as variações dos fatores climáticos e as variações de volumes e vazões máximas anuais.



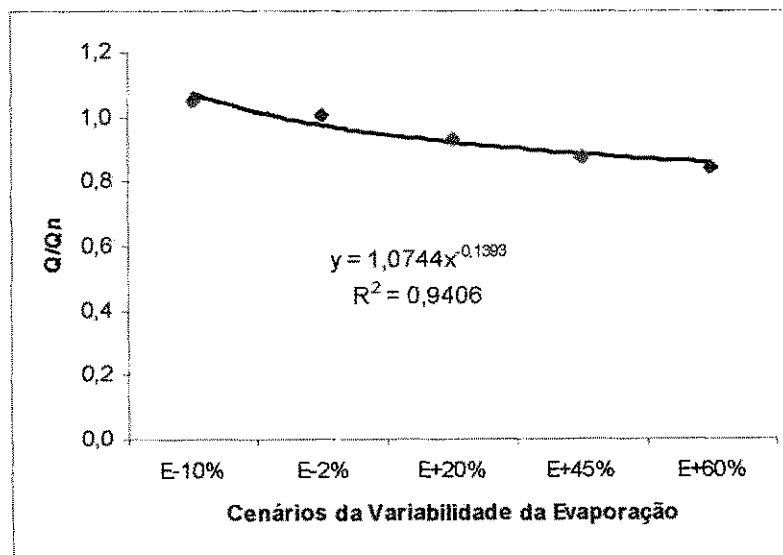
**Figura 6.28 - Relação Entre V/Vn Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Precipitação.**



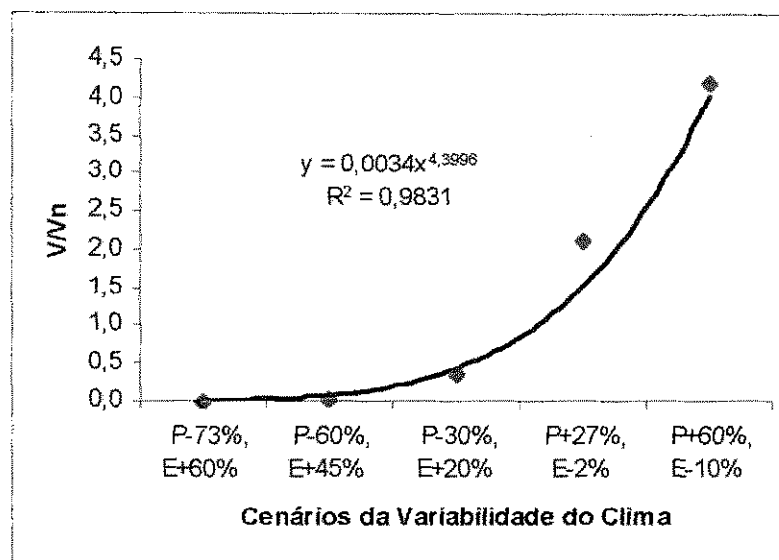
**Figura 6.29 - Relação Entre Q/Qn Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Precipitação.**



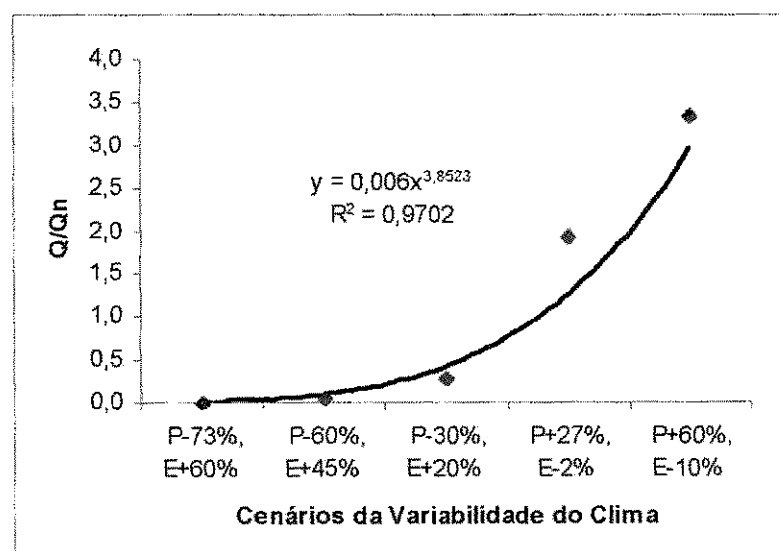
**Figura 6.30 - Relação Entre  $V/V_n$  Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Evaporação.**



**Figura 6.31 - Relação Entre  $Q/Q_n$  Médio Regional e os Cenários da Variabilidade da Evaporação.**



**Figura 6.32 - Relação Entre  $V/V_n$  Médio Regional e os Cenários da Variabilidade do Clima.**



**Figura 6.33 - Relação Entre  $Q/Q_n$  Médio Regional e os Cenários da Variabilidade do Clima.**

Comparando-se as Figuras de 6.28 a 6.33 observa-se, graficamente, a grande influência da precipitação sobre o escoamento simulado nos cenários. Este efeito é comprovado pela grande influência da precipitação no cálculo do escoamento no modelo NAVMO.

