



MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA  
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI  
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA

FÁBIO MONTEIRO CRUZ

AVALIAÇÃO GEOAMBIENTAL E HIDROLÓGICA DA BACIA  
DO RIO ITACAIUNAS, PA

**BELÉM-PA**  
**2010**

FÁBIO MONTEIRO CRUZ

AVALIAÇÃO GEOAMBIENTAL E HIDROLÓGICA DA BACIA  
DO RIO ITACAIUNAS, PA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Sócio-Ambientais.

Orientador: Prof. Dr Edson José Paulino da Rocha

**BELÉM-PA**  
**2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

---

C957a Cruz, Fábio Monteiro

Avaliação geoambiental e hidrológica da bacia do rio Itacaiunas, PA / Fábio Monteiro Cruz; Orientador: Edson José Paulino da Rocha – 2011

179 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emilio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2010.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 2. Bacia hidrográfica. 3. Uso da Terra. 4. Comportamento Hidrológico. 5. Rio Itacaiunas. I. Rocha, Edson José Paulino da *orient.* II. Universidade Federal do Pará III. Título.

CDD 20º ed.: 627

---

FÁBIO MONTEIRO CRUZ

AVALIAÇÃO GEOAMBIENTAL E HIDROLÓGICA DA BACIA  
DO RIO ITACAIUNAS, PA

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com EMBRAPA-Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais.

**Data de Aprovação:** 24 / 08 / 2010

**Conceito:**

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Edson José Paulino da Rocha - Orientador  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará

---

Prof<sup>a</sup>. Aline Maria Meiguins de Lima - Coorientadora  
Doutora em Desenvolvimento Sócio-Ambiental  
Universidade do Estado do Pará

---

Prof. Alan Cavalcanti da Cunha - Membro  
Pós-Doutor em Engenharia  
Universidade Federal do Amapá

---

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Membro  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Steel Silva Vasconcelos - Membro  
Doutor em Recursos e Conservação Florestais  
Embrapa Amazônia Oriental

*A meus pais, avós e padrinhos Pedro Mendes da Cruz e Esmerina de Castro Cruz (in memorian) por terem dedicado parte de suas vidas a me ensinar o real significado das expressões humildade, fé e perseverança; e por terem me deixado o maior de todos os legados: a educação.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus pela dádiva da vida.

Ao meu orientador Professor Doutor Edson Paulino da Rocha por ter me concedido um voto de confiança ao aceitar minha orientação.

À minha amiga e coorientadora Doutora Aline Maria Meiguins de Lima pela paciência e conselhos despendidos, que foram fundamentais na construção deste trabalho.

Ao Doutor Humberto Euclides, da Universidade Federal de Viçosa, pela gentileza em disponibilizar o aplicativo de regionalização hidrológica utilizado no trabalho.

À minha amiga Narjara Pastana pela gentileza no apoio à elaboração do abstract.

À minha amiga Tatiane Matos pelo apoio na produção cartográfica do trabalho.

Aos amigos Marilena Alves e Flávio Altieri pela ajuda imprescindível nos procedimentos de classificação do uso da terra.

Ao amigo Victor Hugo Paca pelos esclarecimentos em hidrologia.

À minha família por toda confiança, carinho, respeito, paciência e abrigo nos momentos mais difíceis da vida; em especial ao meu irmão Cléber Cruz (bibinho) por sempre representar um exemplo de superação e otimismo e a minha tia Clara por ter assumido o papel de matriarca de minha família.

À minha amiga, e eterna orientadora, Lilianne Maia Lima pelos conselhos que ainda hoje me são muito válidos nesta trajetória de vida profissional e acadêmica.

Aos meus grandes amigos Rivaldo Menezes (Tio Riva), Ederson João (Baixo), Anderson Menezes (Bad), Anderson Santos (Farofa), Maick Soares (Mará), Marcel Luís (Presuntinho), João Soares (John Lenon), Valdir Ribeiro (Dri), Sérgio (Dublado), Marinaldo (Pituco), Ivson (Nhonho), Walter Figueiredo (Fucinho), Dr<sup>a</sup> Marília Mesquita e Dr Benedito Evandro por me concederem diariamente a grande honra de ser seu amigo e por terem me acompanhado nos bons e maus momentos que vivi estes anos todos.

Ao seu Levi, Dona Marli, Analu, Arthur e José Chavaglia por representarem sempre um exemplo de unidade familiar.

Aos meus amigos todos da turma do mestrado pelo convívio e amizade construída durante a etapa de integralização dos créditos.

Aos meus amigos da Diretoria de Recursos Hídricos da SEMA/PA (funcionários, ex-funcionários, estagiários e ex-estagiários) pela amizade e companheirismo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para consolidação deste trabalho.

*“O homem imaturo é aquele que quer morrer gloriosamente por uma causa.  
O maduro se contenta em viver humildemente por ela”*

*J. D. Salinger*

## RESUMO

O comportamento hidrológico das bacias hidrográficas é determinado conjuntamente por suas características geoambientais, hidrológicas e da paisagem, logo, uma forma de elucidá-lo refere-se ao estudo desses atributos. A bacia do rio Itacaiunas, localizada no sudeste paraense, foi objeto de uma avaliação de seu comportamento hidrológico por meio do estudo de seus atributos geoambientais. Além disso, definiram-se variáveis hidrológicas regionais e investigou-se a dinâmica da paisagem da bacia. Foram utilizados aplicativos de hidrologia e sistemas de informações geográficas, além de dados de monitoramento da bacia. Os resultados da avaliação indicaram que as principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas constituem unidades fisiográficas de quarta ordem, sendo as mesmas consideradas homogêneas tanto física quanto climaticamente. Os modelos de distribuição de probabilidades que apresentaram melhor ajuste aos dados de vazão máxima, mínima e média de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência referentes ao período seco na bacia do rio Itacaiunas foram respectivamente Pearson 3, Log-Pearson 3 e Log-Normal 2. Enquanto, para o período chuvoso foram Pearson 3, Normal e Pearson 3. O balanço hídrico da bacia reportou uma disponibilidade hídrica remanescente para outorga elevada, porém possivelmente superestimada. A avaliação da dinâmica da paisagem da bacia, por sua vez, demonstrou haver uma forte tendência de alterações no uso da terra da bacia, no período de estudo. Bem como, evidenciou-se que o referido uso concentra-se nas áreas de ocorrência das sub-bacias mais importantes no contexto hidrológico da bacia do rio Itacaiunas, podendo alterar sua disponibilidade hídrica como efeito dos impactos destas mudanças.

**Palavras-chave:** Recursos hídricos – Desenvolvimento. Bacia hidrográfica. Uso da Terra. Comportamento Hidrológico. Rio Itacaiunas.

## ABSTRACT

The hydrological behavior of a watershed is determined jointly by its geoenvironmental, hydrological and landscape characteristics, therefore the study of these attributes is a way of elucidating it. The hydrological behavior of Itacaiunas river watershed, located in southeast Pará, was subject of an assessment based on its geoenvironmental attributes. Besides, regional hydrological variables were defined and the landscape dynamics of the watershed was also investigated. Hydrology applications and Geographic Information Systems were used, as well as data originated from the watershed monitoring. The results indicated that the main sub-watersheds are fourth-order physiographic units, being considered both physically and climatically homogeneous in this study. The probability distribution models which better fit to the maximum, minimum and average discharge data of seven consecutive days and ten years of recurrence related to the dry season of the Itacaiunas river watershed were respectively Pearson 3, Log-Pearson 3 and Log-Normal 2, whereas during the rainy season, it was Pearson 3, Normal and Pearson 3. The water balance of the watershed reported high water availability remaining for water rights concession; however it may have been overestimated. The assessment of the landscape dynamics of the watershed, in turn, has demonstrated a strong trend of modifications in land use for the watershed, during the study period. It also became evident that it happens on the occurrence areas of the more important sub-watersheds inside the hydrological context of Itacaiunas river watershed, making it possible to alter the water supply as an effect of the impacts of such modifications.

**Keywords:** Water resources – Development. Watershed. Land Use. Hydrological Behavior. Itacaiunas River.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01: BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	21
FIGURA 02: CLIMA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	22
FIGURA 03: TIPOLOGIAS VEGETAIS DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	23
FIGURA 04: GEOLOGIA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	26
FIGURA 05: GEOMORFOLOGIA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	27
FIGURA 06: FLUXOGRAMA METODOLÓGICO .....	66
FIGURA 07: GERAÇÃO DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	68
FIGURA 08: EXTRAÇÃO DA MALHA HIDROGRÁFICA DA BACIA .....	69
FIGURA 09: EXTRAÇÃO DA BASE SRTM CORRESPONDENTE À BACIA DO RIO ITACAIUNAS...	70
FIGURA 10: PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA ÁREA DE DRENAGEM DA BACIA .....	71
FIGURA 11: ESTATÍSTICA APRESENTADA PELAS PROPRIEDADES DA BASE SRTM.....	72
FIGURA 12: ESTATÍSTICA APRESENTADA PELA BASE SRTM DE DECLIVIDADES.....	73
FIGURA 13: BASE CLASSIFICADA SEGUNDO MÉTODO DE STRAHLER NO ARCGIS 9.2 .....	74
FIGURA 14: POSTO FLUVIOMÉTRICO FAZENDA ALEGRIA. ....	76
FIGURA 15: SEÇÃO UTILIZADA PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO NA ESTAÇÃO FAZENDA ALEGRIA..	76
FIGURA 16: MEDIÇÃO DE VAZÃO COM ADCP (ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILE) ...	76
FIGURA 17: DIAGRAMA DE BARRAS .....	78
FIGURA 18: MUNICÍPIOS DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	93
FIGURA 19: MAPA HIPSOMÉTRICO DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	94
FIGURA 20: MAPA CLINOGRÁFICO DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	96
FIGURA 21: CLASSIFICAÇÃO DE STRAHLER BACIA.....	97
FIGURA 22: CLASSIFICAÇÃO DE STRAHLER DA SUB-BACIA DO RIO TAPIRAPÉ .....	98
FIGURA 23: CLASSIFICAÇÃO DE STRAHLER DA SUB-BACIA DO RIO SORORÓ.....	99
FIGURA 24: CLASSIFICAÇÃO DE STRAHLER DA SUB-BACIA DO RIO PARAUAPEBAS .....	100
FIGURA 25: CLASSIFICAÇÃO DE STRAHLER DA SUB-BACIA DO RIO VERMELHO .....	101
FIGURA 26: MAPA HIPSOMÉTRICO DA SUB-BACIA DO RIO VERMELHO.....	106
FIGURA 27: MAPA HIPSOMÉTRICO DA SUB-BACIA DO RIO PARAUAPEBAS .....	107
FIGURA 28: MAPA HIPSOMÉTRICO DA SUB-BACIA DO RIO TAPIRAPÉ.....	108
FIGURA 29: MAPA HIPSOMÉTRICO DA SUB-BACIA DO RIO SORORÓ .....	109
FIGURA 30: MAPA CLINOGRÁFICO DA SUB-BACIA DO RIO VERMELHO .....	111
FIGURA 31: MAPA CLINOGRÁFICO DA SUB-BACIA DO RIO PARAUAPEBAS.....	112
FIGURA 32: MAPA CLINOGRÁFICO DA SUB-BACIA DO RIO TAPIRAPÉ .....	113
FIGURA 33: MAPA CLINOGRÁFICO DA SUB-BACIA DO RIO SORORÓ.....	114
FIGURA 34: POLÍGONOS DE THIESSEN DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	115
FIGURA 35: POLÍGONOS DE THIESSEN E SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	117
FIGURA 36: GRÁFICO DO AJUSTE DO MODELO NORMAL AOS EVENTOS DE MÍNIMA DA SÉRIE HISTÓRICA NO PERÍODO CHUVOSO .....	123
FIGURA 37: GRÁFICO DO AJUSTE DO MODELO PEARSON 3 AOS EVENTOS DE MÁXIMA DA SÉRIE HISTÓRICA NO PERÍODO CHUVOSO .....	124
FIGURA 38: GRÁFICO DO AJUSTE DO MODELO PEARSON 3 AOS EVENTOS MÉDIOS DA SÉRIE HISTÓRICA NO PERÍODO CHUVOSO.....	125
FIGURA 39: GRÁFICO DO AJUSTE DO MODELO LOG-PEARSON 3 AOS EVENTOS DE MÍNIMA DA SÉRIE HISTÓRICA NO PERÍODO SECO.....	126
FIGURA 40: GRÁFICO DO AJUSTE DO MODELO PEARSON 3 AOS EVENTOS DE MÁXIMA DA SÉRIE HISTÓRICA NO PERÍODO SECO.....	127
FIGURA 41: GRÁFICO DO AJUSTE DO MODELO LOG-NORMAL 2 AOS EVENTOS MÉDIOS DA SÉRIE HISTÓRICA NO PERÍODO SECO.....	128
FIGURA 42: CURVA DE PERMANÊNCIA REGIONAL DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	130

FIGURA 43: COMPORTAMENTO DA $Q_{95}$ NOS 12 MESES DO ANO CIVIL .....	131
FIGURA 44: DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS CAPTAÇÕES SUPERFICIAIS NA BACIA .....	135
FIGURA 45: USO DA TERRA NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS NO PERÍODO 1987-88 .....	141
FIGURA 46: USO DA TERRA E SEDES MUNICIPAIS NO PERÍODO DE 1987-88 NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	142
FIGURA 47: USO DA TERRA E UC'S NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS NO PERÍODO 1987-88 .	143
FIGURA 48: USO DA TERRA NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS EM 2005 .....	146
FIGURA 49: USO DA TERRA E SEDES MUNICIPAIS EM 2005 NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .	147
FIGURA 50: USO DA TERRA E UC'S NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS EM 2005 .....	149

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01: ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	75
TABELA 02: POSTOS FLUVIOMÉTRICOS COM INFLUÊNCIA NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	77
TABELA 03: ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DESCARTADAS .....	79
TABELA 04: ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS PARA O ESTUDO .....	79
TABELA 05: CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE CATEGORIAS HIPSOMÉTRICAS PARA REGIONALIZAÇÃO .....	81
TABELA 06: CRITÉRIOS DE DEFINIÇÃO DE CATEGORIAS DE DECLIVIDADE PARA REGIONALIZAÇÃO .....	81
TABELA 07: PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	92
TABELA 08: PERCENTUAL DE ÁREA DOS MUNICÍPIOS.....	93
TABELA 09: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE ALTITUDES DA SUB-BACIA DO RIO VERMELHO .....	106
TABELA 10: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE ALTITUDES DA SUB-BACIA DO RIO PARAUPEBAS.....	107
TABELA 11: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE ALTITUDES DA SUB-BACIA DO RIO TAPIRAPÉ .....	108
TABELA 12: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE ALTITUDES DA SUB-BACIA DO RIO SORORÓ .....	109
TABELA 13: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE DECLIVIDADES DA SUB-BACIA DO RIO VERMELHO .....	110
TABELA 14: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE DECLIVIDADES DA SUB-BACIA DO RIO PARAUPEBAS.....	111
TABELA 15: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE DECLIVIDADES DA SUB-BACIA DO RIO TAPIRAPÉ .....	112
TABELA 16: DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE DECLIVIDADES DA SUB-BACIA DO RIO SORORÓ .....	113
TABELA 17: ÁREA DOS POLÍGONOS DE THIESSEN NA SUB-BACIA DO RIO PARAUPEBAS ..	118
TABELA 18: ÁREA DOS POLÍGONOS DE THIESSEN NA SUB-BACIA DO RIO SORORÓ .....	118
TABELA 19: ÁREA DOS POLÍGONOS DE THIESSEN NA SUB-BACIA DO RIO VERMELHO.....	119
TABELA 20: POLÍGONO DE THIESSEN NA SUB-BACIA DO RIO TAPIRAPÉ .....	119
TABELA 21: PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL DAS SUB-BACIAS DO RIO ITACAIUNAS .....	120
TABELA 22: RESULTADOS DA ANOVA: UM CRITÉRIO. ....	121
TABELA 23: VAZÕES DE REFERÊNCIA OBTIDAS PARA DIFERENTES PERÍODOS SAZONAIS ...	129
TABELA 24: USUÁRIOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS NA BACIA.....	133
TABELA 25: CAPTAÇÕES SUPERFICIAIS INDIVIDUAIS DOS USUÁRIOS DA BACIA .....	134
TABELA 26: VAZÕES CAPTADAS EM CADA PONTO E SUA RELAÇÃO COM A $Q_{95}$ DA BACIA....	136
TABELA 27: VAZÕES TOTAIS CAPTADAS POR MANANCIAL NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS ....	137
TABELA 28: IMPACTO INDIVIDUAL DOS USUÁRIOS DE ÁGUA E DISPONIBILIDADE HÍDRICA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	138
TABELA 29: USO DA TERRA NA BACIA DO ITACAIUNAS EM 1987-88 .....	144
TABELA 30: USO DA TERRA NA BACIA DO ITACAIUNAS EM 2005.....	149

## LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**ANA** – Agência Nacional de Águas

**ANOVA** – Análise de Variância

**APP** – Área de Preservação Permanente

**C.V.** – Coeficiente de Variação

**CERH-PA** – Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Pará

**CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e Hidrologia

**EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**IBAMA** – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis

**IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**M** – Vazão máxima

**m** – Vazão mínima

**Md** – Vazão média

**MAXVER** - Método de classificação por Máxima Verossimilhança

**MDE** – Modelo Digital de Elevação

**Q<sub>7,10</sub>** – Vazão mínima de 7 dias consecutivos e 10 anos de retorno

**Q<sub>90</sub>** – Vazão com 90% de permanência no tempo

**Q<sub>95</sub>** – Vazão com 95% de permanência no tempo

**RGB** – Composição das cores Vermelho, Verde e Azul

**SAD** – South American Datum

**SAM** - Método de classificação do Mapeador do Ângulo Espectral

**SAR** - Radar de Abertura Sintética

**SEIRH** – Sistema Estadual de Informações de Recursos Hídricos

**SEMA/PA** – Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará

**SIG** – Sistema de Informações Geográficas

**SIMLAM-SEMA/PA** – Sistema de Monitoramento e Licenciamento Ambiental do Estado do Pará

**SRTM** – Shuttle Radar Topographic Mission

**TCEV** - Two Component Extreme Value

**UC** – Unidade de Conservação

**USLE** - Universal Soil Loss Equation

**%K-S** – Percentual de aderência aferido pelo método de Kolgoromov-Smirn.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>19</b>
3.1	OBJETIVO GERAL .....	19
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>20</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	20
<b>4.1.1</b>	<b>Clima</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Vegetação</b> .....	<b>22</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Geologia</b> .....	<b>24</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Geomorfologia</b> .....	<b>26</b>
4.2	REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA .....	28
<b>4.2.1</b>	<b>Generalidades</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Conceito e classificação</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Estudos de regionalização hidrológica em bacias brasileiras</b> ....	<b>34</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Estudos de regionalização climática no Brasil</b> .....	<b>38</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Análises morfométricas de bacias hidrográficas brasileiras</b> .....	<b>41</b>
4.3	MUDANÇAS NO USO DA TERRA E SENSORIAMENTO REMOTO..	43
<b>4.3.1</b>	<b>Dinâmica da paisagem</b> .....	<b>46</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Estudos do uso/ocupação da terra no Brasil</b> .....	<b>47</b>
4.4	VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DE INTERESSE EM REGIONALIZAÇÃO.....	49
4.5	VARIÁVEIS FÍSICAS DE INTERESSE EM REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA.....	51
4.6	VARIÁVEIS CLIMÁTICAS DE INTERESSE EM REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA.....	55
4.7	MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO DA TERRA .....	57
4.8	MÉTODOS ESTATÍSTICOS .....	59
<b>4.8.1</b>	<b>Análise de variância</b> .....	<b>59</b>
<b>4.8.2</b>	<b>Polígonos de Thiessen e precipitações médias</b> .....	<b>60</b>
<b>4.8.3</b>	<b>Modelos de distribuição de probabilidades e regionalização hidrológica</b> .....	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>64</b>
5.1	REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA .....	67
<b>5.1.1</b>	<b>Análise morfométrica</b> .....	<b>67</b>
5.1.1.1	Definição da bacia de drenagem .....	67
5.1.1.2	Extração da rede hidrográfica.....	68
5.1.1.3	Extração do modelo digital de elevação (MDE) da bacia .....	69
5.1.1.4	Seleção dos parâmetros morfométricos .....	70
5.1.1.5	Área de drenagem .....	71
5.1.1.6	Densidade de drenagem .....	71
5.1.1.7	Obtenção das altitudes máxima, mínima e média da bacia .....	72
5.1.1.8	Declividades máxima, média e mínima .....	73
5.1.1.9	Hierarquização hidrográfica .....	73

<b>5.1.2</b>	<b>Análise hidrológica .....</b>	<b>74</b>
5.1.2.1	Definição do período base de estudo e seleção das estações de monitoramento.....	75
5.1.2.2	Definição das sub-bacias para regionalização física e climática.....	80
5.1.2.3	Regionalização física .....	80
5.1.2.4	Regionalização climática.....	81
5.1.2.5	Ajuste de modelos de distribuição probabilística aos dados hidrológicos e definição das vazões máxima, média e mínima de sete dias consecutivos e dez anos de retorno .....	83
5.1.2.6	Construção da curva de permanência.....	85
5.1.2.7	Permanência de vazões a 95% global e mensal .....	86
5.1.2.8	Avaliação da disponibilidade hídrica superficial da bacia .....	86
5.2	<b>AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DA TERRA.....</b>	<b>88</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Definição das categorias de uso da terra .....</b>	<b>89</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Seleção das amostras para classificação .....</b>	<b>89</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Classificação supervisionada.....</b>	<b>90</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Tratamentos pós-classificação .....</b>	<b>90</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>92</b>
6.1	MORFOMETRIA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS.....	92
<b>6.1.1</b>	<b>Valores identificados .....</b>	<b>92</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Ponderações sobre os valores obtidos .....</b>	<b>101</b>
6.2	REGIONALIZAÇÃO FÍSICA DAS SUB-BACIAS PRINCIPAIS DO RIO ITACAIUNAS .....	105
6.3	REGIONALIZAÇÃO CLIMÁTICA DAS SUB-BACIAS DO RIO ITACAIUNAS .....	115
6.4	VAZÕES MÁXIMA, MÉDIA E MÍNIMA REGIONAIS .....	122
6.5	CURVA DE PERMANÊNCIA REGIONAL E $Q_{95}$ .....	129
6.6	DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA OUTORGA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS .....	132
6.7	MUDANÇAS NO USO DA TERRA NA BACIA .....	140
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>152</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>156</b>
	<b>ANEXO A – PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DA BACIA .....</b>	<b>169</b>
	<b>ANEXO B – PROCEDIMENTOS PARA EXTRAÇÃO DA DRENAGEM.....</b>	<b>170</b>
	<b>ANEXO C – PROCEDIMENTOS PARA CÁLCULO DA ÁREA DA BACIA.....</b>	<b>170</b>
	<b>ANEXO D – PROCEDIMENTOS PARA A DEFINIÇÃO DA DENSIDADE DE DRENAGEM DA BACIA.....</b>	<b>171</b>
	<b>ANEXO E – PROCEDIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DO MDE DA BACIA .....</b>	<b>172</b>
	<b>ANEXO F – PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DAS ALTITUDES DA BACIA .....</b>	<b>172</b>

ANEXO G – PROCEDIMENTOS PARA A HIERARQUIZAÇÃO HIDROGRÁFICA DA BACIA .....	173
ANEXO H – PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DAS DECLIVIDADES DA BACIA.....	174
ANEXO I - PROCEDIMENTOS PARA SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DEFINIÇÃO DO PERÍODO BASE DE ESTUDO.....	175
ANEXO J – PROCEDIMENTOS PARA REGIONALIZAÇÃO FÍSICA DAS SUBBACIAS .....	176
ANEXO L – PROCEDIMENTOS PARA REGIONALIZAÇÃO CLIMÁTICA DAS SUBBACIAS .....	177
ANEXO M – PROCEDIMENTOS PARA O AJUSTE DE MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DE PROBABILIDADES AOS DADOS HIDROLÓGICOS E OBTENÇÃO DAS VAZÕES MÁXIMA, MÉDIA E MÍNIMA REGIONAIS.....	178
ANEXO N – PROCEDIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA REGIONAL .....	179
ANEXO O – PROCEDIMENTOS PARA A CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DO USO DA TERRA NA BACIA .....	180
ANEXO P – CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “SERRA CARAJÁS – N5” .....	181
ANEXO Q - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “KM 60” .....	181
ANEXO R - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA SURUBIM” .....	181
ANEXO S - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA SANTA ELISA” .....	181
ANEXO T - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA SANTA CAIÇARA” .....	181
ANEXO U - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA ELDORADO” .....	181

## 1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial tem levado a um correspondente acréscimo, nas últimas décadas, da demanda pelos recursos hídricos. Em contrapartida, a disponibilidade de água em compatibilidade com os diversos usos tem apresentado um comportamento antagônico, tornando-se cada vez menor.