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Estudos avaliando os efeitos da variabilidade do clima e uso do solo em conjunto ainda são incipientes no Nordeste do Brasil e devem ser realizados. Este trabalho buscou avaliar efeitos tanto isolados quanto em conjunto de fatores climáticos e do uso do solo sobre o escoamento simulado na bacia do Alto Paraíba (~14.000 km<sup>2</sup>), localizada no Cariri paraibano, através de um modelo hidrológico distribuído capaz de captar a variabilidade destes fatores. Para tanto, o modelo foi calibrado e validado para a região sendo criados cenários onde foram inseridas variações destes fatores e foi possível comprovar quem mais influenciava o escoamento.

#### 7.1. Conclusões

As principais conclusões advindas deste trabalho são:

- a) Com relação a calibração do modelo, pode-se concluir, com base nos resultados, que:
  - De um modo geral, as simulações feitas com o modelo, em termos dos volumes e vazões máximas anuais compararam bem com as observações em cada uma das bacias estudadas. Os coeficientes de determinação tanto para os volumes quanto para as vazões foram expressivos ( $R^2 > 0,6$ );
  - As distribuições temporais das vazões diárias simuladas (hidrogramas) também compararam bem, no entanto algumas defasagens no tempo foram observadas, quando os picos foram analisados.

- b) Com relação a avaliação do efeito de escala sobre os parâmetros do modelo NAVMO (ALFA, EET e CN) pode-se concluir que:
- ALFA e CN variam inversamente com escala da bacia, tanto no ajuste dos volumes, quanto no ajuste das vazões máximas;
  - Com relação a ALFA, os valores diminuem com o aumento do índice pluviométrico anual, devido ao solo apresentar maior índice de umidade nos anos mais chuvosos;
  - Com relação a escala ALFA diminui devido ao amortecimento do escoamento com o aumento da área da bacia;
  - A diminuição dos valores CN com o aumento da área da bacia é devida a maior heterogeneidade (clima e solo) e perdas na propagação do escoamento nas escalas maiores;
  - Em relação a pluviometria anual, os valores CN são menores para os anos secos do que para os anos normais e úmidos devido ao menor armazenamento e conseqüentemente maior infiltração de água no solo em anos pouco chuvosos;
  - Com relação ao parâmetro EET verificou-se que o mesmo varia pouco entre as escalas da bacia, porém apresenta um aumento gradual com o aumento da área. Isto é devido ao fato de que, a ocorrência de cobertura vegetal aumenta nas áreas maiores e, por conseguinte, a evapotranspiração;
  - Com relação a pluviometria, EET diminui nos anos úmidos devido ao menor déficit de saturação em anos chuvosos;

c) Em relação aos efeitos da variabilidade do clima e do uso do solo sobre o escoamento (vazões máximas e volumes anuais), conclui-se que:

- Individualmente o fator que mais afetou o escoamento foi a precipitação, nos anos secos a capacidade de armazenamento do solo aumenta, diminuindo, por conseguinte, o escoamento enquanto que, nos anos úmidos ocorre o inverso. Para a região do estudo, as variações médias relativas, nos volumes e vazões máximas anuais, foram:

$$\text{Volume anual: } 0,012 < V/V_n < 3,94$$

$$\text{Vazão máxima anual: } 0,013 < Q/Q_n < 3,25;$$

- A evapotranspiração foi o fator que menos influiu no escoamento; para uma maior cobertura vegetal, a evapotranspiração aumenta e causa uma diminuição do escoamento, porém relativamente bem menor do que nos casos da precipitação e do uso do solo, devido a quase linearidade do processo. As variações médias relativas para os volumes e vazões máximas anuais na região de estudo foram:

$$\text{Volume anual: } 0,79 < V/V_n < 1,06$$

$$\text{Vazão máxima anual: } 0,85 < Q/Q_n < 1,05;$$

- A evapotranspiração e a precipitação consideradas em conjunto teve um efeito significativo nos volumes e vazões máximas simuladas, e resultou nas seguintes variações:

$$\text{Volume anual: } 0,005 < V/V_n < 4,19$$

$$\text{Vazão máxima anual: } 0,009 < Q/Q_n < 3,36;$$

- Para as precipitações naturais nos anos secos e úmidos e variações correspondentes dos valores CN, levaram as seguintes relações:

$$\text{Volume anual: } 0,41 < V/V_n < 1,13$$

$$\text{Vazão máxima anual: } 0,49 < Q/Q_n < 1,6$$

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. e Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System - *Système Hydrologique Européen*, "SHE", 1: History and Philosophy of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *J. Hydrol.*, 87: 45-59.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. e Rasmussen, J. (1986b). An Introduction to the European Hydrological System - *Système Hydrologique Européen*, "SHE", 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *J. Hydrol.*, 87: 61-77.
- Azevedo, J. R. G. (1999). Water Resources and Global Warming for the São Francisco River in Brazil. PhD Thesis. University of Southampton, Department of Civil Engineering, Southampton, UK.
- Albuquerque, J. P. T., Galvão, C. O (2001). Participação da Sociedade na Crise 1998-2000 no Abastecimento D'Água de Campina Grande-PB, Brasil. IV Diálogo Interamericano de Gerenciamento de Águas, ABRH/IWRA – Foz do Iguaçu – PR.
- Bathurst, J. C. (1986a). Physically-Based Distributed Modelling of an Upland Catchment Using the *Système Hydrologique Européen*. *J. Hydrol.*, 87: 79-102. ✓
- Bathurst, J. C. (1986b). Sensitivity Analysis of the *Système Hydrologique Européen* for an Upland Catchment. *J. Hydrol.*, 87: 103-123. ✓
- Bathurst, J. C., Wicks, J. M., and O'Connell, P. E. (1995). The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System. In: V.P. Singh (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States. ✓
- Bathurst, J. C., Kilsby, C., White, S. (1996). Modelling the Impacts of Climate and Land-Use Change on Basin Hydrology and Soil Erosion in Mediterranean Europe. In: Brandt, C. J., Thornes, J. B. *Mediterranean Desertification and Land Use*. John Wiley & Sons, Ltd. P. 355-387.



- Bogardi, I., Matyasovszky, I., Bardossy, A., Duckstein, L. (1994). Estimation of Local and Areal Drought Reflecting Climate Change. *Journal of American Society of Agricultural Engineers*. v. 37, n. 6, p. 1771-1781.
- Braga, A. C. F. M. (2001). Efeitos de Fatores Climáticos e do Uso do Solo sobre o Escoamento em uma Região Semi-Árida da Paraíba. Tese de mestrado, Depto. Enga. Civil, CCT/UFPB, Campina Grande- PB.
- Braga, A. C. F. M. e Figueiredo, E. E. (2000). Necessidade de Avaliação dos Efeitos das Variações do Clima e Uso do Solo sobre o Escoamento nas Bacias do Semi-Árido Nordeste. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, v. 01, Sessão II, Art. 019, p. 683-689. Natal-RN.
- Cadier, E. and Freitas, B. J. (1982). Bacia Representativa de Sumé. Primeira Estimativa de Água. Série Hidrologia No. 14, SUDENE, Recife, PE, Brasil.
- Cadier, E. (1996). Hydrologie des Petits Bassins du Nordeste Brésilien Semi-Aride: Tupologie dès Bassins et Transposition Écoulements Annuels. *J. Hydrol.*, 182: 117-141.
- Chiew, F. H. S., Whetton, P. H., McMahon, T. A., Pittock, A. B. (1995). Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*. N. 167, p. 121-147.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. Tokyo, McGraw-Hill, New York, 680p.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. e Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering, Singapore, 572p.
- Conway, D., Krol, M., Alcamo, J., Hulme, M. (1996). Future Availability of Water in Egypt: the Interaction of Global, Regional, and Basin Scale Driving Forces on the Nile Basin. *Ambio*. v. 25, n. 5, p. 336-342.
- Cruz, H. P. Coimbra, R. M., Freitas, M. A. V. (1999). Vulnerabilidade Climática e Recursos Hídricos no Nordeste. In: Freitas, M. A. V. (org.). *O Estado das Águas no Brasil: Perspectivas de Gestão e Informação de Recursos Hídricos*. Ministério Público (ANEEL, MME, MMA, OMM), Programa das Nações Unidas para o desenvolvimento.
- Cunha, L. V., Oliveira, R., Nunes, V. (2002). Water Resources, in Santos Forbes, e Moita, 2002.

- Diniz, L. S. (1994). Calibração Automática de modelos Chuva-Vazão Usando um Algoritmo Genético. Campina Grande. Tese (Mestre em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.
- Ewen, J., Parkin, G. (1996). Validation of Catchment Models for Predicting Land Use and Climate Change Impacts – 1. Method. *Journal of Hydrology*, v. 175, p. 583-594.
- Figueiredo, E.E., Overland, H. e Kleeberg, H.B. (1991). O Modelo NAVMO de Simulação do Escoamento Superficial. IX Simpósio Bras. de Rec. Hídricos, pp 337-346, Rio de Janeiro.
- Figueiredo, E.E., Srinivasan, V.S., Barros, M.G. (1993). Análise do Problema de Enchimento do Açude Público Sumé através do modelo NAVMO. X Simpósio Bras. de Rec. Hídricos, pp 226-235, Gramado.
- Figueiredo, E. E. (1998). Scale Effects and Land Use Change Impacts in Sediment Yield Modelling in a Semi-Arid Region of Brazil. PhD Thesis. Universidade de Newcastle upon Tyne, England.
- Figueiredo, E.E., Lopes, P.L e Srinivasan, V.S. (1999). Calibração e Validação de um Modelo Distribuído para a Bacia do Rio Piancó - PB. CDROM do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.
- Figueiredo, E.E. e Srinivasan, V.S. (1999) Avaliação dos Impactos do Uso do Solo e da Influência dos Açudes sobre o Escoamento para o Açude Sumé - PB. CDROM do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.
- Figueiredo, E. E., Braga, A. C. M. F. (2002). Modelling the rainfall-runoff relationship for the Piranhas river basin in the semiarid region of Brazil. *Flood Defence '2002*, Wu *et al.* (eds) © 2002 SciencePress, New York Ltd., ISBN 7-03-008310-5.
- Fleming, G. (1987). Deterministic Models in Hidrology. Roma, FAO, 80p.
- Fread, D. L. (1985). Channel Routing. In: *Hydrological Forecasting*. Anderson, M. G., Burts, T. P. (editors). John Willey & Sons. Londres. U. K.
- Gomes Filho, M. F., Aragão, J. O., Srinivasan, V.S. (1999). Relações entre as TSM's Globais e os Volumes dos Principais Reservatórios de Água da Paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 3, n. 1, p. 74-81.