Tal fato está integralmente relacionado à ocupação desordenada e sem planejamento das bacias hidrográficas levando principalmente à intensa modificação da cobertura do solo e a poluição dos corpos hídricos por: lançamento de esgoto (sem tratamento prévio) e resíduos sólidos pelos núcleos urbanos; lixiviação de nutrientes e agrotóxicos em função das práticas agrícolas de caráter comercial; e lançamentos de efluentes das indústrias, além da superexploração dos mananciais.

Todos estes fatores conjuntamente contribuem para uma recorrente modificação dos padrões naturais do ciclo hidrológico produzindo variações que podem alterar drasticamente o regime de chuvas e de vazões nas bacias levando a escassez de água e a deterioração de sua qualidade.

Dessa forma, o desenvolvimento de estudos para a avaliação das disponibilidades hídricas nas bacias hidrográficas possui um caráter estratégico, uma vez que o conhecimento sobre os regimes de precipitação e vazão são fundamentais para a elucidação do comportamento hidrológico das bacias (EUCLYDES, 2005). A importância, nesta perspectiva, em se tomar a bacia hidrográfica como unidade básica de estudo decorre de suas características, notadamente as físicas e climáticas, estarem intimamente relacionadas à produção de água (RENNÓ, 2004).

A produção das séries de monitoramento reduz as incertezas hidrológicas e fornece subsídios para a otimização do cálculo das disponibilidades hídricas, além de balizar estudos sobre o impacto que as modificações nos padrões de cobertura do solo das bacias produzem nos recursos hídricos. Contudo, nem sempre as redes de monitoramento possuem densidade e distribuição de pontos de observação em níveis satisfatórios, levando muitas regiões a serem classificadas como vazios de informação, o que dificulta substancialmente o gerenciamento dos recursos hídricos.

Neste contexto, inúmeras pesquisas em hidrologia têm sido desenvolvidas buscando maximizar as informações fornecidas pelas redes hidrológicas e hidrometeorológicas. Diversas alternativas a podem ser encontradas na literatura

especializada sobre o tema, porém a regionalização hidrológica se sobressai, neste panorama, e tem contribuído bastante para o gerenciamento de recursos hídricos. A regionalização hidrológica permite transpor informações hidrológicas de regiões onde há redes de monitoramento para outras que não as possuem, mas que apresentam similaridades entre si (VON SPERLING, 2007). O uso cada vez mais frequente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como ferramenta de apoio em regionalização hidrológica tem apresentado resultados bastante satisfatórios, uma vez que permitem a manipulação de dados espacialmente distribuídos e entidades geográficas da paisagem por meio de informações georreferenciadas que descrevem suas características e formas (FERRAZ; MILDE; MORTATTI, 1999).

## **2 JUSTIFICATIVA**

O Brasil é um país que possui uma imensa riqueza hidrográfica, contando em seu território com a maior bacia fluvial do mundo em extensão e volume d'água, fato este justificado pelos elevados valores de precipitação registrados na maioria de seu território (CUNHA ; GUERRA, 2003).

A rede de monitoramento nacional dispõe atualmente de 8.889 postos de observação administrados por instituições federais, estaduais, setoriais e particulares, dos quais 4.649 representam a rede em operação sob responsabilidade da ANA (Agência Nacional de Águas) e operadoras (ANA, 2009a). Na região Amazônica a malha hidrológica/hidrometeorológica é constituída por 486 estações pluviométricas, 5 evaporimétricas, 276 fluviométricas, 80 sedimentométricas e 108 de qualidade da água, totalizando 957 pontos de monitoramento presentes nos diversos estados (ANA, 2009a).

A rede de monitoramento do Estado do Pará foi catalogada por Santos (2008a) que evidenciou que há atualmente 120 postos pluviométricos e 70 fluviométricos em operação, constituindo 190 pontos de monitoramento dispersos entre as regiões hidrográficas adotadas para efeito de gerenciamento dos recursos hídricos do estado (Resolução Nº 004/2008/CERH-PA), a saber: Costa Atlântica Nordeste, Calha Norte, Tapajós, Baixo Amazonas, Portel-Marajó, Tocantins-Araguaia e Xingu.

Entretanto, dado o caráter continental do Pará, este contingente de postos pode ser considerado insuficiente para elucidar a real potencialidade e disponibilidade hídrica do Estado. Soma-se a isto o fato corriqueiro de parte destas estações tornarem-se inativas por problemas de variadas origens e possuírem distribuição geográfica heterogênea, acentuando ainda mais o déficit de informação hidrológica da região.

Especificamente na região hidrográfica Tocantins-Araguaia, localizada no estado do Pará, há 21 estações pluviométricas e 17 estações fluviométricas alocadas em seu interior; entretanto, apenas 14 pluviométricas e 6 fluviométricas encontram-se em operação (SANTOS, 2008a). Dada a sua extensão e representatividade no território paraense, pode-se inferir que as observações hidrológicas registradas na região não são suficientes para esclarecer seu comportamento hidrológico, principalmente devido ao fato dos postos de observação não apresentarem uma distribuição homogênea.

Dentre as sub-bacias que compõe a região hidrográfica Tocantins-Araguaia, a do rio Itacaiunas merece destaque, visto que o mesmo é um dos principais tributários do rio Tocantins e abrange alguns dos mais importantes municípios do sudeste paraense, tais como Marabá e Parauapebas, onde se desenvolvem variadas práticas que caracterizam a economia da região (tais como a pecuária, mineração e a indústria), que produzem profundas alterações no uso/ocupação do solo da bacia, além de demandarem água em suas operações, podendo alterar o balanço hídrico regional se não forem tomadas medidas eficientes de controle sobre estas atividades.

O aumento da demanda pela água na bacia tem sido motivado pelo crescimento econômico regional, notadamente a expansão da atividade siderúrgica no município de Marabá e a verticalização da produção mineral, no pólo mineral de Carajás (CARNEIRO, 2008; COELHO; RIO; MIRANDA, 2008; MILANEZ; PORTO, 2008; MONTEIRO, 2005).

Contudo, o cenário de déficit de informação hidrológica estadual se reproduz igualmente na escala da bacia gerando também incertezas sobre a disponibilidade e potencialidade hídrica local em suprir as demandas pelos recursos hídricos, em virtude da baixa densidade de postos de observação pluviométricos e fluviométricos na sua área de contribuição.

Neste contexto torna-se relevante e oportuna à realização de pesquisas que promovam o delineamento do comportamento hidrológico da bacia do rio Itacaiunas e a forma e magnitude das alterações na paisagem regional da bacia, por meio de alternativas que potencializem ao máximo as escassas observações hidrológicas disponíveis, contribuindo desta forma para o eficiente gerenciamento dos recursos hídricos e planejamento do desenvolvimento regional com sustentabilidade.

O mérito de alternativas como regionalização de vazões e geoestatística aplicada à hidrologia, nesta perspectiva, reside principalmente no fato que ambas podem produzir resultados estatisticamente significativos que auxiliam substancialmente o processo de gerenciamento de recursos hídricos em áreas onde não há uma malha ideal de monitoramento, enquanto paralelamente se promove a instalação de novos postos de controle fluviométrico e se adensa o volume de dados temporal e espacialmente distribuídos.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o comportamento hidrológico da bacia do rio Itacaiunas, por meio do estudo de seus atributos geoambientais (físicos, climáticos e dinâmica da paisagem), bem como definir variáveis hidrológicas regionais.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Realizar análise morfométrica da bacia do rio Itacaiunas.
- b) Realizar regionalização climática e física das principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas.
- c) Ajustar diferentes modelos de distribuição teórica de probabilidades às vazões mínima, máxima e média de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência, respeitando-se os diferentes períodos sazonais do regime hidrológico regional.
- d) Estimar a disponibilidade hídrica superficial para outorga na bacia.

- e) Analisar a dinâmica da paisagem da bacia, por meio do estudo da evolução do seu desflorestamento.

## **4 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1 ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo é compreendida pela bacia hidrográfica do rio Itacaiunas, localizada no Sudeste Paraense e inserida na região hidrográfica estadual Tocantins-Araguaia (figura 01).

Em termos percentuais a unidade fisiográfica representa cerca de 31,11% da região hidrográfica estadual Tocantins-Araguaia (129102,79 Km<sup>2</sup>) e 3,21% da área total do estado do Pará.

A descrição das características naturais da bacia foi feita a partir dos temas vetoriais disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis em sua página na internet (IBAMA, 2010).

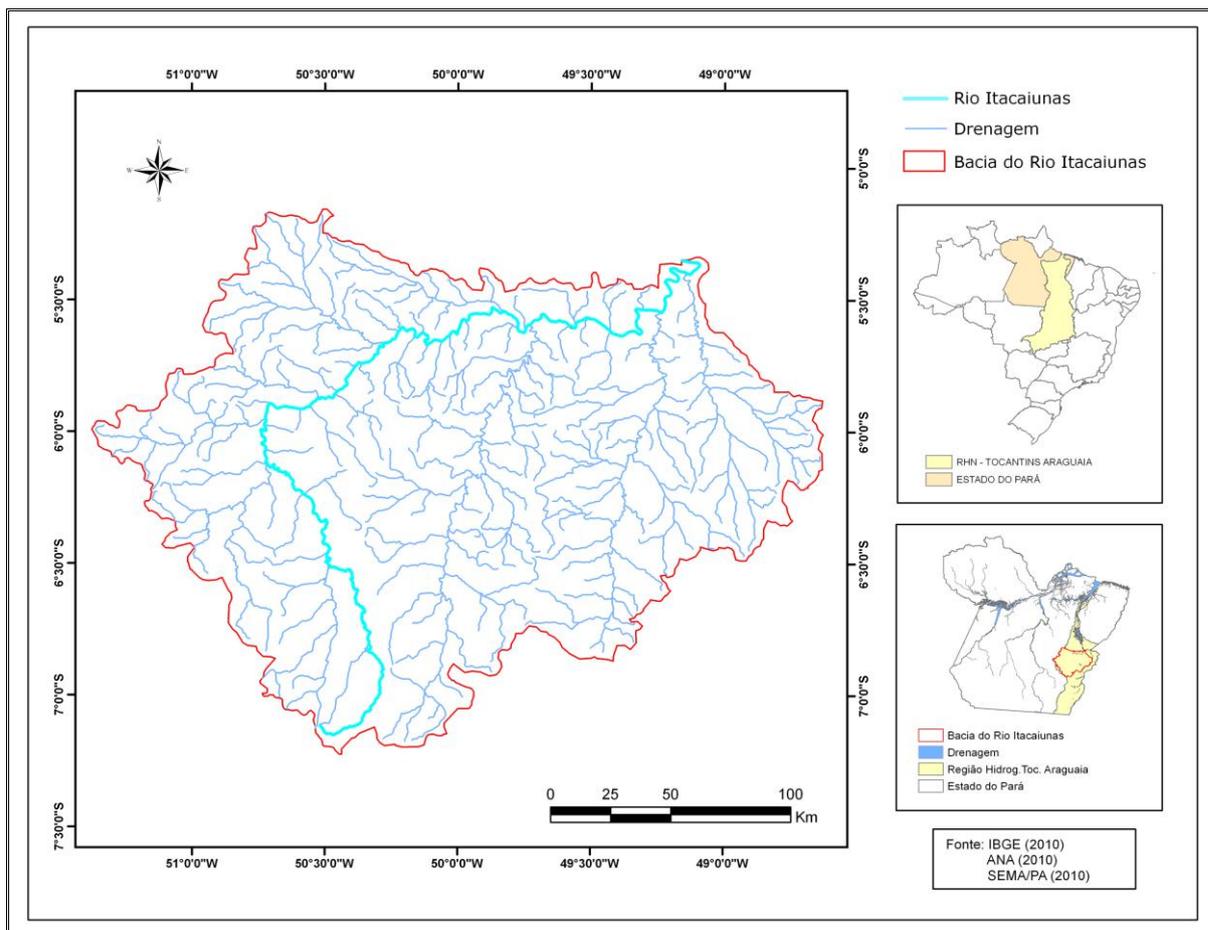


Figura 01: Bacia do rio Itacaiunas

#### 4.1.1 Clima

No Estado do Pará há a ocorrência de três distintos tipos climáticos, segundo a classificação de Köppen: Af, Am e Aw.

O primeiro, cuja representação em termos de abrangência estadual é a menor dentre os três, não apresenta estação seca, com o mês menos chuvoso registrando precipitação igual ou superior a 60 mm. O segundo (Am) é considerado um clima intermediário entre o Af e Aw, com estação seca moderada e ocorrência de no mínimo um mês com precipitação média menor que 60 mm.

Entretanto, o subtipo climático predominante na região em estudo corresponde ao Aw (figura 02). Este se estende do extremo sudoeste à leste e parte do nordeste paraense. Tal clima se caracteriza por apresentar um inverno seco bem definido, com ocorrência de meses com precipitação média inferior a 60 mm (ROCHA, 2009).

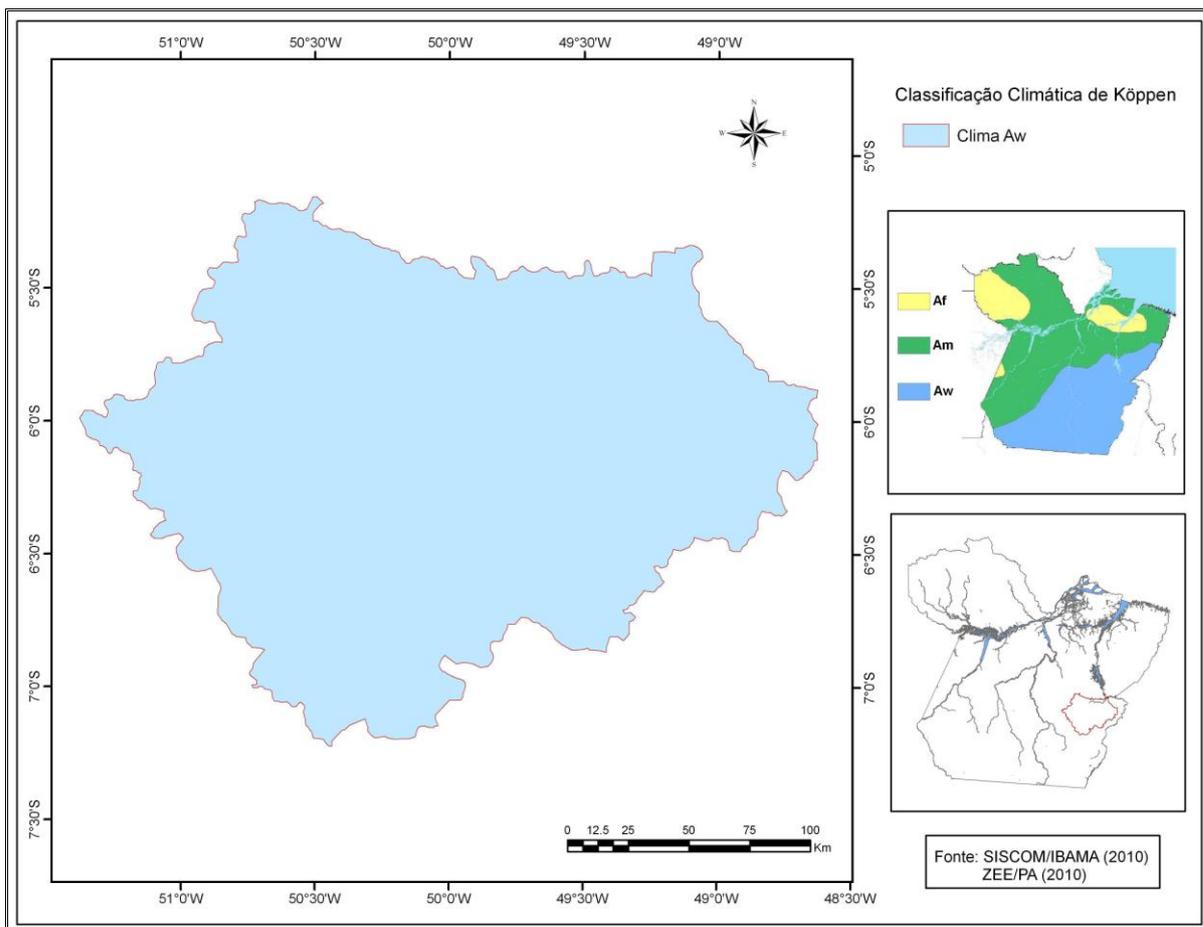


Figura 02: Clima da bacia do rio Itacaiunas

#### 4.1.2 Vegetação

Ao longo da bacia hidrográfica do rio Itacaiunas havia originalmente cinco diferentes tipologias vegetais: Floresta Ombrófila Densa Submontana, Floresta Ombrófila Aberta Submontana, Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, Floresta Ombrófila Densa Montana e Savana Estacional Parque (figura 03).

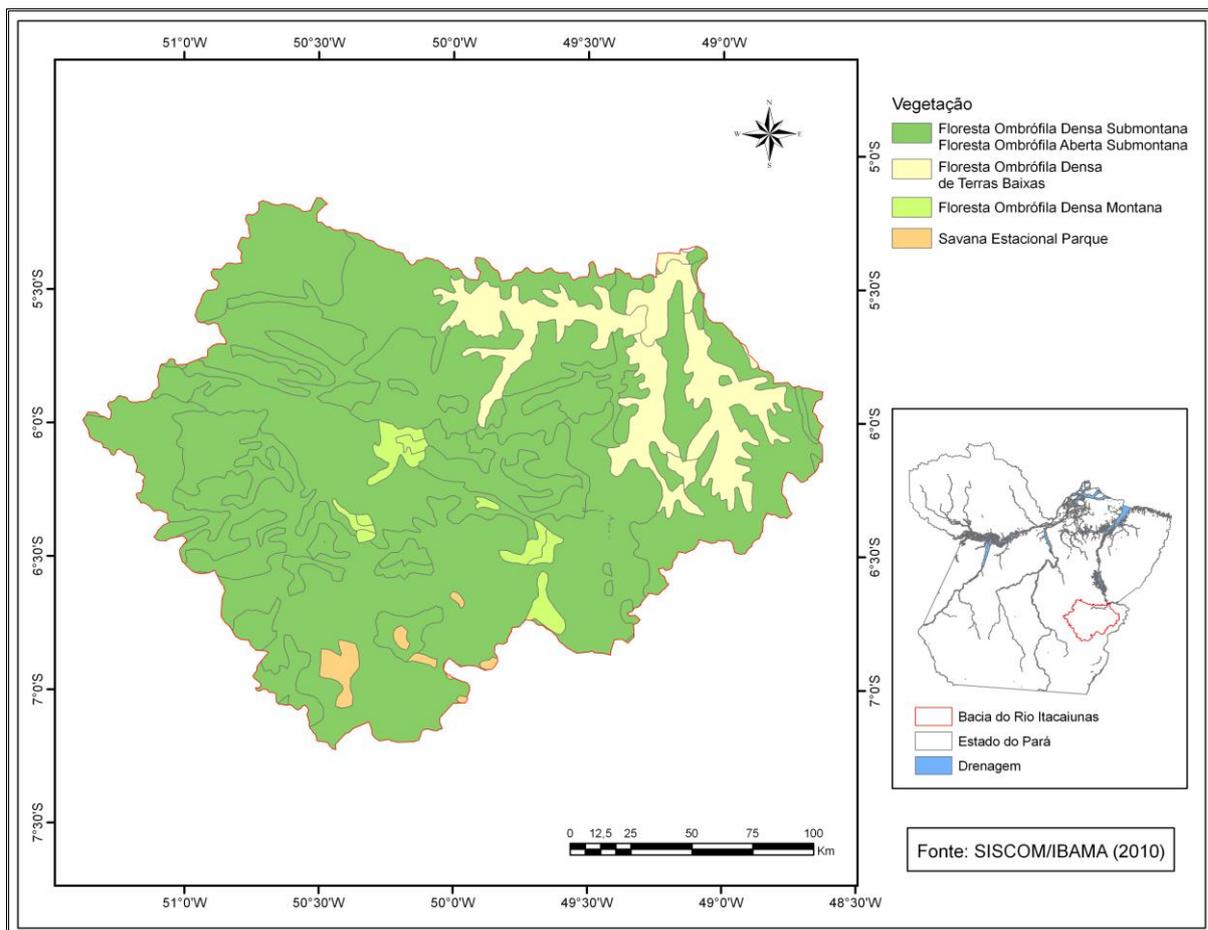


Figura 03: Tipologias vegetais da bacia do rio Itacaiunas

Segundo Veloso et al. (1991) as tipologias vegetais da região possuem as seguintes características:

- a Floresta Ombrófila Densa Submontana caracteriza-se principalmente por ecótipos que variam sob influência dos ambientes de acordo com a latitude, devendo-se ressaltar o fator de tempo nessa variação ambiental;
- neste tipo de vegetação destacam-se os fanerófitos de alto porte, que chegam a ultrapassar os 50 m na Amazônia;
- a formação Floresta Ombrófila Aberta Submontana encontra-se distribuída por toda a Amazônia; na região ela ocorre com quatro faciações florísticas - com palmeiras, com cipó, com sororoca e com bambu - entre os 4° de latitude Norte e os 16° de latitude Sul, situadas acima dos 100 m de altitude e não raras vezes chegando a cerca de 600 m;
- a faciação de floresta de cipó que era mais expressiva no sul do Estado do Pará, sobretudo nas depressões circulares do Pré-Cambriano e aí chamada “mata-de cipó”, encontra-se distribuída por toda a Amazônia;

- a Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas é uma formação que ocupa normalmente as planícies costeiras, capeadas por tabuleiros pliopleistocênicos do Grupo Barreiras. Sua ocorrência vai desde a Amazônia, estendendo-se através de todo o Nordeste, até próximo do rio São João, no Rio de Janeiro;
- estes tabuleiros apresentam florística típica caracterizada por ecótipos dos gêneros *Ficus*, *Alchornea*, *Tabebuia* e pela “ochlospécie” *Tapirira guianensis*;
- o alto dos planaltos e das serras situados entre 600 e 2000 m de altitude na Amazônia é ocupado por uma formação florestal denominada de Floresta Ombrófila Densa Montana;
- a estrutura florestal de dossel uniforme (mais ou menos 20 m) é representada por ecótipos relativamente finos com casca grossa e rugosa, folhas miúdas e de consistência coriácea, tomando os gêneros *Erisma* e *Vochysia* para a Amazônia, onde se constata uma submata de nanofanerófitos rosulados, como a palmeira de pequeno porte do gênero *Bactris* e a Cycadalesdo gênero *Zamia* (verdadeiro fóssil vivo), ocorrendo também regeneração natural do estrato arbóreo;
- a Savana é um tipo de vegetação definida como xeromorfa preferencialmente de clima estacional (mais ou menos 6 meses secos), não obstante podendo ser encontrada também em clima ombrófilo; reveste solos lixiviados aluminizados, apresentando sinúsias de hemicriptófitos, geófitos e fanerófitos oligotróficos de pequeno porte, com ocorrência por toda a Zona Neotropical;
- o subgrupo Savana Parque por sua vez é essencialmente formado por um estrato graminóide, integrado por hemicriptófitos e geófitos de florística natural ou antropizada, entremeado por nanofanerófitos isolados, com conotação típica de um “parque inglês” (*Parkland*).