- Green, W. H. & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics, 1. The Flow of Air and Water Through Soils. *Journal Agr. Sci.*, 4(1): 1-24.
- Hastenrath, S., Heller, L. (1997). Dynamics of Climate Hazards in Northeast Brazil. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. London. V. 103, p. 77-92. (apud).
- Hulme, M., Sheard, N. (1999) Cenários de Alterações Climáticas para o Brasil. Climate Research Unit, Norwich, Reino Unido. Disponível on-line em: <http://www.cru.uea.ac.uk> . 25 Mai 2003.
- IPCC, (1995). The Science of Climate Change. Contribution of Working group I to the second assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Houghton, J.T., Meira Filho, L. G., Callender, B. A. et al. Cambridge University Press, U.K., p. 572. Disponível on -line em: <http://www.ipcc.ch/pub/sarsum1.htm> . 27 Mai 2003.
- King, K. W., Arnold, J. G., Williams, J. R., Srinivasan R. (1996). *Soil and Water Assessment Tool – SWAT*. USDA, Agricultural Research Service. 450p.
- Kite, G. W , Waititu, J. K. (1981). Effects of Changing Precipitation and Evaporation on Nzoia River Flows and Lake Victoria Levels, Contribution to the World Climate Program, report, 5 pp., World Meteorol. Org., Geneva.
- Kite, G. W. (1993). Application of a Land Class Hydrological Model to Climatic Change. *Water Resources Research*. V. 29, n. 7, p. 2377-2384.
- Kleeberg, H. B., Overland, H. e Paus, B. (1989). NAVMO, Version 1.1, Nieseschlag – Abfluss – Verdunstung Modell. Documentation. Universität der Bundeswehr München, Alemanha.
- Klemes, V. (1986). Operation Testing of Hydrological Simulation Models. *Hydrological Sciences Journal*, 31, 1, 13-24.
- Lacerda Júnior, H. B. (2002). Um Estudo dos Efeitos de Escala e Uso do Solo na Parametrização do Modelo NAVMO com Dados de Bacias do Cariri Paraibano. Dissertação de Mestrado, DEC/CCT/UFPB.
- Lal, R., (1983). Deforestation of tropical rainforest and hydrological problems. *Tropical Agricultural Hydrology*, R. Lal e E. W. Russell (eds.) J. Wiley, New York, 131-140.

- Lopes, P. L. (1994). Avaliação do Escoamento Superficial da Bacia do Rio Piancó Utilizando o Modelo NAVMO. Tese de Mestrado, Dept. Eng. Civil, CCT/UFPB, Campina Grande, Pb.
- Lopes, W.T.A. (2003). Efeitos de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-árida da Paraíba. Campina grande. Tese (Mestre em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2003.
- Lorup, J. K., Resfsgaard, J. C., Mazvimavi, D. (1998). Assessing the Effect of Land Use Change on Catchment Runoff by Combined Use of Statistical Tests and Hydrological Modelling: Case Studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*. v. 205 p. 147-163.
- McCuen, R.H. (1982). A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods, Univ. of Maryland, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- McCullock, J. S. G., Robinson, M. (1993). History of Forest Hydrology. *Journal of Hydrology*. v. 150. p. 189-216.
- Medeiros, Y. (1994). Modelling the Hydrological Impacts of Climatic Change on a Semi-Arid Region. Newcastle. PhD Thesis. University of Newcastle Upon Tyne, Department of Civil Engineering, Newcastle, 1994.
- Mediondo, E. M., Tucci, C. E. M. (1997). Escalas Hidrológicas. I. Conceitos. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. v. 2, n. 1, p. 59-79, jan/jun.
- Nemec, J., Schaake, J. (1982). Sensitivity of Water Resources Systems to Climate Variation. *Hydrology Science Journal*. v. 27, n. 3, p. 327-343. (apud).
- Oliveira, M. Q. C., Medeiros, Y. D. P. (2001). Aplicação do Modelo SWAT na Avaliação de Impactos Decorrentes da Modificação no Uso do Solo em Bacias Hidrográficas. CDROM do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte – MG.
- Paraíba, Governo do Estado. (1997). Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba, Diagnóstico do Estado – Estudos de Base da Bacia do Alto Paraíba. SCIENTEC. João Pessoa/PB. Em CD-ROM.
- Printchet, W. L. (1979). Properties and Management of Forest Soils. John Wiley, New York, 500p.

- Refsgaard, J. C., Alley, W. M., Vuglinsky, V. S., (1989). Methods for Distinguishing Between Man's Influence and Climatic Effects on The Hydrological Cycle. IHP-III Project 6.3. Unesco, Paris.
- Ribot, J. C., Najam, A., Watson, G. (1996). Climate Variation, Vulnerability and Sustainable Development in the Semi-Arid Tropics. In: Ribot, J.C., Magalhães, A. R., Panagides, S.S. (editors). *Climate variability, Climate Change and Social Vulnerability in the Semi- Arid Tropics*. Cambridge University Press. p. 13-51.
- Shih, S. F., and Rahi, G. S. (1982). Seasonal Variations of Mannig's Roughness Coefficient in a Subtropical Marsh. Transactions of the ASAE. pp. 116-119.
- Silva, L. P., and Ewen, J. (2000). Modelagem Hidrológica de Grandes Bacias Hidrológicas: a Necessidade de Novas metodologias. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos – RBRH*. Vol 5. n.2.
- Silveira, A. L. L. (1993). Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In: Tucci, Hidrologia – Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Ed. Da Universidade. p. 253-277.
- Simanton, J. R., Hawkins, R. H., Saravi, M. M e Renard, K. G (1996). Runoff Curve Number Variation with Drainage Area, Walnut Gulch, Arizona. Transactions of the ASAE, Vol 39(4): 1391-1394.
- Singh, V. P. (editor) (1995). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publication, Highlands Ranch, Colorado, United States.
- Sorooshian, S., Gupta, V. K. (1995). Model Calibration. In: Singh, V. P. (editor). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Louisiana.
- SUDENE. (1982). Bacia Representativa de Sumé – primeira estimativa dos recursos de água (campanhas de 1973-1980). Recife. Série Hidrológica N° 14.
- SUDENE. (1990). Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado do Rio Grande do Norte. Série pluviométrica 4. Recife – PE. Brasil.
- SUDENE. (1990). Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado da Paraíba. Série pluviométrica 5. Recife – PE. Brasil.
- SUDENE. (1990). Dados Pluviométricos Mensais do Nordeste – Estado de Pernambuco. Série pluviométrica 6. Recife – PE. Brasil.

- Toebe, C. Ouryvaev, V. (1970). Representative and Experimental Basins: an international guide for research and practice. Haarlem: UNESCO, 1970. 348p.
- Tucci, C. E. M., Damiani, A. (1994). Potencial Impacto da Modificação Climática do Rio Uruguai. *Revista Brasileira de Engenharia*, Porto Alegre, v. 12, n.2, p. 5-34.
- Tucci, C. E. M. e Clarke R. T. (1997). Impacto da Mudança da Cobertura Vegetal no Escoamento: Revisão.
- Tucci, C. E. M. (1998). Modelos hidrológicos. Ed. da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 668p.
- Tucci, C. E. M. (1993). Ciclo Hidrológico. In: Hidrologia, Ciência e Aplicação. Tucci, C. E. M. (editor) Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. p 35-40.
- U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Hydrology Section 4 Chapter 4-10. 1972.n. p. /
- Vieira, Z. M. C. L. (2002). Análise de Conflitos na Seleção de Alternativas de Gerenciamento da Demanda Urbana de Água. Tese de mestrado, Depto. Enga. Civil, CCT/UFCG, Campina Grande- PB.
- Vieux, B. E., Looper, J. P., Cappelaere, B., Peugeot, C., Maia, A. (1998). Exploring Climatic Impacts on Water Resources in West Niger, Africa. In: Servat, E., Hughes, D., Fritsch, J. M., Hulme, M. (editors). *Water Resources variability in Africa during the XXth Century*. IAHS. Pub. n. 252. p.347-354.
- Viner, D., Hulme, M. (1997). *The Climate Impacts*. Link Project: Applying Results from the Hadley Centre's Climate Change Experiments for climate change impacts assessments. Published by Climate Research Unit. UEA, Norwich.
- Warr, K., Smith, S. (1995). Science Matters – Changing Climate. The Open University. London. p. 109-135.
- Williams, J. R. (1969). Flood Routing with Variable Travel Time on Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*. Vol. 12, p. 100-103.
- Williams, M.A.J. and Balling Jr, R.C. (1996). Interactions of Desertification and Climate. World Meteorological Organisation, United Nations Environmental Programme. Arnold, UK.

Wood, E. F. Heterogeneity and scaling land-atmospheric water and energy fluxes in climate systems. In: Feddes R. A. (ed.) *Space and Time Scale Variability and Interdependencies in Hydrological Processes*. Cambridge: University Press, 1995. p.3-19 (International Hydrology Series).

## **ANEXOS**

Anexo A: Funções de Transformação das Lâminas dos Escoamentos no Modelo NAVMO.

Anexo B: Arquivo *are* de Entrada no Modelo NAVMO Para Simulação Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba.