#### 4.1.3 Geologia

A geologia local é representada por 15 diferentes unidades. São elas: Aluviões indiferenciados ou antigos, Complexo Xingu, Formação Itapecuru, Granodiorito Rio Maria, Grupo Buritirama, Grupo Estrondo, Grupo Grão Pará, Grupo Pojuca, Grupo Rio Fresco, Grupo Rio Novo, Grupo Tocantins, Grupo Tucuruí, Rochas Básicas, Suíte Intrusiva Serra dos Carajás e Supergrupo Andorinhas (figura 04).

Dentre todas as unidades aquelas que possuem o maior nível de representatividade na bacia são o Complexo Xingu, e os Grupos Rio Fresco e Tocantins.

Tais unidades serão descritas com base nos trabalhos de Freitas Filho (2006) e Vasquez e Rosa-Costa (2008):

- O grupo Rio Fresco é representado pelas ocorrências descritas nas serras dos Gradaús e da Tocandera, no rio Fresco e seus afluentes, o igarapé Tepore e os rios da Ponte, Naja, Trairão e Juari. O grupo rio Fresco também é registrado no Domínio Santana do Araguaia, representado pela Formação Rio Naja, que ocorre em pequenos corpos localizados na porção noroeste do referido domínio, sotoposta principalmente ao complexo Santana do Araguaia e a sequência Mururé.
- O grupo Tocantins está dividido em duas unidades distintas: Formação Tucuruí e Unidade Superior.
- A Formação Tucuruí é definida por um pacote inferior constituído essencialmente por um conjunto de derrames basálticos, com espessura em torno de 300 a 500 m, e de no máximo 400 m para cada derrame individual que é subjacente a um pacote sedimentar, com espessura de 150 a 250 m, composto principalmente por metagrauvascas.
- A Unidade Superior é distinguida da Formação Tucuruí por uma falha de empurrão de dimensões regionais, caracterizada por mostrar rochas com grau de metamorfismo mais elevado, sendo basicamente constituída por clorita-xistos, quartzitos, metabasitos e filitos.
- O Complexo Xingu restringe-se somente ao Domínio Carajás e estende-se ao norte até o Lineamento Cinzento. Este balizador está associado a bruscos contrastes metamórficos, litológicos, estruturais e de granitogênese (de um lado e de outro), além de estar associado a zonas anormalmente mineralizadas.
- Ele incorpora embasamento mesoarqueano, composto por ortognaisses e migmatitos associados, fortemente bimodais (ricos em ortoanfíbios) que formam embasamento ou encaixantes da sequência de greenstone belts e granitóides neoarqueano do Domínio Carajás. Predominam composições tonalíticas granodioríticas e trondhjemíticas subordinadas, além de supostos corpos granitóides pouco estudados.

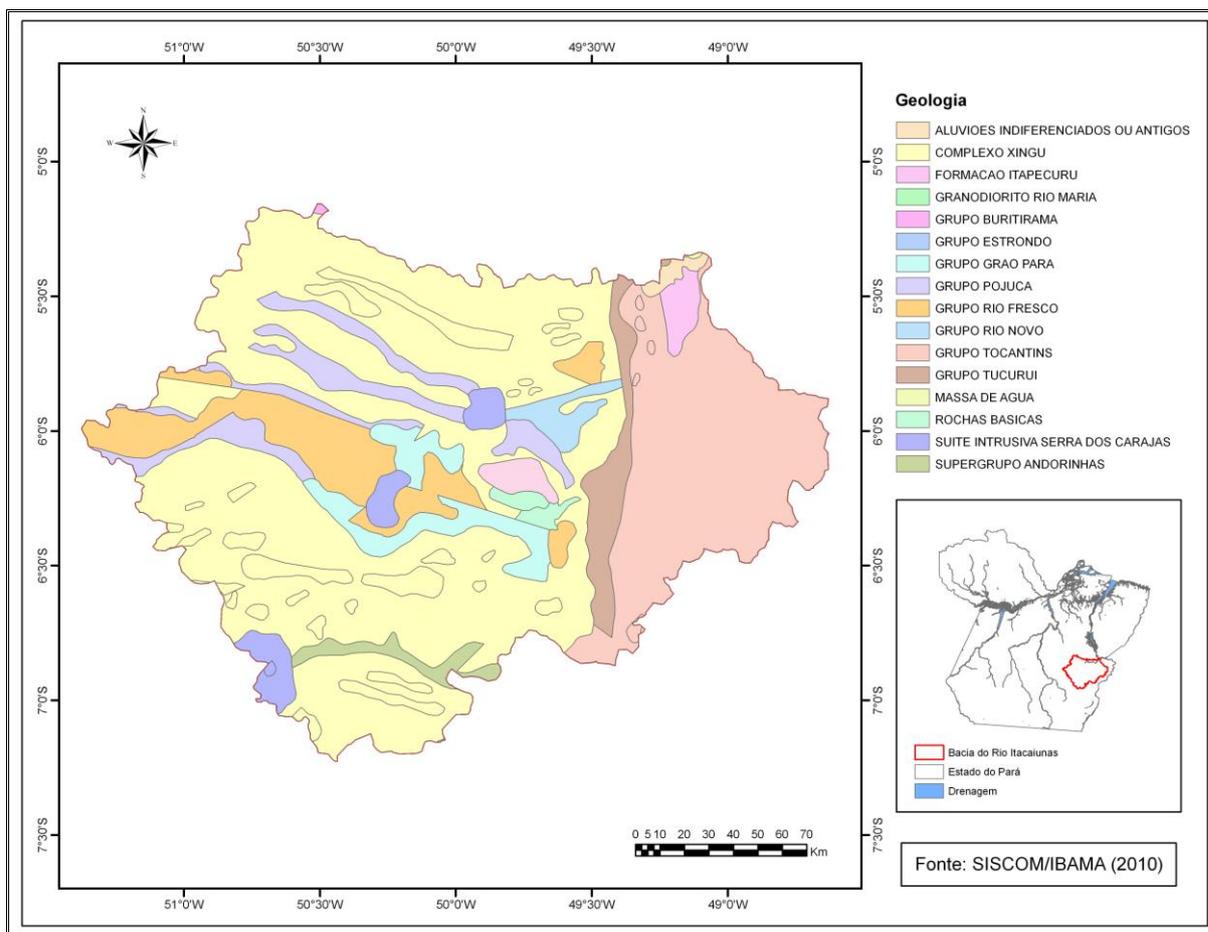


Figura 04: Geologia da bacia do rio Itacaiunas

#### 4.1.4 Geomorfologia

As feições geomorfológicas presentes na bacia do rio Itacaiunas são: acumulação de planície fluvial; dissecação convexa, estrutural e aguçada; e pediplano retocado desnudado (figura 05).

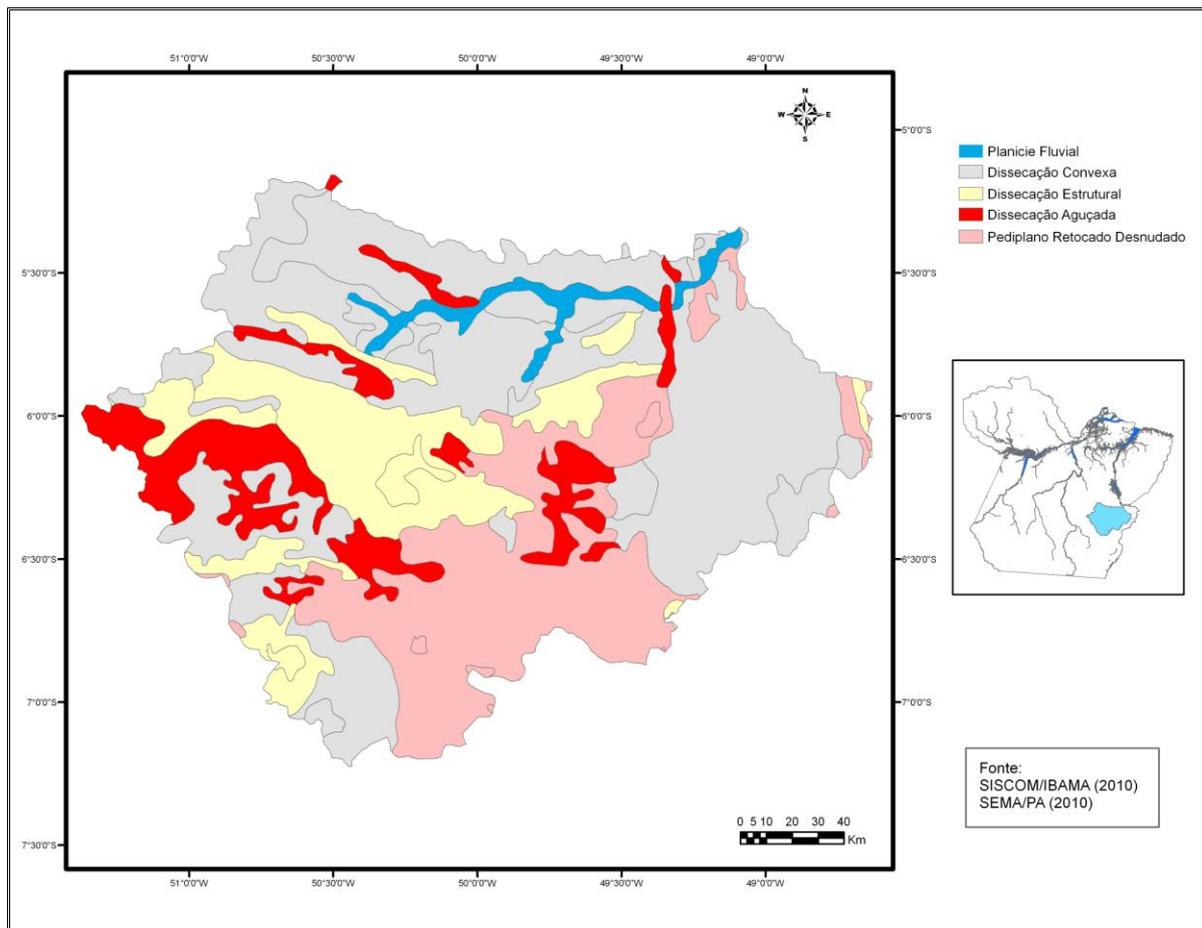


Figura 05: Geomorfologia da bacia do rio Itacaiunas

Nunes et al. (1994) descreveram as principais unidades componentes da geologia regional:

- a Planície fluvial é um modelado de acumulação que compreende uma área plana resultante de acumulação fluvial sujeita a inundações periódicas, correspondendo às várzeas atuais;
- o Pediplano retocado desnudado é um modelado de aplanamento que constitui uma superfície de aplanamento elaborada durante fases sucessivas de retomada de erosão, sem, no entanto, perder suas características de aplanamento, cujos processos geram sistemas às vezes levemente côncavos. Pode apresentar superfície detrítica e/ou encouraçamentos com mais de 1 m de espessura, indicando rochas pouco alteradas truncadas por processos de aplanamento que desnudaram o relevo;
- a Dissecação estrutural, ou diferencial, é aquela marcada por controle estrutural, definida apenas pela variável aprofundamento da drenagem já que o padrão de drenagem e sua densidade são controlados pela tectônica e pela litologia. O

aprofundamento das incisões é estabelecido pela média da frequência dos desníveis medidos em perfis transversais aos vales contidos na área amostrada, classificado em muito fraco, fraco, médio, forte e muito forte;

- as dissecções convexa e aguçada, por sua vez, são modelados de dissecção homogênea fluvial diferenciados apenas pela feição do topo, que não obedece nenhum controle estrutural, definida pela combinação das variáveis densidade e aprofundamento da drenagem. A densidade é a relação entre o comprimento total dos canais e a área amostrada, classificada em muito grosseira, grosseira, média, fina e muito fina. O aprofundamento das incisões é estabelecido pela média das frequências dos desníveis medidos em perfis transversais aos vales contidos na área amostrada, classificado em muito fraco, fraco, médio, forte e muito forte.

## 4.2 REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

### 4.2.1 Generalidades

A adequada gestão dos recursos hídricos depende substancialmente do conhecimento sobre o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas (FIOREZE; OLIVEIRA; FRANCO, 2008).

A disponibilidade de água em rios, lagos e aquíferos, por sua vez, depende de diversos fatores relacionados entre outros, ao clima, ao relevo e à geologia da região; e deve atender aos usos múltiplos das bacias, tais como abastecimento público, abastecimento industrial, agricultura, navegação e geração de energia. Contudo, é necessário dispor-se de informações adquiridas ao longo do tempo e no espaço geográfico de uma região hidrográfica (chuvas e vazões), de forma a permitir o planejamento dos recursos hídricos (EUCLYDES et al. 2007).

A análise dos valores de vazões que caracterizam uma dada região é uma das etapas de maior importância para o planejamento e aproveitamento de recursos hídricos. Entretanto, a obtenção dos valores de vazão, e também de precipitação, nem sempre se constitui em uma tarefa fácil (BARROS ; BARP, 2002).

Os dados hidrológicos brutos são normalmente coletados em postos fluviométricos espalhados em corpos hídricos, dentro das regiões hidrográficas. Eles são obtidos por meio de instrumentos (régua limnimétrica e/ou linígrafo) que medem as variações do nível de água, ao longo do tempo, na seção de controle. As leituras em réguas limnimétricas são realizadas uma ou duas vezes por dia em horários fixos; os linígrafos, por sua vez, fazem registros contínuos e são mais indicados para corpos hídricos que possuem variações rápidas nos níveis de água. A série de altura de água então é transformada em série de vazão por meio do uso de uma equação específica que relaciona nível e descarga, chamada curva-chave (OLIVEIRA, 2008).

Estes dados, como mencionado, são obtidos através de redes de monitoramento hidrométricos e hidroclimatológicas distribuídas sobre uma determinada região geográfica, na qual são obtidos os registros fluviométricos, pluviométricos e climáticos. Tais registros podem ser associados a um local específico, caso dos dados obtidos de postos pluviométricos e/ou climático, ou a uma determinada área (bacia hidrográfica), como ocorre com os registros das estações fluviométricas (BRUSA, 2004).

De acordo com Pinto (2006) no Brasil, no início do século XX, o extinto Serviço Geológico e Mineralógico realizou campanhas pelo interior do país para a execução de estudos que compreendiam levantamentos topográficos de cachoeiras e corredeiras, bem como as primeiras medidas de descarga de rios para avaliação do potencial hidráulico. A primeira grande expansão da rede hidrométrica ocorreu nas décadas de 30, 40 e 50 devido à necessidade de identificação de potenciais hidráulicos para a geração de energia, principalmente aproveitamentos de grande e médio porte, motivo da pequena disponibilidade de estações para áreas de drenagem inferiores a 500 km<sup>2</sup>.

Neste sentido, torna-se notório que a expansão da rede hidrométrica acompanha o desenvolvimento econômico do país, ou seja, existem longas séries históricas de dados em áreas onde há ocupação e vias de comunicação implantadas há mais tempo. A preocupação com a instalação de estações que atendessem outros setores tais como agricultura e abastecimento, passou a ocorrer depois da década de 70 (PINTO, 2006).

Outros fatores que explicam a priorização de instalação de redes de monitoramento em grandes bacias no Brasil referem-se aos custos elevados de instalação e manutenção de postos em pequenas bacias e a dificuldade de

cobertura de todo o território nacional, dadas suas dimensões continentais (SILVA-JÚNIOR et al., 2003).

Rodriguez (2008) destaca, porém, que a instalação de novas estações implicaria em um aumento de custos e não solucionaria imediatamente o problema da ausência de informações nestes locais, uma vez que levaria alguns anos para a obtenção de uma série de dados de vazão, a qual seria necessária para a estimativa das variáveis hidrológicas, retardando dessa forma a gestão de recursos hídricos. O processo de desenvolvimento não pode ser parado por este tipo de deficiência, pois as necessidades humanas continuam a exigir o uso dos recursos naturais.

Conclui-se que a falta de dados hidrométricos, em quantidade e cobertura adequada, tanto na escala espacial quanto temporal, é uma realidade, traduzindo-se numa das principais dificuldades em recursos hídricos, e isso nada mais é do que um reflexo da precária cobertura das redes de postos fluviométricos existentes no país (MARACAJÁ, 2005).

Neste contexto de carência de dados, estudos hidrológicos devem ser realizados para conduzir estimativas de disponibilidade hídrica. Dentre os métodos, o de proporção de áreas, os interpolativos e os de regionalização, constituem-se em técnicas expedidas com ampla utilização, que merecem ser avaliadas quanto à aplicabilidade, para suprir a deficiência de dados e estimar a disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2006).

#### **4.2.2 Conceito e classificação**

A regionalização hidrológica corresponde a um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que exploram ao máximo as informações existentes em uma dada região, visando à estimativa de variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados insuficientes (TUCCI, 2004).

Essas transferências de informação podem abranger séries de vazões ou precipitações, ou de determinados parâmetros estatísticos relevantes como: média, variância, máximos e mínimos ou equações e parâmetros relacionados a estas estatísticas (RODRIGUEZ, 2008). Segundo SILVA-JÚNIOR et al. (2003) a regionalização não substitui as informações, apenas busca uma melhor estimativa em face das incertezas existentes.

Nesse sentido, a regionalização hidrológica representa uma alternativa que procura compensar a insuficiente caracterização temporal do comportamento de eventos por uma coerente caracterização espacial da variável hidrológica vazão (NAGHETTINI; PINTO, 2007). A qualidade dos dados, entretanto, é essencial para o processo de regionalização, pois nenhum estudo gera novas informações, apenas explora as informações existentes (MOREIRA, 2006).

Apesar de algumas limitações no emprego da regionalização de vazões, como aquelas referentes à qualidade dos dados, esta técnica vem sendo amplamente empregada na obtenção de disponibilidade hídrica em bacias não monitoradas ou com registros insuficientes em todo o mundo (FIOREZE; OLIVEIRA; FRANCO, 2008).

OLIVEIRA (2008) ressalta ainda que a regionalização hidrológica é um instrumento eficaz em estudos de planejamento e administração de recursos hídricos, possibilitando a obtenção de variáveis hidrológicas de maneira simples e rápida, em consonância com a agilidade que a administração dos recursos hídricos requer para suas decisões.

Em um primeiro momento, em regionalização foram utilizadas fórmulas empíricas e, na medida em que os pesquisadores adquiriram melhor conhecimento dos fundamentos que regem os processos físicos do ciclo hidrológico, juntamente com o incremento na velocidade dos recursos computacionais e o aumento qualitativo dos dados hidrológicos, foram desenvolvidos métodos mais complexos e confiáveis (BRUSA, 2004). Atualmente a regionalização hidrológica caracteriza-se por uma variedade de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar dados de vazão (AGRA et al., 2003).

Porém, um fator em comum na maioria destes refere-se ao uso de características morfométricas e climáticas das bacias, facilmente mensuráveis, que mais explicam a distribuição da vazão nos modelos de regionalização (BARBOSA, 2002; SILVA et al., 2006;).

Uma revisão sobre os principais métodos e suas respectivas classificações quanto aos procedimentos de regionalização podem ser obtidos por consulta a: Brusa (2004), Chaves et al. (2002), Fernandes (2005), Lemos (2006), Maracajá (2005), Moreira (2006), Novaes (2005), Oliveira (2008), Paulo (2007), Pinto (2006) e Rodriguez (2008).

Para efeito de classificação dos métodos de regionalização hidrológica adotou-se neste trabalho aquela descrita em Tucci (2004). Este destaca várias funções características à regionalização hidrológica dentre as quais se destacam:

- funções estatísticas de variáveis hidrológicas: curva de probabilidades de vazões máximas (cheias de T anos), médias ou mínimas; curva de probabilidade de precipitações máximas entre outras;
- funções específicas que relacionam variáveis: curva de regularização, curva de infiltração, curva de permanência;
- parâmetros de modelos hidrológicos: características do hidrograma unitário; parâmetros de outros modelos hidrológicos.

O método de regionalização com base em funções estatísticas, segundo Tucci (2004) se subdivide em outros três. São eles:

**a) métodos que regionalizam parâmetros de uma distribuição estatística:**

Este procedimento considera:

- a. que os dados dos postos da região escolhida são oriundos de um mesmo fenômeno, cujas populações são regidas por uma única distribuição teórica, em que apenas os parâmetros distributivos podem apresentar variação;
- b. que uma única distribuição teórica seja capaz de modelar os dados de um certo posto da região estudada;
- c. uma vez estabelecidas estas premissas, o método consiste em:
  - definir a região homogênea ou as regiões homogêneas, do ponto de vista da variável a ser estudada;
  - calcular os parâmetros necessários ao ajuste;
  - relacionar os parâmetros da distribuição às características físicas, climáticas e hidrogeológicas da região através de análise de regressão;
  - estimar os quantis de interesse.

**b) métodos que regionalizam a vazão com determinado risco:** diferentemente do caso anterior, em que se ajusta uma única distribuição a todos os postos, nesse caso, pode-se ajustar uma ou mais diferentes distribuições. Neste caso a diferença refere-se ao fato de que não é necessário a princípio a definição de

região homogênea. A equação de regressão é estabelecida entre eventos, para tempos de retorno de interesse, e as características da bacia.

**c) métodos que regionalizam uma curva de probabilidade adimensional e o fator de adimensionalização:** Este método consiste na definição de uma curva de frequência regional a partir de séries adimensionalizadas. Analisam-se as curvas de cada posto de acordo com suas semelhanças quanto às características físicas e quanto à tendência apresentada em papéis de probabilidade adequados, identificando aquelas que apresentam a mesma tendência. Determina-se uma curva adimensional regional média para esses postos. Em seguida, o fator de adimensionalização é submetido à regressão, para sua eventual associação às características físicas, climáticas ou geomorfológicas. A curva de frequência regional pode ser paramétrica, ou seja, aquela obtida pelo ajuste de uma distribuição de probabilidades aos dados adimensionais regionais, ou não-paramétrica. A curva regional não-paramétrica é definida a partir das curvas empíricas das estações da mesma região homogênea, grafadas em papel de probabilidade. A curva regional não-paramétrica é traçada a sentimento, de maneira que a curva regional seja a mediana das curvas empíricas individuais da região homogênea.

Obregon, Tucci e Goldenfun (1999) ressaltam que estas funções são fundamentais para o melhor gerenciamento de recursos hídricos, a avaliação da rede hidrométrica e para diferentes estudos hidrológicos de uma bacia hidrográfica.

No método de regionalização com base em funções específicas, usam-se normalmente dois procedimentos (TUCCI, 2004):

- a) ajuste de uma função matemática aos dados de cada posto e regionalização dos parâmetros da função matemática;
- b) adimensionalização da função, obtenção de uma curva média com base nas curvas dos diferentes postos e a regressão entre a variável de adimensionalização e características físicas e climáticas.

De acordo com Tucci (2004) a regionalização das vazões máxima, média e mínima deve seguir as seguintes etapas:

- a) Análise dos dados básicos: seleção e análise dos dados para a regionalização.

- b) Curva adimensional de probabilidades: determinação da curva adimensional de probabilidades para os postos selecionados e definição de uma curva adimensional.
- c) Regressão da vazão de adimensionalização: estabelecimento da regressão da vazão de adimensionalização com variáveis físicas e climáticas das bacias selecionadas.
- d) Regiões homogêneas: verificação da necessidade de subdividir em sub-regiões de comportamento hidrológicamente homogêneo, estabelecimento das funções de regionalização, estimativa da vazão desejada e variância da estimativa.
- e) Mapeamento das vazões específicas: para algumas regiões torna-se necessário a representação gráfica dos resultados da regionalização.

Ainda segundo o mesmo autor os modelos hidrológicos nem sempre apresentam relações definidas entre as características físicas do sistema e os seus parâmetros. A estimativa destes parâmetros pode ser obtida quando se dispõe de dados observados no local de interesse. Entretanto, quando isto não se configura, a estimativa pode ser obtida na experiência de outras bacias. Um dos procedimentos é a regionalização destes valores, cujos critérios normalmente utilizados são os seguintes:

- a) determinação de equação de regressão entre o parâmetro ou combinação de parâmetros e características físicas e climáticas da bacias, que podem ser estimadas com base em mapas existentes ou preparados;
- b) definição do intervalo de variação possível dos parâmetros com base em informações características das bacias.

#### **4.2.3 Estudos de regionalização hidrológica em bacias brasileiras**

Conforme mencionado anteriormente, no Brasil pela rede de monitoramento nacional ter sido criada a fim de atender a interesses setoriais (notadamente a geração de energia elétrica) limitados a regiões específicas, e por possuir dimensões continentais, esta ainda não possui a distribuição e densidade ideais, de forma que ainda hoje há locais onde a carência de observações hidrológicas é uma realidade. Neste sentido, esforços para a determinação de regiões hidrológicamente homogêneas e a definição de variáveis hidrológicas regionais têm sido

intensivamente despendidos, sobretudo, a fim de gerar bases mais concretas ao processo de gestão das águas, nos Estados Brasileiros.

Portanto, é conveniente elencar algumas experiências na definição de regiões hidrologicamente homogêneas realizadas no Brasil.

Como meio de determinar variáveis hidrológicas básicas em seções de corpos hídricos da bacia do rio Purus (AM) e fornecer subsídios concretos à gestão de recursos hídricos em uma região hidrológica típica da Amazônia Euclides e Ribeiro (2002) realizaram um exercício de regionalização hidrológica das variáveis vazão máxima anual associada a diferentes períodos de retorno; mínima diária de 7, 15, 30, 60, 90 e 120 dias associadas a diferentes tempos de retorno; vazão média de longo período e curva de permanência de vazões diárias, para probabilidades de 50 a 95%; tendo sido usados dados hidrológico de 13 estações fluviométricas à montante do posto de Valparaíso. Dentre os resultados obtidos destaca-se que para a vazão média de longo período, vazão mínima e curva de permanência a 95% de probabilidade a área estudada compreende uma única região hidrologicamente homogênea; enquanto que para as vazões máximas diárias obtiveram-se duas regiões homogêneas na bacia.

Ribeiro, Marques e Silva (2005) realizaram avaliação de três métodos de regionalização hidrológica aplicados a bacia do Rio Doce: método tradicional, que utiliza equações de regressão regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas; que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente SIG; e interpolação linear, baseada no princípio da vazão específica. Os valores das vazões mínimas  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$  estimados pelos métodos foram comparados aos dados observados em 57 estações utilizadas na regionalização. Os resultados mostraram que dentre todos o que apresentou a maior precisão foi o tradicional, que reportou 7 equações de regionalização de vazões com erro relativo médio de 16.56%. As demais metodologias foram mais eficientes na estimativa de vazões em situações em que a seção onde se deseja determinar a vazão está localizada entre dois postos de vazão conhecida.

Baena et al. (2004) realizaram exercício de regionalização hidrológica das vazões máxima, mínima e média de longo período e da curva de permanência para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a montante da cidade de Volta Redonda, com base em um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente. O método de regionalização tradicional aplicado apontou a existência de 4 regiões

hidrologicamente homogêneas na bacia. Os dados de vazão máxima foram melhor representados pelos modelos de distribuição teórica de probabilidades Log-Normal com dois parâmetros e Pearson III. Já para as séries de vazões mínimas foi Log-Normal com três parâmetros que apresentou os melhores ajustes.

Euclides et al. (2007) realizaram regionalização hidrológica a fim de estimar a potencialidade e a disponibilidade hídrica em seções fluviais de cursos d'água localizados na região hidrográfica compreendida entre os limites da bacia do rio Doce e do rio Itabapoana, pertencente ao estado do Espírito Santo. Os resultados permitiram estimar as variáveis hidrológicas: vazão média de longo período, vazão máxima, vazão mínima, curvas de permanência e curvas de regularização. Foram ainda definidas três regiões hidrologicamente homogêneas para as vazões médias, máximas diárias anuais e mínimas de sete dias consecutivos; bem como uma única região homogênea para as curvas de regularização.

Silva et al. (2006) aplicaram modelos de distribuição de probabilidades às séries históricas de vazões mínimas diárias anuais e mínimas anuais das médias de sete dias consecutivos, para sete estações fluviométricas à montante do reservatório da usina hidrelétrica de Camargos (MG) e desenvolveram modelos matemáticos para regionalização dessas vazões na região, considerando-se as características morfométricas e climáticas das bacias de drenagem monitoradas. Assim como foi realizada uma avaliação preliminar da disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada, tomando-se como referências às vazões  $Q_{7,10}$  e  $Q_{90}$ . Os resultados mostraram que os modelos Gumbel e Log-Normal a 3 parâmetros foram adequados aos dados de vazão diária anual e mínima média de sete dias, porém, o modelo Log-Normal 3 parâmetros produziu ajustes de melhor qualidade. Também se evidenciou que os modelos de regionalização para as vazões mínimas diárias e mínimas médias de sete dias apresentaram boas qualidades estatísticas e os modelos ajustados para cada tempo de retorno apresentaram qualidade estatística superior à do modelo geral.

Barbosa et al. (2005) desenvolveram estudos de construção de modelos matemáticos de regionalização hidrológica na bacia do rio do Carmo (MG), com base na metodologia tradicional. As séries anuais das vazões máximas, médias e mínimas foram ajustadas a modelos de distribuição de probabilidades que permitiram a extrapolação dos dados históricos. Foram também construídos os modelos de regionalização de vazões com base em variáveis físicas e climáticas. Os

resultados demonstraram que toda a bacia do rio Carmo pode ser considerada uma região hidrologicamente homogênea. O modelo de distribuição de probabilidades que representou melhor os dados de vazão média e mínima foi Weibull, enquanto que para as séries de vazões máximas o melhor ajuste foi feito por Pearson tipo III. Também com base nos modelos foram obtidas as vazões para diferentes recorrências.

Chaves et al. (2002) propuseram um método alternativo de obtenção de vazões mínimas com base em interpolação e extrapolação automáticas em ambiente SIG, cujas soluções dependem da posição relativa da seção de interesse a postos fluviométricos próximos, levando a quatro diferentes situações hipotéticas. Como meio de testar a eficiência do método às duas metodologias (tradicional e proposta) foram aplicadas em uma bacia hidrográfica com baixa densidade de postos, onde as vazões mínimas ( $Q_{90}$ ) já haviam sido regionalizadas previamente pela metodologia tradicional. A eficiência de ambas foi aferida pelo erro relativo entre o valor observado e o calculado e pelo índice de eficiência de Nash e Sutcliffe. Os resultados mostraram que o erro médio obtido entre os valores de  $Q_{90}$  calculado pelo método proposto (45.1%) foi significativamente inferior ao obtido pelo método tradicional (289.7%). Além do que o índice de eficiência de ajuste de Nash & Sutcliffe, no caso do método proposto, foi 15% superior ao do método tradicional, indicando que o primeiro apresentou maior precisão.

Agra et al. (2003) compararam resultados obtidos para a regionalização das séries históricas, e suas características, bem como da curva de permanência de vazões, por três metodologias: vazão específica, equações de regionalização e uma terceira baseada na utilização do coeficiente de escoamento como parâmetro regional. Com base na avaliação evidenciou-se que a curva de permanência observada para a área de 1250 km<sup>2</sup>, o método da vazão específica apresentou o melhor comportamento, com um erro médio no intervalo de análise e desvio padrão do erro de 4%. A aplicação do método do coeficiente de escoamento apresentou valores de vazão 37% acima dos valores observados em média, com um desvio de 15% para o intervalo de análise da curva de permanência. O uso da curva de regionalização apresentou valores de vazão de permanência da ordem de 23% abaixo dos valores da curva de permanência existente, com um desvio padrão de 11%.

Fioreze et al. (2008) avaliaram o desempenho de equações de regionalização de vazões média de longo período, mínima, máxima, com 95% de permanência, mínima com sete dias de duração e recorrência de dez anos e médias mensais ajustadas para a bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, em Goiás. Foram utilizados o erro relativo, o coeficiente de correlação  $r$ , o índice de concordância de Willmott e o índice  $c$  para avaliar o desempenho dos modelos. De um modo geral os modelos de regionalização avaliados apresentaram um bom desempenho na estimativa das vazões médias, mas inadequados para os eventos extremos (vazões máximas e mínimas). Aqueles gerados após a definição de regiões homogêneas apresentaram melhor desempenho que os que desconsideram tal aspecto. Os modelos que incorporam a precipitação média como variável explicativa não permitiram a obtenção de uma equação para correção dos valores estimados, indicando que tais equações não são robustas a ponto de serem utilizadas indiscriminadamente. O modelo que estima a  $Q_{95}$  permitiu sua estimativa com erro aceitável, e pode ser facilmente empregado em diferentes pontos da bacia.

Córdova, Pinheiro e Pinheiro (2000) realizaram regionalização hidrológica da bacia do rio Itajaí (SC) com base na permanência de vazões a 80%, utilizando dados de 27 estações fluviométricas. Como variável explicativa da vazão foi utilizada unicamente a área de drenagem de cada posto, sendo ajustados os modelos linear, exponencial, polinomial, potencial e logarítmico. Os resultados indicaram que a função potência, cujo  $R^2$  calculado foi 0,8833, é mais representativa de uma condição de homogeneidade dentro desta bacia.

Saunders e Nascimento (2008) realizaram estudo da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio São João, no estado do Rio de Janeiro. A metodologia utilizada foi a *index-flood* onde os dados de vazão média de longo período das estações da região foram submetidos à regressão usando como variáveis explicativas a área de drenagem e o perímetro. Os resultados evidenciaram uma disponibilidade hídrica na bacia da ordem de 47.94 m<sup>3</sup>/s.

#### **4.2.4 Estudos de regionalização climática no Brasil**

Uma abordagem que vêm sendo bastante desenvolvida e que de certa forma complementa os trabalhos de regionalização hidrológica refere-se aos estudos da

variabilidade espacial e temporal das variáveis climáticas; e a regionalização com base na definição de regiões climaticamente homogêneas.

A simulação de dados climáticos para regiões consideradas homogêneas é uma alternativa para se realizar estudos em áreas que apresentam limitações relativas ao volume de dados disponíveis (MARTIN et al., 2008a).

A utilização da informação local espacialmente disseminada por intermédio da delimitação das regiões homogêneas atenua erros de amostragem, incrementando a confiabilidade das inferências estatísticas locais, podendo oferecer como exemplo, subsídios para a regionalização hidrológica (MELO-JÚNIOR et al., 2006).

Em decorrência disto, muitos trabalhos com estas abordagens têm sido desenvolvidos no Brasil.

Silva, Lermen e Nery (2001) analisaram a variabilidade interanual da precipitação mensal e anual na bacia do rio Iguaçu (PR), utilizando a técnica estatística *boxplot*, com base em dados de 31 estações distribuídos entre 1967-1997. No processo de obtenção das regiões homogêneas os autores utilizaram Análise de Componentes Principais (ACP) seguida de análise de *Cluster* pelo método de Ward, tendo observado ao final a ocorrência de três regiões homogêneas na bacia.

Sansigolo, Pereira e Silva (2004) promoveram estudo das relações simultâneas e defasadas entre as categorias de precipitação em grupos homogêneos na região Sul do Brasil e as categorias de TSM nos oceanos Pacífico e Atlântico, utilizando tabelas de contingência 3 x 3 avaliadas pelo escore das características operacionais. Foram utilizados os totais mensais de precipitação de 61 estações pluviométricas, no período de janeiro de 1950 a dezembro de 1997. Pela análise de grupamento das precipitações mensais usando os principais fatores comuns espaciais, que explicaram 85,8% da variância regional, e temporais, que explicaram 59,3% da variância sazonal, foram obtidos três grupos homogêneos: Litorâneo, Sul e Continental, para o Sul do Brasil.

Bravo et al. (2008) propuseram uma metodologia para o estudo da variabilidade espacial da ocorrência das precipitações máximas através da regionalização de curvas intensidade, duração e frequência em locais onde não existem dados de pluviógrafos. Para tanto foram utilizados dados de 24 postos com 20 ou mais anos de observação, do Distrito Federal. A aplicação da metodologia foi definida como válida à cidade de Brasília, obtendo resultados coerentes.

Com o objetivo de demarcar regiões homogêneas e obter estimativas do número de anos de avaliação para as variáveis insolação, radiação solar e radiação fotossinteticamente ativa para o Estado de São Paulo, Martin et al. (2008b) aplicaram o teste de Barlett, a 5% de probabilidade de erro, em 18 locais com série histórica de média mensal, e em seguida utilizaram análise de *cluster* pelo método de Ward. Foram obtidos três grupos homogêneos de municípios, em que existe variabilidade temporal e espacial de estimativas de insolação, radiação solar e radiação fotossinteticamente ativa.

André et al. (2008) estabeleceram regiões pluviometricamente homogêneas utilizando análise hierárquica e não-hierárquica de agrupamento, com base em precipitações médias mensais, no Estado do Rio de Janeiro, de 46 estações meteorológicas em um período de 30 anos. Os resultados apontaram à existência de seis regiões climaticamente homogêneas no estado, com cerca de 70 a 80% das precipitações ocorrendo no verão e 20 a 30% no inverno.

Versiani e Carneiro (2001) aplicaram o método TCEV (Two Component Extreme Value) e momentos-L para avaliar os efeitos da heterogeneidade espacial e temporal da informação disponível na distribuição regional das precipitações e vazões extremas, a fim de regionalizar climaticamente à bacia do rio São Francisco (MG). Os autores identificaram a ocorrência de duas regiões homogêneas, que são aproximadamente as mesmas para precipitação e vazões, tanto pelo método TCEV quanto momentos-L.

O método hierárquico de aglomeração de Ward, tendo como medida de dissimilaridade a distância euclidiana, foi aplicado por Santos, Galvíncio e Moura (2008) para identificar as regiões pluviometricamente ativas homogêneas na bacia hidrográfica do rio Goiana (PE), com dados de seis postos. Foram obtidas três regiões pluviometricamente homogêneas, havendo relação destas com fatores longitudinais e topográficos, segundo os autores.

Almeida et al. (2009) realizaram regionalização climática para o Estado do Espírito Santo pelo método de agrupamento de Ward, utilizando dados de clima e relevo. Os resultados mostraram a existência de seis distintas regiões homogêneas no Estado.

Keller Filho, Assad e Lima (2005) realizaram procedimentos a fim de identificar regiões homogêneas quanto à distribuição de probabilidades de ocorrência de chuvas e contribuir para os estudos de riscos climáticos na agricultura,

no Brasil. Foram usados dados de precipitação de 2341 postos fluviométricos, com séries variando de 15 a 35 anos, agrupados em grupos de pântadas. Como método de agrupamento foi utilizado o da variância mínima, com base em vários estudos empíricos. Ao final seis áreas homogêneas, contendo outras vinte e cinco zonas pluviometricamente homogêneas, foram evidenciadas no território brasileiro, sendo representativas da diversidade climática do país.

Valverde et al. (2003) aplicaram metodologia de regionalização climática na bacia do rio Doce baseada no método de momentos-L, para estimar os parâmetros das distribuições de probabilidades com maior aderência aos dados de intensidades máximas de precipitação, e posteriormente análise de agrupamento pelo método de Ward. Foram utilizados dados de 31 estações pluviográficas da bacia. Os autores, dentre outros resultados, puderam definir cinco regiões homogêneas na bacia estudada.

Fechine e Galvíncio (2008b) procederam a trabalho de regionalização climática a fim de definir regiões pluviometricamente homogêneas no âmbito da bacia do rio Brígida, no semi-árido Pernambucano. Foi aplicado o método de agrupamento de Ward a dados de precipitação de estações, presentes na área de estudo, no período de 1964 a 2006. Os resultados evidenciaram que a bacia pode ser dividida em três grupos distintos pluviometricamente homogêneos.

Andrade-Júnior et al. (2005) apresentaram uma nova proposta de classificação climática e regionalização da região semi-árida do Estado do Piauí, utilizando o índice de umidade de Thornthwaite, obtido de balanços hídricos efetuados em diferentes cenários pluviométricos. Foram definidos seis tipos climáticos em cada cenário projetado. Os autores concluíram que a variabilidade observada, em termos de área e de número de municípios, expressa a tendência natural da variabilidade temporal e espacial da precipitação, refletida na caracterização dos cenários pluviométricos compatíveis com a realidade física.

#### **4.2.5 Análises morfométricas de bacias hidrográficas brasileiras**

Em decorrência da facilidade que o advento da ferramenta SIG proveu às análises morfométricas muitos estudos deste tipo tem se desenvolvido no Brasil apoiando substancialmente a obtenção de variáveis físicas nos exercícios de

regionalização hidrológica. Desta forma é conveniente comentar alguns dos trabalhos realizados no país.

Moura et al. (2006) realizaram caracterização morfométrica da fisiografia de cinco pontos de controle, a partir dos pontos de lançamento de esgotos na microbacia do córrego Água Bomba, em Regente Feijó (RJ). Os resultados obtidos revelaram que a bacia possui área de 61,49 Km<sup>2</sup>, densidade de drenagem de 1,06 km/km<sup>2</sup> e declividade equivalente de 0,006m/m, dentre outros resultados.

A fim de promover a caracterização física da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz e analisar o cumprimento da legislação vigente quanto as APP's (áreas de preservação permanente), Pinto et al. (2005) realizaram análise morfométrica e de uso/ocupação da terra com uso do SIG Spring. Alguns dos resultados obtidos apontam que a bacia possui área de 86.99 km<sup>2</sup> e caracteriza-se como uma unidade de quinta ordem, segundo os critérios de Strahler. A densidade de drenagem com valor de 2,35 km/km<sup>2</sup> é considerada alta. Há predominância na bacia de relevo suave ondulado a ondulado com valores de declividade na faixa de 6 a 12%. Além disso, 58% das APP's apresentaram algum uso conflitante.

Silva e Cunha (2008) realizaram análise das características morfométricas da bacia do Córrego do Lajeado (SP), com uso do programa Autocad Map, a fim de compreender as alterações antrópicas nas áreas de nascente atualmente ocupadas por atividade agropecuária e em parte por fragmentos de mata. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que em função do uso desordenado do solo, no conjunto da bacia, as nascentes e os cursos d'água estão comprometidos, enquanto elementos da paisagem responsáveis pela manutenção dos recursos hídricos.