## ANEXO A – Funções de Transformação das Lâminas dos Escoamentos no Modelo NAVMO.

O escoamento Superficial (QD1) é obtido através da aplicação de duas funções lineares que transformam a lâmina do escoamento superficial (AO1) em hidrograma, uma para a subida do hidrograma e outra para a recessão. As funções são as seguintes:

Para a subida:

$$QD1(t + J) = \frac{2 \times J \times AO1(t) \times AE}{MET1 \times MAX1} \quad (m^3/dia) \quad (A.1)$$

Para a recessão:

$$QD1(t + J) = \frac{2 \times (MAX1 - J) \times AO1(t) \times AE}{MAX1 \times (MAX1 - MET1)} \quad (m^3/dia) \quad (A.2)$$

onde:

AE = Área da sub-bacia

QD1(t+J) = Escoamento direto num intervalo de tempo t+J

MET1 = Tempo para atingir o pico do escoamento superficial

MAX1 = Tempo de base do escoamento superficial.

A transformação da lâmina do escoamento sub-superficial (AO2) em hidrograma é feita através de uma função linear para a subida do hidrograma e por uma função exponencial para a recessão. São dadas por:

Para a subida:

$$QD2(t + J) = \frac{QM(t) \times J}{MET2} \quad (m^3/dia) \quad (A.3)$$

Para a recessão:

$$QD2(t + J) = QM(t) \times \left[ 1,1 \times e^{\frac{\ln 0,1}{1,1} \times \frac{1 - MET2}{MAX2 - MET2}} - 0,1 \right] \quad (m^3/dia) \quad (A.4)$$

$$\text{onde: } QM(t) = \frac{AO2(t) \times AE}{(MAX2 - MET2) \times (1 / \ln 1,1 - 0,1) + MET2 \times 0,5} \quad (m^3/dia) \quad (A.5)$$

sendo:

MET 2 = Tempo para atingir o pico do escoamento sub-superficial

MAX 2 = Tempo de base do escoamento sub-superficial

O escoamento subterrâneo é calculado através da função:

$$QGW(t) = AGW(t) \cdot AE \quad (m^3/dia) \quad (A.6)$$

onde AGW (t) é dado por:

$$AGW(t) = \frac{AGW(t-1)}{1 + 1/K} + \frac{IGW(t)}{1 + K} \quad (mm/dia) \quad (A.7)$$

sendo:

K = Constante do reservatório a ser calibrada

IGW (t) = Infiltração no lençol subterrâneo.

AE = Área da sub-bacia

A soma das vazões superficial, sub-superficial e subterrâneo fornece o escoamento total diário:

$$QGES(t) = \frac{QD1(t) + QDZ(t) + QGW(t)}{86400} \quad (m^3/s) \quad (A.8)$$

### Anexo B - Arquivo *are* de Entrada no Modelo NAVMO Para Simulação Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba.

Sub-bacias	Ordem	Área (km <sup>2</sup> )	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
1	100	311.0	16.67	760.000	665.800	726.000	9095.000	1
1	320501	320500						2
1								3
1	0.57	73.5						4
2	200	333.0	6.67	680.000	633.370	714.000	9100.000	1
2	334501	334500						2
2								3
2	0.70	73.5						4
3	300	127.0	4.17	620.000	600.000	720.000	9109.000	1
3	334500	320500	0.0007	1.000	10.000	30.000	30.000	2
3	2.0	25.0	25.0	25.00	5.000	5.000		3
3	0.47	73.5						4
4	400	18.0	18.67	600.000	580.000	732.000	9115.000	1
4	320500	309500	0.0023	2.500	10.000	40.000	40.000	2
4	2.5	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
4	0.12	74.0						4
5	500	517.0	17.39	940.000	663.150	746.000	9104.000	1
5	309500	309499						2
5								3
5	1.59	73.3						4
6	600	303.0	6.84	620.000	539.660	748.000	9126.000	1
6	309499	279499	0.0022	3.000	10.000	30.000	30.000	2
6	3.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
6	1.17	73.2						4
7	700	271.0	18.61	760.000	670.140	696.000	9127.000	1
7	340001	340000						2
7								3
7	0.61	73.2						4
8	800	377.0	2.61	640.000	612.500	711.000	9125.000	1
8	340000	318500	0.0019	3.000	10.000	40.000	40.000	2
8	3.0	25.0	25.0	25.00	5.000	5.000		3
8	1.05	73.2						4
9	900	369.0	12.78	600.000	565.990	729.000	9126.000	1
9	318500	304000	0.0014	3.000	10.000	50.000	50.000	2
9	3.5	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
9	0.26	73.2						4
10	1000	260.0	2.50	560.000	540.000	743.000	9137.000	1
10	304000	279499	0.0020	4.000	10.000	60.000	60.000	2
10	3.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
10	0.80	73.2						4
11	1100	79.0	4.67	540.000	500.000	758.000	9143.000	1
11	279499	268000	0.0035	4.000	10.000	70.000	70.000	2
11	3.5	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
11	0.85	73.5						4
12	1200	396.0	12.05	680.000	627.730	706.000	9156.000	1
12	321501	321500						2
12								3
12	0.43	73.3						4
13	1300	360.0	10.78	600.000	541.140	719.000	9149.000	1