Pissarra, Politano e Ferraudo (2004) promoveram avaliação das características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do Córrego Rico, em Jaboticabal (SP), com vistas ao planejamento ambiental da bacia. Os resultados evidenciaram que a densidade de drenagem e a amplitude altimétrica foram as características que mais contribuíram para o poder discriminatório na relação solo-superfície. Além de que as características do padrão de drenagem e do relevo repercutiram no comportamento hidrológico e litológico das sub-bacias, possibilitando a diferenciação entre as unidades de solos.

Com o objetivo de obter um índice de vulnerabilidade ambiental com maior controle sobre os fatores que contribuem aos processos erosivos, Costa et al. (2007)

promoveram a integração entre resultados do modelo USLE (Universal Soil Loss Equation), das variáveis morfométricas extraídas por sub-bacias hidrográficas e do mapeamento do uso/ocupação da terra em sub-bacias hidrográficas do Rio de Janeiro, utilizando a ferramenta SIG IDRISI Kilimanjaro. Dentre os diversos resultados, os autores concluíram que as bacias mais vulneráveis concentram-se no Vale do Paraíba e no noroeste do Estado, com a ocorrência de vulnerabilidade ambiental muito severa para algumas bacias que contém a calha do rio Paraíba do Sul.

Porto, Andrade e Costa (2004) realizaram regionalização de sub-bacias do Estado do Ceará, utilizando técnica de análise de agrupamento (Método de Ward), com o objetivo de identificar e agrupar aquelas com características físicas homogêneas. Os autores observaram que as bacias do Ceará possuem uma rede de drenagem bastante deficiente, típica de regiões semi-áridas. O grau de similaridade entre as bacias permitiu agrupá-las em três grupos, sendo que as variáveis densidade de drenagem e área de drenagem se mostraram como as mais importantes na definição dos grupos.

De forma geral tanto as variáveis descritivas do terreno, quanto às climáticas vão interferir de forma direta na resposta hidrológica, sendo necessário o uso de métodos que possibilitem identificar estas de maneira quantitativa e qualitativa para melhor atender as demandas de gerenciamento e mitigação de impactos.

Contudo, além dos fatores naturais mencionados, também possui caráter determinante no balanço hídrico e comportamento hidrológico das bacias aqueles de origem antrópica que promovem profundas mudanças na paisagem que via de regra afetam o regime de precipitações e vazões em diferentes escalas temporais e espaciais.

Neste sentido é necessária uma breve revisão sobre a relação entre as mudanças no uso da terra e os componentes do ciclo hidrológico, bem como as formas atualmente empregadas no monitoramento da paisagem.

#### 4.3 MUDANÇAS NO USO DA TERRA E SENSORIAMENTO REMOTO

A atividade desordenada de uso/ocupação da terra, impulsionada pelo modelo econômico vigente e o crescimento populacional, tem resultado na

degradação, fragmentação e esgotamento dos recursos naturais (NASCIMENTO et al., 2006).

O termo “uso/ocupação da terra” pode ser compreendido como a forma pela qual o espaço está sendo ocupado pelo homem ou preenchido pela cobertura natural, respectivamente (LORENA, 2003).

Em escala global as mudanças na paisagem e o desflorestamento estão ocorrendo em um passo acelerado (ANDERSON; ROJAS; SHIMABUKURO, 2003), levando a um sensível aumento da preocupação mundial com o avanço deste processo nas florestas tropicais (RIBEIRO et al. 2005).

A retirada da cobertura vegetal que recobre o solo das florestas tropicais pode levar a grandes mudanças no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, dado a sua grande importância dentro deste contexto.

A influência da vegetação no balanço hídrico tem sido muito estudada, em função da complexidade de sua relação com o ciclo hidrológico e a participação de processos como a evapotranspiração e a interceptação nos processos de *runoff*. Uma área escassa de vegetação possui menores valores de interceptação e de evapotranspiração. Por ocasião de chuvas fortes, os solos encharcam e não há possibilidade de armazenamento adicional, ocasionando maiores volumes escoados e picos de vazão, que é atingido rapidamente (LINHARES, 2006).

Além disso, as consequências do desmatamento sobre os recursos hídricos têm impacto direto na qualidade de vida das populações, afetando o equilíbrio ambiental das áreas drenadas pelas bacias hidrográficas (NASCIMENTO et al., 2005).

Na Amazônia, em particular, as causas do desflorestamento estão frequentemente associadas à atividade pecuária e a expansão da fronteira agrícola (FURLAN, 2009).

De acordo com Fearnside (2006) o desmatamento na Amazônia brasileira, que tem aumentado continuamente e que varia conforme as forças econômicas, tem nos médios e grandes fazendeiros os principais atores da conversão de florestas em pastagens na região.

Fearnside (2006) ainda destaca que o volume de água evapotranspirado pela floresta na Amazônia, e exportado para fora da região pelos processos dinâmicos da atmosfera, é responsável por grande parte das águas precipitadas em outras regiões do Brasil (Centro-Sul) e do mundo, de forma que o clima destes locais está

intimamente relacionado aos processos de ciclagem da águas na Amazônia. Isto também implica que uma drástica redução da floresta Amazônica, poderia levar a profundas mudanças nos padrões do ciclo hidrológico em escala regional e global.

Neste contexto, a necessidade de trabalhos de monitoramento da vegetação e das mudanças no uso/ocupação da terra através de ações integradas de investigação é imprescindível, na Amazônia. Uma das condições impostas para se fazer o monitoramento da cobertura e do uso da terra de uma dada região é a necessidade de dados sequenciais que mostrem a evolução da ocupação desta região (LORENA, 2003), função que o sensoriamento remoto tem permitido executar com agilidade e precisão.

O sensoriamento remoto orbital surgiu inicialmente para aplicações relativas aos usos militares, durante a guerra fria, entretanto, ao seu término muitas das tecnologias perderam a classificação de segredo e vieram a público, favorecendo o desenvolvimento das ciências ligadas às áreas de levantamento, planejamento e monitoramento do uso de recursos naturais (PIROLI et al., 2002).

As técnicas de sensoriamento remoto se apresentam como um recurso tecnológico que atende a necessidade de obter um conhecimento maior destes recursos, produzindo informações repetitivas, multiespectrais, sinópticas e de alta resolução (MONCERATT; PINTO, 1996).

As imagens de satélite e as técnicas de tratamento dos dados obtidos pelos sensores têm permitido o inventário e monitoramento da paisagem, analisando a diversidade de respostas espectrais e texturais que representam as tipologias vegetais e as alterações de uso da terra decorrentes da ocupação humana no tempo (TEOTIA et al., 2003).

Segundo Luchiari (2001) o sistema LANDSAT e o sistema SPOT, colocados no plano orbital para geração de imagens, merecem destaque porque proveram uma série histórica de dados. Essas imagens, além de permitirem a representação do terreno em uma determinada época, possibilitam o acompanhamento da dinâmica de um fenômeno em intervalos anuais, ou em intervalos maiores que um ano. Tais monitoramentos estão relacionados às transformações na utilização da terra, à expansão urbana, aos desmatamentos de áreas florestais, dentre outros. A análise de imagens de uma série histórica subsidia a elaboração de prognósticos, de cenários futuros e de tendências para uma determinada área.

No sentido de racionalizar as soluções e custos de projeto os produtos de sensoriamento remoto têm também sido importantes ferramentas na detecção de danos ambientais, monitoramento de impactos e planejamento da exploração de recursos naturais (ORTIZ; FREITAS, 2005).

Um dos produtos mais usuais e importantes de sensoriamento remoto refere-se aos mapas de uso da terra produzidos com suporte de SIG's, que permite identificar diferentes alvos relativos à cobertura e, ou, ao uso da terra a partir de um processo de classificação multiespectral da imagem obtida pelo sistema sensor (RODRIGUES; ZIMBACK; PIROLI, 2001).

O processo de classificação do uso da terra e a geração de mapas representativos de diferentes períodos de tempo constitui uma ação de monitoramento de grande importância em hidrologia visto que pode permitir prever e mitigar os impactos hidrológicos produzidos por estas mudanças. Logo, o estudo da dinâmica da paisagem passa a ter suma importância no gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas.

#### **4.3.1 Dinâmica da paisagem**

A principal forma de se avaliar a intensidade com que se processam as mudanças no uso da terra e identificar áreas de maior pressão sobre os recursos naturais, bem como elucidar quem são os agentes destas mudanças, é por meio da análise da dinâmica da paisagem.

Este procedimento consiste em avaliar durante períodos sucessivos de tempo a cobertura da terra em uma mesma área geográfica, identificando as tipologias de uso e sua distribuição espacial podendo assim observar os processos de transformação do ambiente natural.

A premissa básica para estes procedimentos de monitoramento consiste na disponibilidade de dados sequenciais da paisagem disponíveis para uma mesma região, usualmente produtos de sensoriamento remoto, e a posterior classificação dos usos da terra adotando-se um mesmo número de classes de uso, que passam então a ter sua evolução acompanhada.

O processo de atribuir significado a um *pixel* em função de suas propriedades numéricas é chamado genericamente de “classificação”. As técnicas de classificação

visam, em última análise, atribuir a cada *pixel* um rótulo de suas propriedades espectrais e/ou espaciais (NOVO, 2008).

A classificação do uso/cobertura da terra divide-se em dois grupos: classificação supervisionada e não-supervisionada.

Na classificação não-supervisionada os *pixels* de uma imagem são alocados em classes sem que o usuário tenha conhecimento prévio de sua existência. Este procedimento permite que o analista conheça a distribuição de *pixels* por classes espectrais. Estas distribuições são analisadas e comparadas com informações de campo ou mapas ou dados teóricos sobre o comportamento espectral de alvos. A classe do terreno à qual pertence cada *pixel* é, portanto, determinada posteriormente (NOVO, 2008).

Segundo a mesma autora, a classificação supervisionada, por sua vez, repousa em um conhecimento prévio do analista sobre a localização espacial de algumas amostras das classes de interesse. Entretanto, Independentemente da técnica adotada a classificação supervisionada se baseia no pressuposto de que cada classe espectral pode ser descrita a partir de amostras fornecidas pelo analista.

#### **4.3.2 Estudos do uso/ocupação da terra no Brasil**

O uso de técnicas de sensoriamento remoto aliadas aos sistemas de informação geográfica não se limitam somente ao estudo da dinâmica da paisagem. A integração com outras áreas de conhecimento têm sido bastante produtiva levando a resultados mais completos, gerando bases concretas para o efetivo gerenciamento dos recursos naturais e ordenamento territorial.

Bolfe et al. (2004) realizaram levantamento dos povoamentos florestais através de classificação digital supervisionada pelo método da máxima verossimilhança, em área localizada na região central do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas imagens TM/Landsat-5 de 1995 e o SIG Idrisi for Windows, dentre outros materiais. Os resultados obtidos mostraram que o maior percentual de florestas nativas da área de estudo corresponde a 32,88%, enquanto que o povoamento de floresta de *Pinus* sp. E *Eucalyptus* sp. representam, respectivamente 1,89 e 0,77%.

Também evidenciaram que a acurácia da classificação mostrou-se bastante satisfatória.

Caneparo (2000) estudou a dinâmica espacial da ocupação antrópica no perímetro urbano de Paranaguá (PR) a fim de avaliar as transformações do espaço entre os anos de 1952, 1962, 1980, e 1996. Para tanto foram utilizados produtos de sensoriamento remoto aliado ao uso de SIG's. Os resultados permitiram ao autor concluir que as perdas ocorridas nos tipos de cobertura vegetal estão associadas à antropização devido à expansão urbana e expansão portuária no local. Além disso, nos locais mais distantes pôde-se associar as perdas de vegetação à abertura de estradas e loteamentos.

Com a finalidade de elaborar um mapa de incompatibilidade de uso da terra, para o município de Engenheiro Paulo Afonso de Frontin/RJ, alicerçado na metodologia de aptidão agrícola da terra; Pereira, Schuback e Carvalho-Júnior (1998) aplicaram técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto cruzando dados de classificação do uso da terra (Maxver) e temas de solos e declividade. Os resultados evidenciaram que 27% da área do município está sendo utilizada de forma mais intensiva do que preconizado pela aptidão agrícola, o que pode acarretar problemas futuros de degradação dessas áreas.

Machado, Vettorazzi e Xavier (2003) promoveram a construção de cenários alternativos de uso e ocupação da terra na microbacia hidrográfica do Ribeirão do Marins (MHRM), afluente do rio Piracicaba, localizado no município de Piracicaba, SP. Para a identificação do uso da terra foi utilizada imagem SPOT de julho de 1998. Os autores concluíram com base nos cenários produzidos que as variações de uso da terra podem diminuir a produção de sedimentos na microbacia, sobretudo pela atenuação dos processos erosivos promovida pela vegetação alocada sobre os solos.

Catelani, Batista e Pereira (2003) geraram um mapa de uso atual da terra com a delimitação das áreas de proteção permanente (APP's), através de classificação em imagens atuais do satélite Landsat TM feita utilizando o SIG SPRING. A classificação utilizou o método da máxima verossimilhança utilizando as classes Floresta, Pastagem, Essências Exóticas e Urbanas. Com base no mapa os autores puderam identificar as áreas de não cumprimento da legislação quanto à manutenção da faixa de APP. Do total das áreas que deveriam ser APP's apenas

51% estão efetivamente cobertas com vegetação nativa o restante está coberto com as outras tipologias de uso adotadas na classificação, incorrendo em uso indevido.

Do exposto neste capítulo torna-se evidente a relação entre os componentes climáticos, físicos e antrópicos na definição do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e a importância que cada um provê neste processo, apesar de atuarem conjuntamente e produzirem efeitos sinérgicos de acordo com a intensidade com que se apresentam nas bacias hidrográficas.

#### 4.4 VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DE INTERESSE EM REGIONALIZAÇÃO

Independentemente do método de regionalização aplicado a uma dada bacia, são inúmeras as variáveis hidrológicas passíveis de serem regionalizadas, sendo definidas frequentemente em termos de tempo de recorrência ou permanência, porém algumas em especial têm sido mais exploradas, dado o maior volume de trabalhos presentes na literatura.

Disto advém a necessidade de elencar as mais utilizadas nos estudos de regionalização hidrológica.

As variáveis hidrológicas são consideradas variáveis aleatórias e, portanto, sujeita à análise pela teoria de probabilidades e estatística matemática (FERNANDES, 2005).

Quanto à variável hidrológica vazão, especificamente, esta pode ser estudada em termos de sua probabilidade de ocorrência e de períodos de retorno devido à sua variação natural ao longo do tempo, sendo distinguida em vazões ditas máximas, médias e mínimas (OLIVEIRA, 2008).

Em regionalização as principais variáveis hidrológicas estudadas correspondem à máxima, média, mínima; incluindo-se aquelas derivadas de curvas de permanência.

As vazões mínimas em geral são bastante utilizadas como vazões de referência para outorga, caracterizadas pela sua duração e frequência, sendo estas calculadas considerando todo o período de observação registrado nas séries. Do total estimado de disponibilidade hídrica, somente certo percentual dessas vazões deve ser autorizado para o consumo (RODRIGUEZ, 2008).

O instrumento de outorga, estabelecido pela Lei Federal 9433/1997, concede por um período preestabelecido o direito de uso de determinada quantidade de água condicionada à sua disponibilidade, de tal forma que assegure ao órgão gestor de recursos hídricos o controle quantitativo e qualitativo do seu uso, ao mesmo tempo em que garante ao usuário o direito de uso da água de forma pessoal e intransferível (MOREIRA, 2006).

Lemos (2006) ressalta que a outorga não dá ao usuário a propriedade da água ou a sua alienação, mas o simples direito de uso, portanto, pode ser suspensa parcial ou totalmente, em casos extremos de escassez ou de não cumprimento pelo outorgado dos termos de outorga previstos nas regulamentações, ou por necessidade premente de se atenderem aos usos prioritários e de interesse coletivo.

Na maioria dos estados brasileiros as vazões mínimas de referência para concessão de outorga compreendem a  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$  (OLIVEIRA, 2008).

Novaes (2005) define a  $Q_{7,10}$  como a vazão mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos

A  $Q_{7,10}$  é obtida computando-se as médias móveis das vazões médias diárias com janelas de 7 dias ao longo de um ano. A mínima dessas médias móveis é retida. O processo é repetido para cada ano da série histórica, obtendo-se uma série de valores mínimos de vazões média de 7 dias consecutivos. Essas vazões são ordenadas em ordem crescente de magnitude, onde são estimadas suas funções de distribuição (sendo essa função empírica ou um modelo estatístico que melhor se ajuste aos dados de vazão mínima) e períodos de retorno. Desta função de distribuição pode-se estimar a vazão mínima de 7 dias de duração com período de retorno de 10 anos (PAULO, 2007).

Os parâmetros  $Q_{95}$  e  $Q_{90}$ , por sua vez, representam vazões associadas à permanência de 95% e 90% no tempo, obtidas da respectiva curva de permanência. Analogamente à  $Q_{7,10}$ , são vazões mínimas que tem despertado especial interesse nos procedimentos de outorga, tendo sido adotada em vários estados do Brasil.

A curva de permanência constitui o complemento da função de distribuição de vazões diárias, mensais, anuais, ou de qualquer outro intervalo de tempo, que representa de modo gráfico, a relação entre magnitude e frequência com que essas vazões são igualadas ou superadas em um dado intervalo de tempo. Ela fornece uma simples, porém concisa, visão gráfica do comportamento hidrológico de uma bacia, quanto à variabilidade das vazões ao longo do tempo (PINTO, 2006).

De acordo com Barbosa et al. (2005) o conhecimento das vazões mínimas, que são caracterizadas pela duração e frequência (ou períodos de retorno) é fundamental na avaliação da disponibilidade hídrica natural dos cursos d'água, bem como para projetos de aproveitamento hidrelétrico, para estudos da capacidade natural de autodepuração de corpos hídricos e para a decisão quanto à concessão de outorga para um dado uso específico.

Ainda segundo o mesmo autor, as vazões máximas, por sua vez, estão particularmente associadas aos riscos de inundação em uma bacia e à definição das vazões de projetos de obras hidráulicas de controle de enchentes. Em contrapartida as vazões médias representam indicativos do potencial energético das bacias hidrográficas e representam a maior vazão passível de ser regularizada.

#### 4.5 VARIÁVEIS FÍSICAS DE INTERESSE EM REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

Em virtude das características físicas das bacias hidrográficas possuem importante papel nos processos do ciclo hidrológico, influenciando dentre outros, a infiltração, a quantidade de água produzida como deflúvio, a evapotranspiração e os escoamentos superficial e sub-superficial (TONELLO et al., 2006), estas passaram a receber especial atenção nos estudos hidrológicos.

A investigação e estudo dos componentes físicos do ambiente residem no campo do conhecimento chamado de Geomorfologia, que é definida por Christofoletti (1980) como a ciência que estuda as diferentes formas do relevo.

Os estudos geomorfológicos se destacam, por revelar em suas diferentes abordagens sínteses do espaço natural e de suas respectivas dinâmicas de ocupação e transformação antrópica (LOBÃO; VALE, 2007).

Os agentes geomorfológicos são todos os elementos naturais móveis capazes de desprender, transportar e depositar os produtos do intemperismo e da sedimentação. Tais agentes são os responsáveis diretos da maioria dos processos geomorfológicos exógenos que afetam a superfície terrestre (MORA, 2008), estando incluído entre estes a água.

Por outro lado, segundo o mesmo autor, as formas do relevo podem influenciar substancialmente o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, uma vez que o relevo de uma bacia tem grande influência sobre os fatores

meteorológicos e hidrológicos, pois a velocidade do escoamento superficial, e conseqüentemente o tempo de concentração, são determinados pela declividade do terreno.

Em decorrência desta relativa influência que os atributos geomorfológicos das bacias hidrográficas têm sobre o comportamento hidrológico das mesmas, têm se desenvolvido estudos de determinados parâmetros relacionados às formas e métricas das bacias e seus componentes, sendo alguns destes parâmetros utilizados como variáveis explicativas do regime de vazões em trabalhos de regionalização hidrológica.

Estes parâmetros são obtidos normalmente pelo estudo morfométrico de bacias, que é definido como a análise quantitativa das relações entre a fisiografia e sua dinâmica hidrológica (COELHO, 2007).

Teodoro et al. (2007) afirmam que a caracterização morfométrica de uma bacia hidrográfica é um dos primeiros e mais comuns procedimentos executados em análises hidrológicas ou ambientais, e tem como objetivo elucidar as várias questões relacionadas com o entendimento da dinâmica ambiental local e regional.

Variados parâmetros e índices são utilizados em análises morfométricas de acordo com a finalidade dos estudos e do ferramental utilizado. Abaixo segue a descrição dos mais frequentes, definidos por Christifoletti (1980); Silva, Schulz e Camargo (2004), Teodoro et al. (2007), Tonello et al. (2006) e Tucci (2004):

- Área: é toda área drenada pelo sistema fluvial incluída entre os limites da bacia, projetada em plano horizontal, constituindo-se em elemento básico para a determinação de diversos índices morfométricos. É normalmente expressa em Km<sup>2</sup>.
- Perímetro: comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas. Normalmente expressa em Km.
- Fator de forma: relaciona a forma da bacia com a de um retângulo. Correspondendo a razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo do espigão).

$$F = \frac{A}{L^2}$$

*Equação nº 01*

Sendo:

*F = fator de forma;*

*A = área de drenagem;*

*L = comprimento do eixo da bacia.*

- Amplitude altimétrica: é caracterizada pela altitude máxima e mínima existente na bacia e pela faixa de altitude predominante.
- Índices de declividade: podem ser determinados para os cursos d'água e vertentes. Frequentemente utiliza-se como unidade graus ou percentual.
- Densidade de drenagem: é a relação entre o comprimento total da rede de drenagem e a área da bacia hidrográfica.

$$Dd = \frac{Lt}{At}$$

*Equação nº 02*

*Dd = densidade de drenagem;*

*Lt = comprimento total da drenagem;*

*At = área total da bacia.*

- Ordenamento dos canais: corresponde a um sistema de hierarquização de canais, sendo predominantemente utilizado o critério de Strahler.

De acordo com Coelho (2007) a classificação baseada na proposta de Strahler permite melhor analisar a morfometria das bacias hidrográficas, a exemplo da seleção das sub-bacias mais representativas do ponto de vista físico (vazão, número de canais), como também auxiliar no gerenciamento físico-econômico destas.

Dentre as características físicas das bacias, as mais comumente utilizadas em estudos de regionalização hidrológica são a área de drenagem, comprimento do rio principal, densidade de drenagem e declividade (OLIVEIRA, 2008; RODRIGUES, 2008;).

A área da bacia hidrográfica possui relação direta sobre a quantidade de água produzida como deflúvio (TONELLO et al., 2006).

A densidade de drenagem é o índice que indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, ou seja, fornece indicação da eficiência da drenagem da bacia (LEMOS, 2006).

A declividade influencia a relação entre a precipitação e o deflúvio da bacia hidrográfica, sobretudo em função do aumento da velocidade de escoamento

superficial, reduzindo a possibilidade de infiltração de água no solo (CARDOSO et al., 2006a).

A altitude média influencia a quantidade de radiação recebida pela bacia e, conseqüentemente, influencia a evapotranspiração, temperatura e precipitação. Quanto maior a altitude, menor a quantidade de energia solar recebida e, portanto, menos energia estará disponível para esse fenômeno (TONELLO et al., 2006).

A obtenção de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas quando realizada por métodos analógicos, ou mesmo computacionais com interação do usuário, demandam um trabalho árduo. Entretanto, com o advento dos SIG's (Sistema de Informação Geográfica) a extração das informações sobre os elementos envolvidos na estrutura das bacias tem sido feita de forma mais ágil e eficiente (HOTT; FURTADO; RIBEIRO, 2007).

Um SIG é uma ferramenta computacional (software) criada para armazenamento e manipulação de dados e informações espacialmente distribuídas em um computador (FERRAZ; MILDE; MORTATTI, 1999). Ele permite descrever a complexidade dos processos ambientais em diversos níveis de relação, simplificação, generalização e abstração. Desta forma, essa ferramenta permite integrar os diferentes elementos formadores da paisagem que contribuem para a modelagem do relevo como geologia, pedologia e clima (BORGES et al., 2007), além da hidrologia.

As operações de análise e integração de informações temáticas podem ser conduzidas através de uma lógica de sobreposição de dados, definidas por regras empíricas de cruzamento ou, através do suporte da formulação de modelos matemáticos e estatísticos (PINTO; GARCIA, 2005).

Analogamente ao desenvolvimento dos SIG's, desenvolveram-se e têm sido bastante explorados em análises morfométricas os MDE's (Modelos Digitais de Elevação).

Um MDE constitui qualquer representação digital de uma variável contínua do relevo no espaço. Nestes têm sido implementados diversos algoritmos utilizados em módulos específicos de sistemas de informações geográficas que permitem a obtenção automática das características físicas das bacias hidrográficas (LEMOS, 2006).

O uso de SIG's e de MDE's em aplicações voltadas à hidrologia se intensificou, sobretudo, a partir da década de 80 (FERREIRA; MORETI, 1998)

A partir de um MDE pode-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais, gerar imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais. Uma aplicação específica relativa a declividades consiste na possibilidade de reclassificar um MDE gerando uma imagem de diferentes classes de declividade, de acordo com a conveniência do estudo a ser realizado (FERRAZ; MILDE; MORTATTI, 1999).

Dado que fatores físicos interagem substancialmente com fatores climáticos e desta sinergia têm efeito grande parte dos fenômenos hidrológicos em bacias hidrográficas torna-se relevante abordar complementarmente as variáveis climáticas que têm sido mais amplamente estudadas em esforços de regionalização hidrológica.

#### 4.6 VARIÁVEIS CLIMÁTICAS DE INTERESSE EM REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

As variáveis hidrológicas mais importantes são a precipitação e a vazão, sendo que a precipitação é a fonte de água na bacia da qual se originam as vazões (EUCLYDES, 2005).

Em hidrologia, precipitação é entendida como a água da atmosfera que atinge a superfície na forma de chuva, granizo, neve, orvalho neblina ou geada, porém, na realidade brasileira a chuva é a forma predominante de precipitação (COLLISCHON; TASSI, 2008).

O estudo do regime de precipitação é de extrema importância para o planejamento regional. O comportamento pluviométrico determina a forma de ocupação e os tipos de atividades econômicas do homem sobre o espaço. Sob o prisma ambiental, a precipitação modifica a umidade relativa do ar, a temperatura do ar e do solo e o balanço hídrico (SILVA; TRINCA; NERY, 2009).

Estudar os recursos hídricos de uma dada bacia hidrográfica requer o conhecimento das características da bacia. Muitas das vezes essas informações não existem e quando existem não são regionais e sim pontuais (FECHINE; GALVÍNIO, 2008a).

Em função da regionalização hidrológica se propõe a estabelecer relações espaciais entre o regime de vazões e suas variáveis explicativas físicas e climáticas

torna-se necessário promover a extrapolação e espacialização dos dados pontuais obtidos nos postos pluviométricos para áreas de bacias hidrográficas. Neste sentido técnicas estatísticas e matemáticas como construção de isoietas e aplicação de polígonos de Thiessen tem merecido especial atenção. Este último método será abordado nos capítulos sobre os procedimentos metodológicos.

Pruski et al (2004) analisaram as variações espaciais da precipitação média mensal e da vazão específica média de longa duração, na bacia do rio São Francisco, utilizando dados consistidos de 178 estações pluviométricas e 77 fluviométricas. Para a análise da precipitação os autores utilizaram o método dos Polígonos de Thiessen para o cálculo das médias, sendo os totais precipitados definidos pela média ponderada dos totais precipitados em cada estação pela sua respectiva área de influência. Dentre os resultados obtidos observou-se que em geral as precipitações diminuem no sentido da nascente para a foz da bacia.

Gomig, Lindner e Kobiyama (2007) obtiveram as respectivas áreas de influência para toda a bacia e para as sub-bacias delimitadas pelas 34 estações pluviométricas com maior série de dados históricos na bacia do rio Peixe, SC. Para tanto optaram pelo uso do método dos polígonos de Thiessen. Os autores concluíram que a aplicação do método por intermédio de SIG deu celeridade e precisão aos resultados.

Em estudos de regionalização hidrológica para as estimativas das vazões máximas as precipitações de uso mais frequente são: máxima diária anual, semestre mais chuvoso, trimestre mais chuvoso e mês mais chuvoso. Nas estimativas de vazões médias de longa duração as precipitações de uso mais frequente são as precipitações médias anuais; enquanto para a estimativa de vazões mínimas as precipitações mais utilizadas são: total anual, semestre mais seco e trimestre mais seco (LEMOS, 2006; NOVAES, 2005; OLIVEIRA, 2008; RODRIGUEZ, 2008).

Entretanto, muitas vezes pelas estações pluviométricas não possuem densidade e distribuição geográfica ideal e sim séries relativamente curtas de dados, é recomendável identificar regiões similares de precipitação (LYRA et al., 2006).

#### 4.7 MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO DA TERRA

Os principais métodos e algoritmos utilizados nos procedimentos de classificação supervisionada e não-supervisionada do uso da terra são descritos por Sulsoft (2010), como descrito abaixo:

##### a) Métodos de classificação não-supervisionada

- Método Isodata: é, provavelmente, o mais conhecido e é descrito como um meio de interpretação de imagens de sensoriamento remoto assistida por computador. O programa de classificação identifica padrões nos níveis de cinza. Esses padrões são classificados efetuando-se visitas de reconhecimento a alguns poucos exemplos recolhidos para determinar sua interpretação. Em razão da técnica usada neste processo, os padrões são geralmente referidos como “clusters”. Neste tipo de classificação, as classes são determinadas pelas classes de agrupamento.

- Método K-Means: calcula inicialmente as classes distribuindo em uma classe uniforme no espaço e então aglomera classes por classe em um processo iterativo usando a técnica de distância mínima. Melhor será a classificação quanto melhor for agrupada a nuvem de pixels.

##### b) Métodos de classificação supervisionada

- Método do Paralelepípedo: considera uma área no espaço de atributos ao redor do conjunto de treinamento. Essa área tem a forma de um retângulo, definido os níveis de cinza máximo e mínimo do conjunto de treinamento. Os lados desse retângulo, que inclui uma classe própria, chamam-se os “limites de decisão” dessa classe. Os *pixels* que excedem o limite de decisão, como os *pixels* nas áreas de inseparabilidade, apresentam problema na sua distribuição em uma classe. A correlação normalmente existente entre bandas vai causar uma distribuição ao longo da reta 45° no espaço de atributos e os limites de decisão vão sempre abranger alguns *pixels* não pertencentes à classe.

- Método da Distância Mínima: caso o tamanho dos conjuntos de treinamento seja pequeno, recomenda-se em geral um método de classificação mais simples, como o algoritmo da distância mínima. Este algoritmo não usa uma matriz de covariância, por isso acaba não sendo tão flexível. Os modelos de classe são caracterizados pela

simetria espectral. As classes podem ser definidas com base em dados estatísticos, calculando-se à média de cada classe, em cada banda espectral. O método da distância mínima atribui cada *pixel* desconhecido à classe cuja média seja mais próxima a ele.

- Método da Máxima Verossimilhança (Maxver): é a classificação mais aplicada no tratamento de dados adquiridos por satélites. Este método é baseado no princípio de que a classificação errada de um *pixel* não tem mais significado de que a classificação errada de qualquer outro *pixel* na imagem. O usuário determina a significância nos erros de atributos especificados para uma classe em comparação a outras. A eficiência do Maxver depende, principalmente, de uma precisão razoável da estimativa do vetor médio ( $m$ ) e da matriz de covariância ( $S$ ) de toda classe espectral. Isso, por sua vez, depende da quantidade de *pixels* incluídos nas amostras de treinamento.
- Método do Mapeador do Ângulo Espectral (SAM): é um método de classificação que usa o ângulo entre as amostras de treinamento no espaço de  $n$ -dimensões para determinar os *pixels* para uma determinada classe. O algoritmo determina a similaridade espectral entre dois espectros e calcula o ângulo entre eles. Os ângulos são tratados como vetores no espaço  $n$ -dimensional. Esta técnica possui a grande vantagem dos espectros (Endmembers) não serem muito sensíveis aos efeitos da iluminação e do albedo. A aplicação do SAM considera dados reduzidos à reflectância aparente (reflectância original multiplicada por alguns fatores de ganhos não conhecidos, que dependem da topografia e da sombra). O SAM só usa a direção dos vetores, e não o seu módulo, o que significa que todas as iluminações possíveis são tratadas da mesma maneira. A cor de um material é definida pelo seu vetor próprio.
- Método da classificação por distância de Mahalanobis: semelhante ao da distância mínima e usa estatísticas para cada classe, porém, ele supõe que a covariância das amostras são iguais, portanto, é um classificador ainda mais rápido que o método da distância mínima.

## 4.8 MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Os métodos estatísticos são fundamentais e possuem inúmeras aplicações nos diversos segmentos científicos, apoiando e fornecendo elementos concretos ao tratamento de dados e interpretação de resultados de pesquisas científicas.

De forma a validar os resultados e ratificar as hipóteses levantadas nesta pesquisa foram necessárias aplicações de técnicas estatísticas, tornando necessária uma breve apresentação dos métodos aplicados, a fim de justificar a escolha destes para o alcance dos objetivos do trabalho.

### 4.8.1 Análise de variância

Segundo Ayres et al. (2003) a análise de variância compara a magnitude de variação de mais de duas amostras, decompondo a variância total em duas partes:

- a) entre amostras, constituindo o chamado quadrado médio dos tratamentos;
- b) dentre cada tratamento, compondo o chamado quadrado médio do erro experimental.

O teste de análise de variância é a razão entre esses quadrados médios. Tal análise compreende dois grupos:

1. Testes paramétricos:
  - i. ANOVA: um critério;
  - ii. ANOVA: dois critérios;
  - iii. ANOVA: fatorial (a x b) com replicação;
  - iv. ANOVA: fatorial (a x b x c) sem replicação.
2. Testes não-paramétricos
  - i. Teste de *Friedman*;
  - ii. Teste de *Kruskal-Wallis*;
  - iii. Teste Q de *Cochran*.

A expressão ANOVA deriva do termo inglês *Analysis of Variance* chamando-se *F-teste*. Tal método destina-se a comparar mais de duas amostras cujos dados devem ser mensurados em escala intervalar ou de razões (AYRES et al., 2003).

As equações matemáticas, que definem a ANOVA: *um critério* são as seguintes:

$$\bar{X}_i = \sum X_i / r \quad \text{Equação nº 03}$$

$$SQ = \sum_{ij} X_{ij}^2 - \frac{X^2}{rt} \quad \text{Equação nº 04}$$

$$SQ_{tratamentos} = \frac{\sum_i X_i^2}{r} - \frac{X^2}{rt} \quad \text{Equação nº 05}$$

$$SQ_{erro} = SQ_{total} - SQ_{tratamentos} \quad \text{Equação nº 06}$$

$$gl_{tratamentos} = t - 1 \quad \text{Equação nº 07}$$

$$gl_{erro} = t(r - 1) \quad \text{Equação nº 08}$$

$$QM_{tratamentos} = SQ_{tratamentos} / gl_{tratamentos} \quad \text{Equação nº 09}$$

$$QM_{erro} = SQ_{erro} / gl_{erro}; \quad \text{Equação nº 10}$$

$$F_{tratamentos} = \frac{QM_{tratamentos}}{QM_{erro}} \quad \text{Equação nº 11}$$

Onde:  $X_{ij}$  = observações individuais;  $j$  = relativo a repetições (1,2,3...j...r);  $i$  = tratamentos;  $X_i$  = totais dos tratamentos;  $rt$  = N de unidades experimentais;  $SQ$  = soma dos quadrados;  $X$  = total geral;  $QM$  = quadrados médios (variâncias).

A ANOVA atribui fator de pesos aos totais pontuais observados em cada posto pluviométrico proporcionais à sua área de influência. Estas por sua vez são determinadas em mapas da bacia contendo as estações, unindo os pontos adjacentes por linhas retas e, posteriormente, traçando-se as mediatrizes destas últimas, formando polígonos. Os lados dos polígonos compreendem então a área de influência de cada estação (EUCLYDES, 2005).

#### 4.8.2 Polígonos de Thiessen e precipitações médias

O método dos Polígonos de Thiessen é utilizado no cálculo de precipitações médias sobre áreas espacialmente distribuídas. Em síntese, o método realiza uma extrapolação estatística das chuvas registradas pontualmente nos postos pluviométricos para áreas de influência dos respectivos postos.

De acordo com Pruski et al. (2004) as precipitações médias são então as médias ponderadas entre a precipitação ( $P_i$ ) de cada estação e o peso a ela atribuído ( $A_i$ ), que é a área de influência de  $P_i$ , isto é:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

Equação nº 12

Onde:  $P_m$ -precipitação média na bacia considerada, mm;  $P_i$ -precipitação em cada estação, mm;  $A_i$ -área de influência de  $P_i$ ,  $\text{Km}^2$ ;  $n$ -número de estações pluviométricas consideradas.

#### 4.8.3 Modelos de distribuição de probabilidades e regionalização hidrológica

As distribuições de freqüência, normalmente usadas em regionalização hidrológica, são utilizadas para estimar a magnitude de eventos. Basicamente, existem duas fontes de erro ao utilizá-las. A primeira fonte de erro é que não se pode saber *a priori* qual das distribuições disponíveis é a "verdadeira" distribuição, ou qual delas os eventos seguem (EUCLYDES, 2005).

Ainda de acordo com EUCLYDES (2005), testes de aderência podem ser utilizados para escolher a distribuição que melhor descreve o comportamento dos eventos, mas isto não soluciona definitivamente o problema. Uma vez escolhida a função, a segunda fonte de erro torna-se evidente. Os parâmetros da distribuição de probabilidade devem ser estimados a partir do conjunto de dados amostrais. Uma vez que a amostra de dados é sujeita a erros, os métodos de estimativa dos parâmetros devem minimizar estes erros e ser o mais eficiente possível.

Para a maioria das distribuições de freqüência utilizadas em hidrologia, a estimativa da magnitude de um evento, com determinado período de retorno, pode ser colocada sob a forma da equação padrão de freqüência devida a Vem Te Chow (KITE, 1978 *apud* EUCLYDES, 2005):

$$XT = m + Ks$$

Equação nº 13

Em que  $XT$  – valor do evento com o período de retorno  $T$ ;  $m$  – média dos eventos amostrados;  $s$  – desvio padrão dos eventos amostrados;  $K$  – fator de freqüência, depende da probabilidade e da assimetria.

Os valores do chamado “fator de freqüência” ( $K$ ) para as distribuições estudadas são as apresentadas a seguir:

- Distribuição Normal :  $K=t$

Equação nº 14

$$\text{Sendo, } t = a - \frac{c_0 + c_1 \cdot a + c_2 \cdot a^2}{1 + d_1 \cdot a + d_2 \cdot a^2 + d_3 \cdot a^3}$$

Equação nº 15

$$a = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{p^2}\right)}$$

Equação nº 16

$$e, \quad c_0 = 2,515517; \quad c_1 = 0,802853; \quad c_2 = 0,010328; \quad d_1 = 1,432788; \quad d_2 = 0,189269; \\ d_3 = 0,001308$$

Em que:  $t$  = desvio normal padronizado;  $p$  = probabilidade do evento ser menor ou igual a  $X$ .

$$\text{▪ Distribuição de Gumbel: } K = -0,45 + 0,7797 \cdot \ln\left[-\ln\left(-1/T\right)\right]$$

Equação nº 17

Onde:  $T$  - período de retorno, anos.

$$\text{▪ Distribuição Log-normal II: } K = e^{\left(\ln\left(\mu - \sigma^2/2\right) - 1/\left(\sigma^2 - 1\right)\right) \cdot T^2}$$

Equação nº 18

$$\text{Onde: } \sigma_y = \sqrt{\ln\left(\mu^2 + 1\right)}$$

Equação nº 19

$$\mu_y = \ln\left(\mu - \sigma^2/2\right)$$

Equação nº 20

$$\text{Sendo: } Z = \sigma / \mu$$

Equação nº 21

e  $\mu$  - média da amostragem do evento  $x$ ;  $\sigma$  - desvio padrão da amostragem do evento  $x$

$$\text{▪ Distribuição Log-normal III: } K = e^{\left(\ln\left(\mu + Z_2^2\right) - 1/\left(\ln\left(\mu + Z_2^2\right)/2\right) - 1\right) \cdot Z_2}$$

Equação nº 22

$$\text{Onde: } Z_2 = 1 - \omega^{2/3} / \omega^{1/3}$$

Equação nº 23

$$\omega = -y_1 + \left(y_1^2 + 4\right) / 2$$

Equação nº 24

$$y_1 = N / \left(N - 1\right) \cdot \left(N - 2\right) \cdot \sum_{i=1}^N \left(x_i - \mu\right) / \sigma^3$$

Equação nº 25

em que,  $y_1$  - coeficiente de assimetria

▪ Distribuição Pearson III:

$$K = t + \left(t^2 - 1\right) \cdot y_1 / 6 + 1/3 \cdot \left(t^3 - 6t\right) \cdot y_1 / 6 - \left(t^2 - 1\right) \cdot y_1 / 6 + t \cdot y_1 / 6 + 1/3 \cdot y_1 / 6$$

Equação nº 26

▪ Distribuição Log-Pearson III: aplica-se a distribuição Person III aos logaritmos dos eventos amostrados.

▪ Distribuição de Weibull:  $K = A_\alpha + B_\alpha \left[ \ln \left( -1/T \right)^\alpha - 1 \right]$  Equação nº 27

Onde:  $\alpha = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5x^4$  Equação nº 28

Em que:  $a_1 = 0,2777757913$ ;  $a_3 = 0,3132617714$  ;  $a_4 = -0,0013038566$ ;

$a_5 = -0,0081523408$

E:  $A_\alpha = \Gamma(+1/\alpha) B_\alpha$  Equação nº 29

$B_\alpha = \Gamma(+2/\alpha) \Gamma^2(+1/\alpha)^{-1/2}$  Equação nº 30

Em que:  $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$  Equação nº 31

Euclides (2005) destaca que para se testar a adequação dos modelos de probabilidades às vazões regionais é necessário verificar a boa ou má aderência dos dados ao modelo. Os autores ainda destacam que a aderência pode ser verificada através do teste do qui-quadrado, o método de Kolmogorov-Smirnov e ainda graficamente.

O teste de Kolgoromov-Smirnov pressupõe que se duas subamostras são de uma mesma população, então a distribuição de probabilidades das duas subamostras deve estar muito próxima. Por outro lado, se duas distribuições acumuladas são “muito discrepantes” em determinado ponto, então as subamostras podem ser de populações diferentes. Assim, um grande desvio é uma sugestão para rejeitar-se a hipótese  $H_0$  (de serem da mesma população) (EUCLYDES, 2005).

De acordo com Euclides (2005) o teste de Kolgoromov-Smirnov é baseado nos desvios da função de distribuição da amostra de eventos  $P(x)$  em relação a uma função de distribuição contínua escolhida  $P_o(x)$ , assim:

$$D_n = \max |P(x) - P_o(x)| \quad \text{Equação nº 32}$$

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos adotados ocorreram em duas etapas distintas: regionalização hidrológica e avaliação da dinâmica no uso da terra na bacia do rio Itacaiunas (figura 06).

A regionalização hidrológica consistiu basicamente de duas outras subetapas sequenciais, a saber: análise morfométrica e análise hidrológica. Para a análise morfométrica da bacia, inicialmente, as bases georreferenciadas vetoriais (SEMA/PA), juntamente com o Modelo Digital de Terreno (MDE) SRTM da bacia, foram utilizadas em operações de geoprocessamento tendo sido obtido ao final alguns parâmetros morfométricos que caracterizam a bacia estudada, bem como revelam as principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas.

Em função das limitações de volume de dados e estações de monitoramento disponíveis na bacia assumiu-se a premissa de que toda ela tratava-se de uma região homogênea hidrológica sendo necessário então um esforço de regionalização das sub-bacias mais representativas (devidamente identificadas na análise morfométrica) com base em parâmetros físicos (regionalização física dos parâmetros declividade e altitude) e climáticos (regionalização climática do parâmetro precipitação média total anual) para garantir a confiabilidade e validade dos resultados relativos aos parâmetros estatísticos de hidrologia, compondo o que se denominou de análise hidrológica.

Ao fim da etapa de regionalização das sub-bacias, realizou-se o ajuste dos dados hidrológicos da bacia a diferentes modelos de distribuição teórica de probabilidades a fim de se evidenciar quais seriam os mais adequados ao comportamento hidrológico regional, observando-se o efeito da sazonalidade (período seco e chuvoso), e definir variáveis hidrológicas regionais de interesse para a gestão hídrica e territorial da unidade fisiográfica.

Posteriormente, as vazões de referência regionais foram confrontadas com as informações dos usuários de recursos hídricos outorgados na bacia (captação de água superficial de diferentes mananciais), obtidas por meio de consulta à base de dados da SEMA/PA, elucidando assim a disponibilidade hídrica remanescente para outorga de direito de uso de recursos hídricos na bacia através da aplicação de balanço hídrico simplificado.