Sub-bacias	Ordem	Área (km <sup>2</sup> )	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
13	321500	307000	0.0041	4.000	10.000	60.000	60.000	2
13	2.5	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
13	0.55	73.3						4
14	1400	769.0	10.22	510.000	454.880	738.000	9159.000	1
14	307000	286000	0.0024	5.000	10.000	70.000	70.000	2
14	3.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
14	0.54	73.1						4
15	1500	323.0	2.00	450.000	440.000	756.000	9155.000	1
15	286000	268000	0.0011	5.000	10.000	80.000	80.000	2
15	3.5	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
15	0.50	73.3						4
16	1600	12.0	2.50	520.000	500.000	767.000	9147.000	1
16	268000	260000	0.0025	5.000	10.000	80.000	80.000	2
16	4.5	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
16	0.80	74.3						4
17	1700	153.0	7.11	760.000	686.660	760.000	9127.000	1
17	270001	270000						2
17								3
17	1.20	73.4						4
18	1800	92.0	2.20	540.000	520.000	766.000	9140.000	1
18	270000	260000	0.0020	6.000	10.000	90.000	90.000	2
18	4.5	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
18	0.90	73.5						4
19	1900	98.0	8.34	660.000	640.000	772.000	9149.000	1
19	260000	251500	0.0023	6.000	10.000	100.000	100.000	2
19	5.0	50.0	50.0	25.00	5.000	5.000		3
19	0.24	73.5						4
20	2000	90.0	4.33	660.000	637.260	772.000	9128.000	1
20	266501	266500						2
20								3
20	0.52	77.7						4
21	2100	149.0	10.90	640.000	514.950	776.000	9136.000	1
21	266500	251500	0.0080	6.000	10.000	60.000	60.000	2
21	2.5	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
21	1.14	77.6						4
22	2200	209.0	9.06	640.000	523.910	778.000	9151.000	1
22	251500	244002	0.0030	7.000	10.000	70.000	70.000	2
22	3.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
22	1.28	77.4						4
23	2300	479.0	5.00	520.000	472.130	788.000	9152.000	1
23	244002	232502	0.0020	7.000	10.000	80.000	80.000	2
23	3.5	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
23	0.96	77.1						4
24	2400	169.0	11.95	700.000	520.900	797.000	9160.000	1
24	232502	215001	0.0011	7.000	10.000	90.000	90.000	2
24	4.0	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
24	1.50	77.5						4
25	2500	182.0	10.84	480.000	460.000	787.000	9170.000	1
25	215001	215000						2
25								3
25	0.18	77.5						4
26	2600	265.0	10.44	750.000	640.880	708.000	9200.000	1

Sub-bacias	Ordem	Área (km <sup>2</sup> )	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
26	315001	315000						2
26								3
26	1.04	82.7						4
27	2700	353.0	4.17	620.000	588.150	725.000	9200.000	1
27	315000	296000	0.0021	8.500	60.000	100.000	100.000	2
27	2.5	25.0	25.0	25.00	5.000	5.000		3
27	0.76	82.7						4
28	2800	350.0	12.89	580.000	531.770	746.000	9207.000	1
28	296000	270000	0.0035	10.500	60.000	110.000	110.000	2
28	3.0	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
28	0.37	82.7						4
29	2900	408.0	11.11	580.000	545.180	758.000	9227.000	1
29	294001	294000						2
29								3
29	0.31	82.7						4
30	3000	268.0	5.89	540.000	503.620	757.000	9215.000	1
30	294000	279000	0.0027	12.000	50.000	30.000	30.000	2
30	2.5	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
30	0.62	82.6						4
31	3100	88.0	3.34	500.000	480.000	761.000	9203.000	1
31	279000	270000	0.0022	12.000	50.000	40.000	40.000	2
31	3.0	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
31	0.60	83.1						4
32	3200	2.0	10.84	480.000	470.000	758.000	9194.000	1
32	270000	264500	0.0018	12.000	50.000	50.000	50.000	2
32	3.5	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
32	0.09	85.5						4
33	3300	147.0	14.34	720.000	638.050	729.000	9190.000	1
33	283501	283500						2
33								3
33	0.57	84.1						4
34	3400	225.0	11.00	600.000	537.330	749.000	9193.000	1
34	283500	264500	0.0037	12.000	50.000	60.000	60.000	2
34	4.0	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
34	0.56	83.8						4
35	3500	34.0	2.34	480.000	470.000	762.000	9194.000	1
35	264500	261500	0.0034	12.000	50.000	70.000	70.000	2
35	4.5	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
35	0.43	84.5						4
36	3600	178.0	7.50	740.000	674.000	725.000	9179.000	1
36	294001	294000						2
36								3
36	0.87	83.9						4
37	3700	147.0	8.05	670.000	599.290	737.000	9180.000	1
37	294000	279000	0.0053	12.000	50.000	80.000	80.000	2
37	4.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
37	0.88	84.1						4
38	3800	124.0	12.06	590.000	525.950	751.000	9184.000	1
38	279000	261500	0.0057	14.000	50.000	90.000	90.000	2
38	3.5	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
38	0.53	84.1						4
39	3900	76.0	7.5	480.000	460.000	765.000	9189.000	1