A etapa de avaliação da dinâmica no uso da terra na bacia do rio Itacaiunas foi realizada por meio da identificação das mudanças na paisagem ocorridas na bacia e principais sub-bacias, por meio de classificação supervisionada de imagens de satélite da região estudada obtidas por imageamento remoto, com suporte da ferramenta SIG (Sistema de Informações Geográficas), respeitando-se o mesmo horizonte de tempo de estudo adotado na fase de regionalização hidrológica na escolha das cenas a serem processadas.

Em anexo seguem os procedimentos relativos às rotinas executadas descritos detalhadamente, com as ferramentas operacionais dos programas usados apresentadas com grafia em *itálico* (ANEXO A a O).

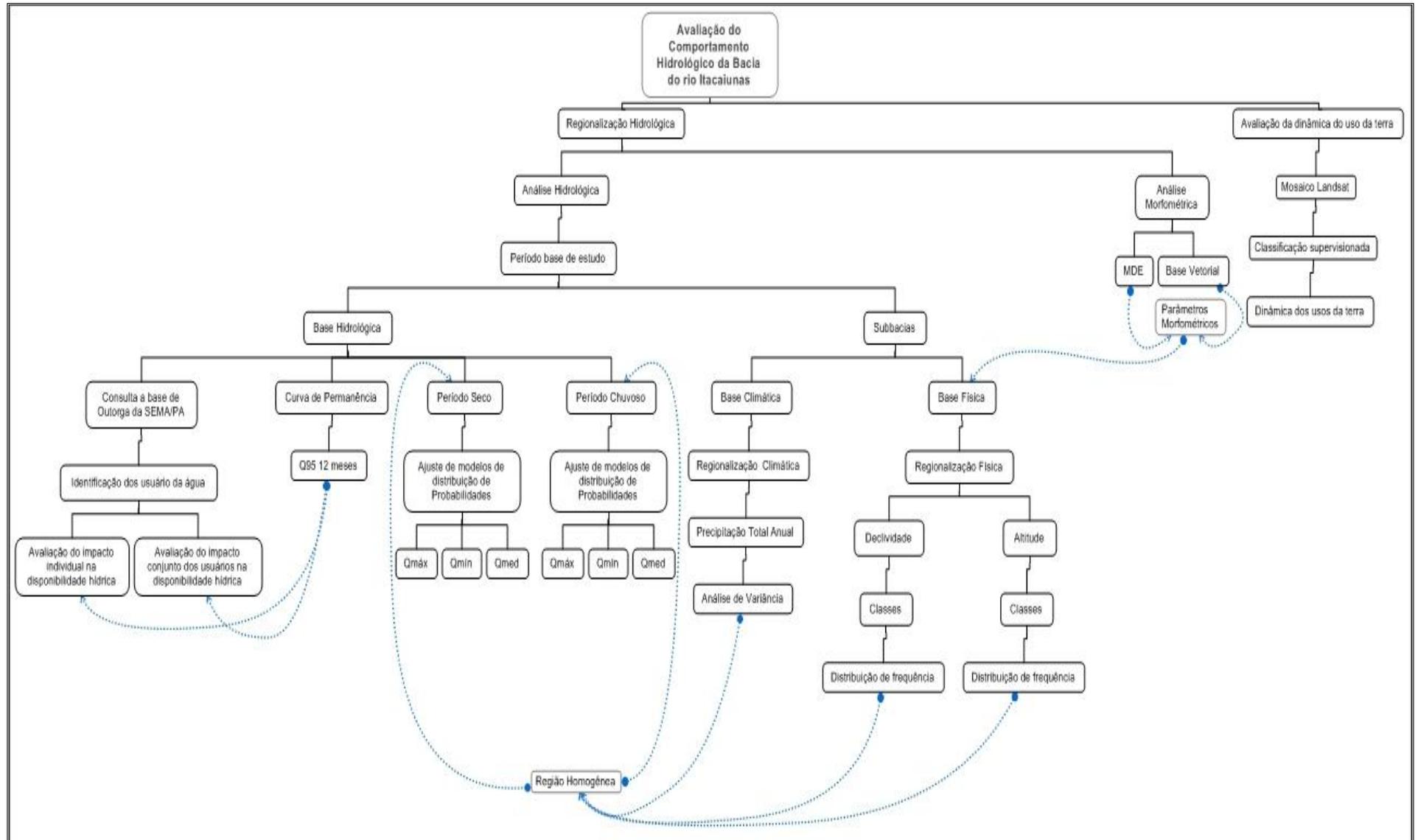


Figura 06: Fluxograma metodológico

## 5.1 REGIONALIZAÇÃO HIDROLÓGICA

### 5.1.1 Análise morfométrica

Para a análise morfométrica foi utilizada a base vetorial de drenagem nas feições linha e polígono em escala 1:250.000 disponibilizada pela SEMA/PA, através do Sistema Estadual de Informações de Recursos Hídricos; a base vetorial poligonal de ottobacias (ANA, 2009b) e a base MDE (Modelo Digital de Elevação) SRTM (EMBRAPA, 2009).

Nesta etapa todos os procedimentos e análises espaciais foram realizados com o suporte da ferramenta SIG através da utilização do aplicativo ArcGIS 9.2 em sistema de orientação geográfica UTM SAD 69 Zona 22 Sul, por convenção. Assim como se elencou como aproximação padrão, para todos os parâmetros analisados, apenas duas casas decimais.

#### 5.1.1.1 Definição da bacia de drenagem

A definição da bacia principal foi realizada com base na seleção das ottobacias trecho por trecho relativas a toda a malha hidrográfica associada ao rio Itacaiunas (Rio principal e afluentes) e posterior eliminação dos limites entre estas com uso da ferramenta *Dissolve*, do Arc toolbox. Barbosa et al. (2007) definem ottobacias como as áreas de contribuição de cada trecho de curso d'água, segundo os critérios de tratamento topológico da rede hidrográfica e codificação de Otto Pfafstetter (figura 07).

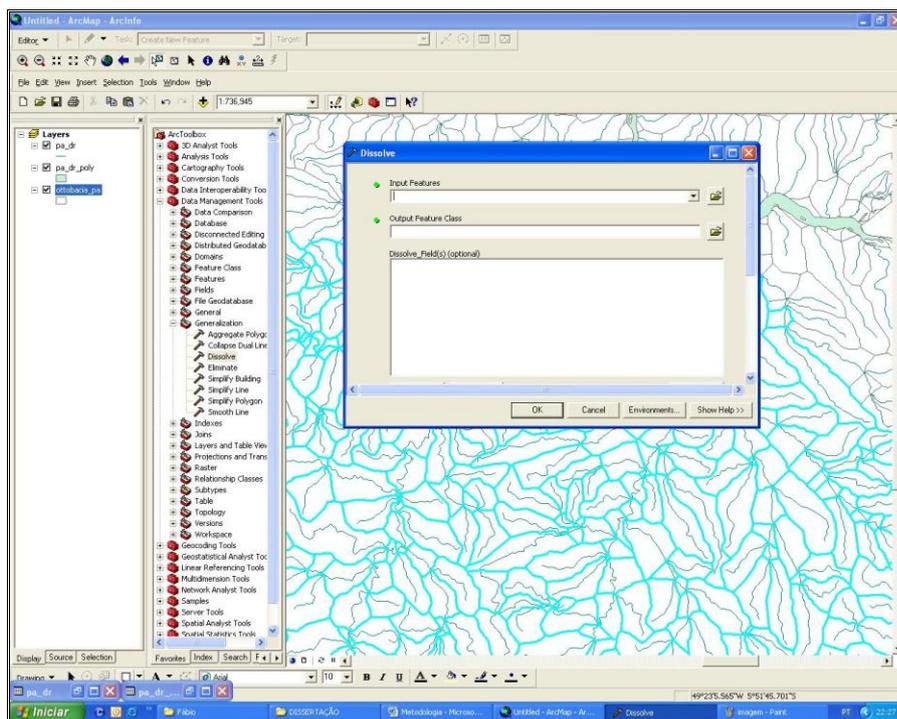


Figura 07: Geração da bacia do rio Itacaiunas

#### 5.1.1.2 Extração da rede hidrográfica

A partir da bacia gerada pôde-se evidenciar por análise visual toda a rede de drenagem associada a ela e extraí-la a partir do uso da ferramenta *Clip* (Arctoolbox) sobre os arquivos shapefile das tipologias linha e polígono, representativos da malha hidrográfica do Estado (figura 08).

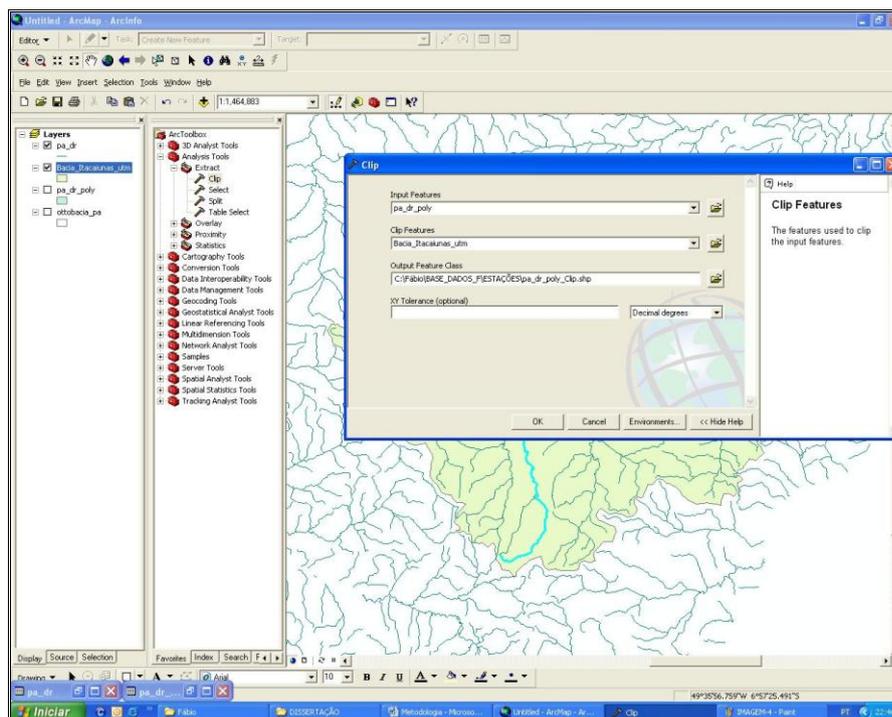


Figura 08: Extração da malha hidrográfica da bacia do rio Itacaiunas no ArcGIS 9.2

### 5.1.1.3 Extração do modelo digital de elevação (MDE) da bacia

Os parâmetros físicos relacionados à morfologia da bacia estudada foram obtidos a partir de procedimentos de geoprocessamento no ArcGIS 9.2, utilizando o modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), produzido originalmente através de imageamento por radar SAR (Radar de Abertura Sintética) de cerca de 80% da superfície da terra no ano de 2000, pelo ônibus espacial Endeavour (SANTOS, 2006).

O MDE produzido pela missão SRTM frequentemente possui falhas que se materializam na ocorrência de depressões espúrias, que por sua vez produzem dados de altitudes negativos ou simplesmente inexistentes, de forma que se faz necessário a correção destes erros para a utilização do modelo.

A Embrapa Monitoramento por Satélite através de seu programa Brasil em Relevo (EMBRAPA, 2009) disponibiliza cenas da missão SRTM para todo o território Nacional, já consistidas, com ausência de pixels *no data* e valores negativos de cota, em formato TIF de 16 bits, que podem perfeitamente serem utilizadas para várias finalidades, sem necessidade de pós-processamento do modelo.

Devido à grande extensão da bacia sua área de drenagem acaba não sendo coberta por uma única cena do SAR SRTM, mas sim por oito diferentes cenas, a

saber: SB-22-Z-C; SB-22-Z-B; SB-22-Z-A; SB-22-Y-D; SB-22-Y-B; SB-22-X-D; SB-22-X-C; e SB-22-V-D.

As cenas a princípio foram agrupadas gerando um mosaico, através do uso da ferramenta *Mosaic* do ArcGIS 9.2, e posteriormente recortada para eliminação das áreas localizadas fora dos limites da bacia, através da aplicação da máscara da bacia (item 5.1.1.1) sobre o mosaico, usando a ferramenta *Extract by Mask* (figura 09).

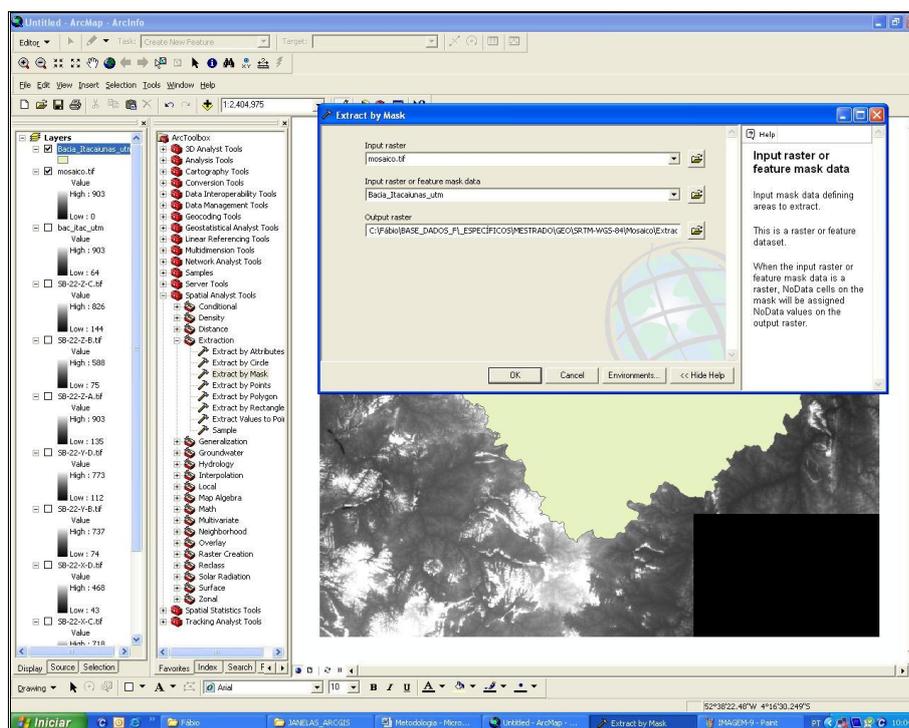


Figura 09: Extração da base SRTM correspondente à bacia do rio Itacaunas

#### 5.1.1.4 Seleção dos parâmetros morfométricos

Neste trabalho se optou por analisar os parâmetros: área de drenagem, densidade de drenagem, declividades média, máxima e mínima; altitudes média, máxima e mínima e hierarquização hidrográfica.

### 5.1.1.5 Área de drenagem

A área de drenagem foi obtida de forma automática através de consulta ao campo *Value Field-Shape Area* em *Create Graph*, na tabela de atributos do shapefile da bacia (figura 10).

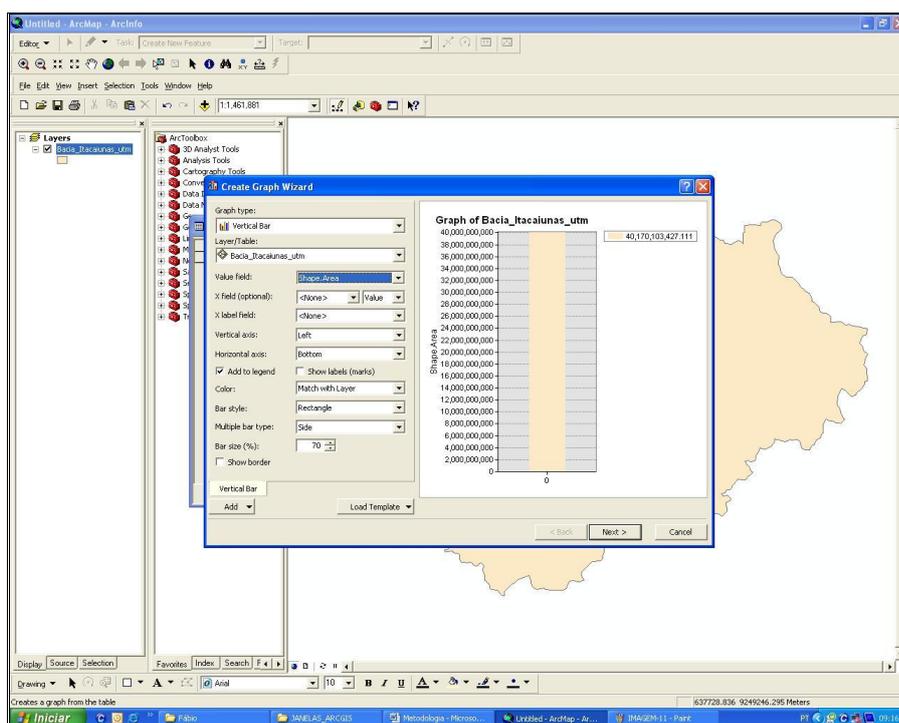


Figura 10: Procedimento para o cálculo da área de drenagem da bacia

### 5.1.1.6 Densidade de drenagem

No cálculo do parâmetro densidade de drenagem utilizou-se o valor da área de drenagem, e operações de geoprocessamento sobre as bases vetoriais de drenagem da bacia extraídas anteriormente.

Como o parâmetro mencionado depende fundamentalmente da definição do comprimento total da rede hidrográfica e uma das bases vetoriais de drenagem é da tipologia poligonal, foi necessário derivar a partir desta uma base complementar linear. Esta última foi gerada a partir do módulo ArcCatalog do ArcGIS 9.2, por meio da criação de um novo *shapefile* de feição linear orientado pela drenagem poligonal buscando manter uma distância equivalente entre as margens, de forma a representar a hipotética localização do talvegue da rede hidrográfica. O cálculo da

densidade de drenagem foi obtido a partir da conjugação das informações: área de drenagem e comprimento total dos canais por meio da relação.

$$Dd = \frac{Lt}{At}$$

Equação nº 33

*Dd = densidade de drenagem;*

*Lt = comprimento total da drenagem;*

*At = área total da bacia.*

#### 5.1.1.7 Obtenção das altitudes máxima, mínima e média da bacia

As altitudes máxima, mínima e média foram obtidas através de consulta direta as propriedades da base SRTM da bacia do rio Itacaiunas. Para tanto foi realizada avaliação estatística no programa (Source - Statistics) onde os valores de altitudes máxima, média e mínima assinalados pelos *pixels* que compõe a área da bacia foram apresentados (figura 11).

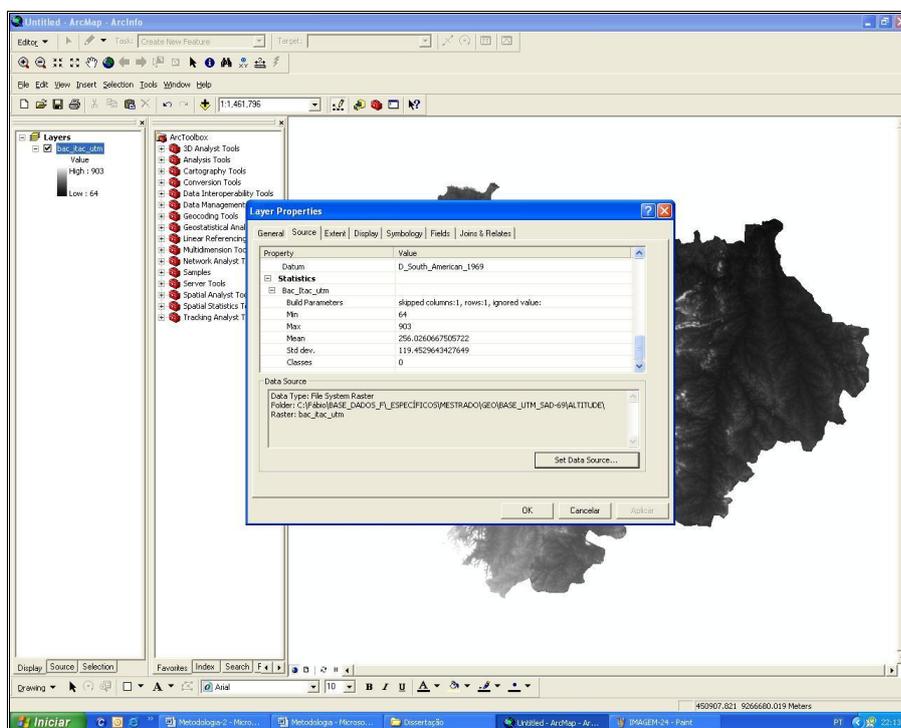


Figura 11: Estatística apresentada pelas propriedades da base SRTM

### 5.1.1.8 Declividades máxima, média e mínima

As declividades máxima, média e mínima foram obtidas, analogamente ao descrito no item anterior, por consulta direta às propriedades da base SRTM (figura 12). Porém, foi necessário produzir uma base secundária de declividades a partir da base original de altitudes, utilizando operações específicas de geoprocessamento no ArcGIS 9.2 (Surface - Spatial Analyst Tools - Slope).

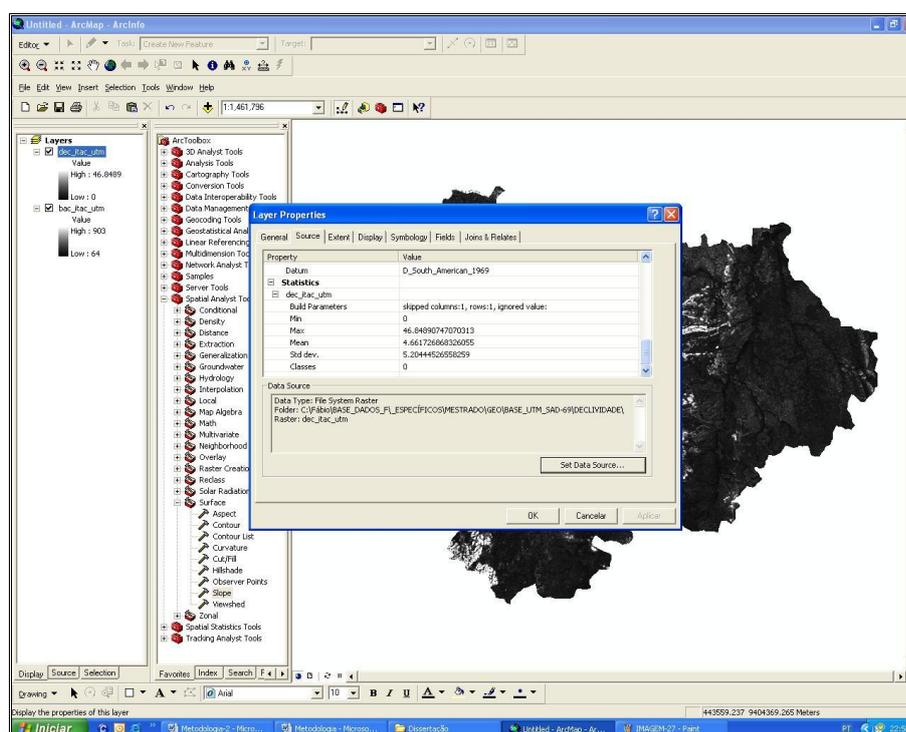


Figura 12: Estatística apresentada pela base SRTM de declividades

### 5.1.1.9 Hierarquização hidrográfica

A partir da classificação de cada segmento de drenagem, segundo a metodologia de Strahler, foi possível identificar a ordem da bacia (figura 13). A ordem total é resultante da classificação hierárquica do trecho de drenagem, definido a partir das confluências.