Sub-bacias	Ordem	Área (km <sup>2</sup> )	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
39	261500	253500	0.0025	14.000	50.000	100.000	100.000	2
39	3.0	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
39	0.27	84.2						4
40	4000	213.0	3.67	500.000	480.000	750.000	9174.000	1
40	266001	266000						2
40								3
40	0.54	83.8						4
41	4100	179.0	4.17	480.000	460.000	762.000	9175.000	1
41	266000	253500	0.0016	14.000	50.000	110.000	110.000	2
41	2.5	50.0	50.0	25.00	5.000	5.000		3
41	0.48	83.9						4
42	4200	203.0	10.0	460.000	440.000	772.000	9179.000	1
42	253500	244500	0.0022	14.000	50.000	120.000	120.000	2
42	2.0	55.0	55.0	25.00	5.000	5.000		3
42	0.20	83.8						4
43	4300	119.0	9.67	440.000	430.000	782.000	9182.000	1
43	244500	235000	0.0010	14.000	12.000	120.000	120.000	2
43	2.0	25.0	25.0	25.00	5.000	5.000		3
43	0.11	77.6						4
44	4400	96.0	4.55	540.000	512.920	769.000	9203.000	1
44	255501	255500						2
44								3
44	0.59	77.7						4
45	4500	128.0	2.61	560.000	546.250	772.000	9213.000	1
45	255501	255500						2
45								3
45	0.53	77.6						4
46	4600	60.0	6.28	520.000	492.930	779.000	9202.000	1
46	255500	248001	0.0040	14.000	10.000	30.000	30.000	2
46	7.0	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
46	0.43	77.9						4
47	4700	64.0	10.000	510.000	475.240	772.000	9195.000	1
47	248001	248000						2
47								3
47	0.35	77.9						4
48	4800	57.0	13.61	500.000	466.890	782.000	9192.000	1
48	248000	240500	0.0067	14.000	10.000	20.000	20.000	2
48	9.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
48	0.24	77.9						4
49	4900	119.0	5.000	680.000	630.690	803.000	9238.000	1
49	288501	288500						2
49								3
49	0.99	77.6						4
50	5000	199.0	2.94	620.000	593.830	797.000	9227.000	1
50	288500	271501	0.0012	16.000	10.000	10.000	10.000	2
50	8.0	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
50	0.89	77.4						4
51	5100	251.0	8.33	700.000	617.830	782.000	9229.000	1
51	271501	271500						2
51								3
51	0.98	77.4						4
52	5200	118.0	1.67	590.000	580.000	790.000	9216.000	1

Sub-bacias	Ordem	Area (km <sup>2</sup> )	Comp. da sub-bacia (km)	Cota entrada (m)	Cota saída (m)	X (m)	Y (m)	Numeração das linhas
	Dist.	Dist. (m)	Decliv. do rio	HM (m)	BM (m)	BL (m)	BR (m)	
	BNM	BNL	BNR	SKM	SKL	SKR		
	Decliv. Bacia (%)	CN						
52	271500	263000	0.0012	16.000	10.000	20.000	20.000	2
52	7.0	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
52	0.59	77.6						4
53	5300	173.0	6.67	580.000	560.000	783.000	9212.000	1
53	263000	255000	0.0025	16.000	10.000	30.000	30.000	2
53	6.0	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
53	0.29	77.5						4
54	5400	80.0	6.34	550.000	530.000	787.000	9198.000	1
54	255000	240500	0.0013	16.000	10.000	40.000	40.000	2
54	5.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
54	0.31	77.8						4
55	5500	12.0	6.67	520.000	500.000	788.000	9187.000	1
55	240500	235000	0.0036	16.000	10.000	50.000	50.000	2
55	4.0	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
55	0.30	78.5						4
56	5600	57.0	5.0	480.000	460.000	790.000	9180.000	1
56	235000	226000	0.0022	16.000	10.000	60.000	60.000	2
56	3.0	30.0	30.0	25.00	5.000	5.000		3
56	0.40	77.9						4
57	5700	376.0	15.550	660.000	614.030	811.000	9220.000	1
57	263001	263000						2
57								3
57	0.30	77.2						4
58	5800	233.0	10.56	600.000	549.880	800.000	9206.000	1
58	263000	248500	0.0041	16.000	10.000	70.000	70.000	2
58	3.0	35.0	35.0	25.00	5.000	5.000		3
58	0.47	77.4						4
59	5900	288.0	10.28	540.000	498.110	798.000	9189.000	1
59	248500	226000	0.0022	16.000	10.000	80.000	80.000	2
59	5.0	40.0	40.0	25.00	5.000	5.000		3
59	0.41	77.3						4
60	6000	115.0	12.5	480.000	450.000	799.000	9175.000	1
60	226000	215000	0.0018	16.000	10.000	90.000	90.000	2
60	5.0	45.0	45.0	25.00	5.000	5.000		3
60	0.24	77.6						4
61	6100	126.0	1.67	450.000	440.000	808.000	9168.000	1
61	215000	200500	0.0021	16.000	10.000	100.000	100.000	2
61	5.0	50.0	50.0	25.00	5.000	5.000		3
61	0.59	77.6						4