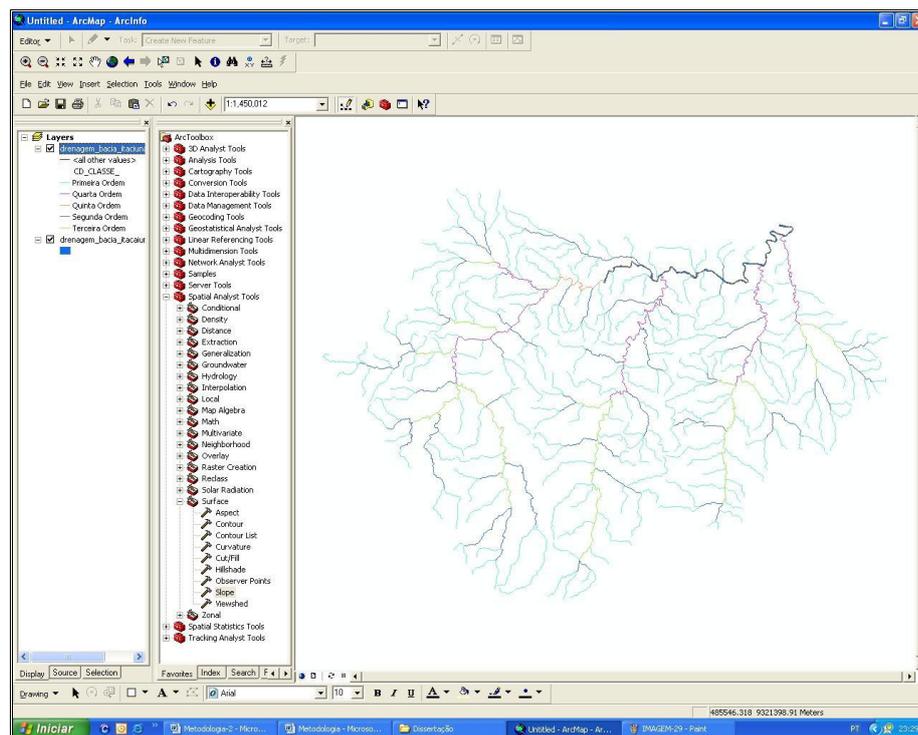


Figura 13: Base classificada segundo método de Strahler no ArcGIS 9.2

### 5.1.2 Análise hidrológica

A análise hidrológica foi realizada em três fases: regionalização física e climática das principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas; ajuste de modelos de distribuição probabilísticas aos dados hidrológicos e definição de vazão máxima, mínima e média de sete dias consecutivos com dez anos de recorrência; geração da curva de permanência e  $Q_{95}$  global e para os doze meses do ano civil.

Nesta etapa foram utilizadas nas análises espaciais os aplicativos ArcView 3.2 e ArcGIS 9.2 em sistema de orientação geográfica UTM SAD 69 Zona 22 Sul, a base de séries históricas fluviométricas e pluviométricas disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (HIDROWEB) (ANA, 2009c), o sistema de análise hidrológica HIDRO 1.2.1 e o aplicativo de regionalização hidrológica RH 4.0 (EUCLYDES, 2005).

Todas as etapas foram precedidas pela seleção das estações para realização do estudo e definição do período base da análise hidrológica.

### 5.1.2.1 Definição do período base de estudo e seleção das estações de monitoramento

O período base de estudo foi definido como aquele comum entre as séries históricas de chuva e vazão dos postos de observação presentes na bacia do rio Itacaiunas. Para tanto, foi necessário realizar o levantamento de todos os postos fluviométricos e pluviométricos presentes na bacia ou mesmo em suas proximidades, no caso específico das estações meteorológicas (consulta ao domínio HIDROWEB).

Foi possível notar que do universo total de estações fluviométricas apenas uma encontra-se atualmente em operação e possui informação de vazão, as demais estão desativadas ou no máximo possuem dados de série histórica de cota. Esta constatação revela a inexistência de curva-chave relacionando cota e vazão na maioria dos postos, como se pode evidenciar na tabela 01, e inviabilizou completamente a possibilidade de serem utilizadas sete das oito estações, nos procedimentos de regionalização hidrológica.

Tabela 01: Estações fluviométricas da bacia do rio Itacaiunas

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>STATUS</b>	<b>INFORMAÇÃO</b>
Fazenda Rio Branco	desativada	Cota/vazão
Jacaré	-	-
Acampamento Caldeirão	-	-
Barra do Cinzento	desativada	cota
Gelado	desativada	cota
Parauapebas	-	-
Fazenda Angical	desativada	cota
Fazenda Alegria	ativa	Cota/vazão

Portanto, para efeito de definição dos parâmetros hidrológicos regionais da bacia foram utilizados exclusivamente os dados da série histórica do posto fluviométrico “Fazenda Alegria”, localizado em Marabá (figuras 14 a 16).



Figura 14: Posto fluviométrico Fazenda Alegria.  
Fonte: Acervo CPRM/PA.



Figura 15: Seção utilizada para medição de vazão na estação Fazenda Alegria.  
Fonte: Acervo CPRM/PA.



Figura 16: Medição de vazão com ADCP (Acoustic Doppler Current Profile) na estação Fazenda  
Fonte:Acervo CPRM/PA

Quanto às estações pluviométricas, a consulta à base do Sistema Estadual de Informações de Recursos Hídricos (SEIRH) revelou haver maior número de postos de controle na bacia ou próxima desta, em um total de 17, como mostrado na tabela 02.

Tabela 02: Postos fluviométricos com influência na bacia do rio Itacaiunas

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>STATUS</b>	<b>INFORMAÇÃO</b>
Acampamento 3A Caldeirão	-	-
Eldorado	Ativa	chuva
Fazenda Alegria	Ativa	chuva
Fazenda Angical	Desativada	chuva
Fazenda Caiçara	Ativa	chuva
Fazenda Rio Branco	Desativada	chuva
Fazenda Santa Elisa	Ativa	chuva
Fazenda Surubim	Ativa	chuva
Jacaré	-	-
Km 60-Pa 150	Desativada	chuva
Marabá	Desativada	chuva
Serra Carajás-Acampamento Meridional	-	-
Serra dos Carajás-N5	Ativa	chuva
Serra Pelada	Ativa	chuva
Vira Sebo	Desativada	chuva
Bannach	Ativa	chuva
Xinguara	Ativa	chuva

A partir da pesquisa feita ao domínio HIDROWEB pôde-se constatar que três estações não possuem nenhum dado de série histórica de precipitação disponível para download, cinco encontram-se desativadas e apenas oito do total estão ativas.

Entretanto, vale ressaltar que em virtude da disponibilidade de apenas uma estação fluviométrica com dados de vazão para o estudo, cuja série histórica de dados consistidos se estende de 1969 a 2005, o fator determinante na definição do horizonte de estudo passou a ser o período comum de observações somente entre as séries de precipitação, de forma que mesmo estações atualmente inativas poderiam ser utilizadas dependendo do horizonte comum entre as observações de chuva.

A figura 17 representa o diagrama de barras utilizado na definição do período base de estudo.



Estas informações foram obtidas através de consulta ao histórico de monitoramento de cada uma destas estações no sistema de análise hidrológica HIDRO 1.2.1.

Como critérios para a seleção das estações pluviométricas foi definido que aquelas com número de anos excessivos da série histórica contendo meses com presença de falhas (40% ou mais) e que tivessem série histórica de monitoramento com meses completos de precipitação menor que dez anos seriam eliminadas.

Logo, oito estações das avaliadas foram excluídas por enquadrarem-se nos perfis acima descritos (tabela 03).

Tabela 03: Estações pluviométricas descartadas

<b>ESTAÇÕES DESCARTADAS</b>	
<b>NOME</b>	<b>MOTIVO</b>
FAZ ALEGRIA	MENOS DE 10 ANOS DE DADOS COMPLETOS
FAZ ANGICAL	MENOS DE 10 ANOS DE DADOS COMPLETOS
FAZ RIO BRANCO	10 ANOS DE DADOS PORÉM COM UM ANO DE FALHAS
MARABÁ I	PRESENÇA DE Nº EXCESSIVO DE FALHAS NA SÉRIE
SERRA PELADA	PRESENÇA DE Nº EXCESSIVO DE FALHAS NA SÉRIE
VIRA SEBO	MENOS DE 10 ANOS DE DADOS COMPLETOS
XINGUARA	PRESENÇA DE Nº EXCESSIVO DE FALHAS NA SÉRIE
BANNACH	MENOS DE 10 ANOS DE DADOS COMPLETOS

As restantes todas foram admitidas para compor a avaliação, conforme relação abaixo (tabela 04).

Tabela 04: Estações pluviométricas selecionadas para o estudo

<b>ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS</b>
ELDORADO
FAZ CAIÇARA
FAZ SANTA ELISA
FAZ SURUBIM
KM 60
SERRA CARAJÁS N5

A climatologia de cada uma das estações pluviométricas utilizadas neste estudo pode ser observada nos anexos P a U.

Ao final então, a partir da observação do período comum de dados entre as estações pluviométricas, previamente selecionadas, foi definido o período de 1988 a 2005, como base temporal do estudo.

Porém, em virtude da constatação de que na série pluviométrica da estação “Fazenda Alegria” o número de observações hidrológicas nos anos de 1990, 1991 e

2002 foi bastante incipiente, fato que poderia tendenciar os resultados da análise hidrológica, optou-se por eliminá-los completamente, de forma que ao final contabilizou-se 15 e não 18 anos de observações, no período estudado.

#### 5.1.2.2 Definição das sub-bacias para regionalização física e climática

As mesmas sub-bacias foram avaliadas tanto nos procedimentos de regionalização física quanto climática. A regionalização das sub-bacias com base nos aspectos físicos e climáticos foi necessária por não haver um número suficiente de estações fluviométricas distribuídas na área da bacia principal que permitissem a aplicação de procedimentos de regionalização com base nas similaridades do comportamento hidrológico entre os dados registrados pelos postos de controle fluviométrico.

Conseqüentemente, por haver apenas uma estação fluviométrica alocada próxima à foz do rio principal, foi necessário assumir a premissa de que os dados hidrológicos registrados no posto fluviométrico Fazenda Alegria seriam representativos dos processos hidrológicos ocorrentes em toda a dimensão da bacia, levando à hipótese nula para efeito de estudo que a bacia do rio Itacaiunas constitui uma unidade fisiográfica homogênea hidrologicamente.

Em virtude do número rarefeito de estações pluviométricas com dados disponíveis para a bacia do rio Itacaiunas, que possivelmente não seriam representativas dos eventos de precipitações ocorrentes nas sub-bacias de menor ordem, optou-se por definir como critério de seleção das sub-bacias a serem regionalizadas aquelas que possuíssem ordem maior ou igual à quarta, segundo os critérios de Strahler.

Logo, foram definidas como áreas de estudo para regionalização física e climática as sub-bacias do rio Vermelho, do rio Parauapebas, do rio Sororó e do rio Tapirapé, por estarem contempladas dentro dos critérios mencionados.

#### 5.1.2.3 Regionalização física

A regionalização física das principais sub-bacias do rio Itacaiunas foi realizada utilizando os parâmetros declividade e altitude, obtidos a partir da

aplicação da máscara das sub-bacias sobre as respectivas bases, com uso da ferramenta *Extract by Mask*, do ArcGIS 9.2.

O Método de Quartiz, escolhido para a regionalização, consistiu em definir para cada um dos dois parâmetros físicos quatro categorias distintas, tomando por base o intervalo de classes definido em função da relação entre a amplitude gerada pela diferença dos valores de máximo e mínimo de cada parâmetro para a bacia do rio Itacaiunas e o número de categorias adotadas no estudo.

No caso do parâmetro altitude as classes hipsométricas foram organizadas na ordem apresentada na tabela 05, sendo o intervalo de classes definido em metros como unidade padrão.

Tabela 05: Critérios de definição de categorias hipsométricas para regionalização

<b>INTERVALOS DE CLASSE</b>	<b>CATEGORIAS HIPSOMÉTRICAS</b>
273.75	BAIXAS ALTITUDES
483.50	MÉDIAS ALTITUDES
693.25	ELEVADAS ALTITUDES
903.00	ALTITUDES MUITO ELEVADAS

Da mesma forma para o parâmetro declividade foram definidas quatro categorias distintas (tabela 06), porém utilizou-se como padrão do intervalo de classe de declividade a unidade de medida graus.

Tabela 06: Critérios de definição de categorias de declividade para regionalização

<b>INTERVALOS DE CLASSE</b>	<b>CATEGORIAS DE DECLIVIDADE</b>
11.50	BAIXAS DECLIVIDADES
23.00	MÉDIAS DECLIVIDADES
34.50	ELEVADAS DECLIVIDADES
46.00	DECLIVIDADES MUITO ELEVADAS

#### 5.1.2.4 Regionalização climática

A regionalização climática das principais sub-bacias do rio Itacaiunas foi feita por meio da análise de variância (ANOVA: um critério) da precipitação total anual registrada nas mesmas durante o período base da análise hidrológica.

Para efeito de estudo nesta etapa se assumiu as seguintes hipóteses:

- $H_0$ : As principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas são climaticamente homogêneas;

- $H_1$ : As principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas são climaticamente heterogêneas.

A ANOVA: um critério, em especial, possui esta denominação pelo fato de ser usada para comparar somente variações entre os tratamentos cujo resultado é expresso no valor do F-teste.

Desta forma torna-se evidente que a ANOVA: um critério é perfeitamente aplicável com a finalidade de se analisar variâncias estatisticamente significativas entre as precipitações das sub-bacias do rio Itacaiunas.

Como meio de viabilizar a análise estatística foi calculado ano a ano a precipitação total anual em cada uma das quatro sub-bacias estudadas através do método dos Polígonos de Thiessen.

Para este procedimento utilizou-se a extensão *Create Thiessen Polygons* do ArcView 3.2, nas seguintes etapas:

- obtenção do contorno das áreas de influência dos postos pluviométricos relativa a cada sub-bacia estudada;
- cálculo das respectivas áreas de influência de cada um dos polígonos nas sub-bacias.

A seguir definiram-se:

- os valores do total anual de precipitação registrado em cada posto pluviométrico, a partir das informações extraídas do programa HIDRO 1.2.1;
- o valor da precipitação total anual de cada uma das sub-bacias no horizonte temporal de estudo.

A partir de então por meio de operações de programação em planilhas, tomando-se como base a equação que define o cálculo da precipitação em uma bacia a partir do método dos Polígonos de Thiessen, chegou-se aos valores totais anuais precipitados para cada sub-bacia, em milímetros. Tendo-se obtido os valores anuais de precipitação de cada uma das quatro sub-bacias, foi finalmente aplicada a ANOVA: um critério. Para efeito de análise as sub-bacias foram definidas como os blocos ou grupos avaliados e as amostras os valores de precipitação total anual, dispostos de acordo com o horizonte temporal de estudo.

#### 5.1.2.5 Ajuste de modelos de distribuição probabilística aos dados hidrológicos e definição das vazões máxima, média e mínima de sete dias consecutivos e dez anos de retorno

As variáveis hidrológicas vazão máxima, média e mínima de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência foram regionalizadas para a bacia do rio Itacaiunas, a partir do ajuste de modelos de distribuição probabilística aos dados da estação fluviométrica “Fazenda Alegria”, localizada no município de Marabá próximo à foz do rio Itacaiunas.

Como meio de refinar os resultados e observar a influência que a sazonalidade determina sobre o comportamento hidrológico da bacia em questão optou-se, para efeito de análise, em dividir a série histórica de dados em função dos períodos sazonais seco e chuvoso.

A definição do que seria considerado o período seco e chuvoso na bacia do rio Itacaiunas foi feita de forma automática a partir dos dados fluviométricos da estação Fazenda Alegria, por meio de procedimento de avaliação hidrológica sazonal disponível no aplicativo RH 4.0.

Sendo assim, definiu-se para efeito de análise sazonal o período seco da bacia do rio Itacaiunas se estendendo de Abril a Setembro e o chuvoso de Outubro a Março.

Um desdobramento importante desta definição é que para o período chuvoso a série histórica de monitoramento utilizada não teve seus dados utilizados a partir do ano de 1988, mas sim a partir de 1987 a fim de incorporar o ano hidrológico que iniciou no último trimestre do ano civil anterior.

Os procedimentos de regionalização foram todos realizados a partir do aplicativo RH 4.0:

- o aplicativo RH 4.0 possibilita estimar as disponibilidades e potencialidades hídricas de forma simples e rápida, considerando a sazonalidade das vazões na regionalização hidrológica;
- em sua programação há rotinas específicas que permitem ao usuário entrar com os dados de séries históricas de precipitação e vazão, entrar com dados dos parâmetros físicos e climáticos da bacia hidrográfica estudada, além de regionalizar as vazões mínima, máxima, média de longo período e curva de

permanência através de dois métodos diferentes (o primeiro regionaliza parâmetros de uma distribuição estatística e o segundo regionaliza uma curva de probabilidade adimensional e o fator de adimensionalização) de acordo com a escolha do usuário;

- apesar de o programa apresentar duas alternativas de métodos de regionalização optou-se por aplicar apenas o método que regionaliza vazões com determinado risco (primeiro método), haja visto o objetivo da análise se limitar a apenas gerar as vazões regionais para a bacia, objetivo que é perfeitamente factível e viável pelo primeiro método;
- o método escolhido para regionalização consiste em ajustar modelos de distribuições teóricas de probabilidades às séries históricas de vazão para diferentes períodos de recorrência; entretanto para efeito deste estudo a análise foi limitada à recorrência de dez anos, em função da ausência de uma série maior de dados que viabilizasse uma análise para recorrências de maior horizonte temporal com segurança.

Como testes de aderência dos modelos de distribuição de probabilidades aos dados de vazão foram utilizados conjuntamente o método de Kolgoromov-Smirnov (%K-S) e o coeficiente de variação entre a função de distribuição e os dados (C.V.).

A escolha do modelo de distribuição teórica de probabilidades foi feito a partir da observação do modelo que obteve a função de distribuição mais significativa, maior valor de %K-S, e o menor coeficiente de variação, considerado, portanto o melhor ajuste dentre todos.

Os procedimentos de regionalização começaram com a aquisição dos dados da série histórica da estação fluviométrica “Fazenda Alegria”. Em sequência se iniciaram as operações no programa RH 4.0.

Todos os procedimentos de ajuste de modelos de distribuição teórica de probabilidades no RH 4.0 foram os mesmos, tanto na análise relativa ao período seco quanto ao chuvoso, com exceção do procedimento inicial, pois foi nesta etapa que se definiu o intervalo de dados da série que norteou as etapas seguintes de cada análise.

### 5.1.2.6 Construção da curva de permanência

A avaliação da permanência das vazões da bacia hidrográfica do rio Itacaiunas foi feita a partir da construção da curva de permanência regional utilizando-se os dados hidrológicos da estação “Fazenda Alegria”.

Segundo Tucci (2004) a curva de permanência relaciona às vazões ou nível de um rio e a probabilidade de ocorrerem vazões maiores ou iguais ao valor da ordenada, podendo ser obtida com base em valores diários, semanais ou mensais.

A regionalização da curva de permanência foi realizada com base no método proposto por Tucci (2004) adaptado por Euclides (2005).

O método para a estimativa da curva de permanência possui as seguintes etapas:

- Seleção das séries de dados de vazão diários.
- Definição de 50 intervalos de classe de vazões diárias.
- Subdivisão dos intervalos de classe com base na escala logarítmica devido à grande variação de magnitude das vazões envolvidas.
- Cálculo do intervalo de classe pela equação abaixo descrita:

$$\Delta x = \frac{1}{50} \ln \left( \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \right) \quad \text{Equação nº 34}$$

Onde:  $Q_{\max}$  = vazão máxima da série;  $Q_{\min}$  = vazão mínima da série.

- Cálculo do limite dos intervalos: a partir de  $Q_{\min}$ , adicionando-se o intervalo calculado anteriormente, o que resultará na vazão no limite superior no intervalo  $i$ , abaixo descrito:

$$Q_{i+1} = \exp \left[ \ln Q_i + \Delta x \right] \quad \text{Equação nº 35}$$

- Determinação com base nos dados de vazão da série histórica fluviométrica do número de vazões classificadas em cada intervalo.
- Determinação da frequência ( $f_i$ ) associada ao limite inferior de cada intervalo:

$$f_i = \left( \frac{Nq_i}{NT} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação nº 36}$$

Onde:  $Nq_i$  - número de vazões de cada intervalo;  $NT$  - número total de vazões.

- Obtenção da curva de permanência plotando-se na ordenada os limites dos intervalos de classe de vazão e na abscissa a frequência de ocorrência.

A curva de permanência foi obtida por rotina já definida no programa HIDRO

#### 1.2.1.

#### 5.1.2.7 Permanência de vazões a 95% global e mensal

A vazão  $Q_{95}$  global e mensal foi obtida diretamente a partir da análise dos resultados gerados pela etapa anterior, utilizando de forma análoga como ferramenta o sistema de informações hidrológicas HIDRO 1.2.1. A princípio apenas foi selecionada a opção *Resumo* na mesma janela onde, na operação descrita anteriormente, foi apresentada a curva de permanência regional da bacia do rio Itacaiunas.

Feito isso foi apresentada então uma tabela onde nas linhas constavam a série completa de monitoramento (primeira linha) e os meses do ano civil (nas demais), e nas colunas as permanências de 5 a 100% com intervalos de 5 unidades entre cada classe.

Logo, observando-se apenas a coluna relativa à vazão  $Q_{95}$  pôde-se evidenciar seu valor global e as suas oscilações mensais na bacia estudada.

#### 5.1.2.8 Avaliação da disponibilidade hídrica superficial da bacia

A disponibilidade hídrica superficial da bacia hidrográfica do rio Itacaiunas foi calculada através da avaliação do impacto individual e total dos usuários de água da respectiva bacia, tomando como vazão de referência a  $Q_{95}$  da série histórica da estação "Fazenda Alegria".

Segundo Moreira (2006) a quantificação das vazões consumidas por diversos usuários em uma bacia hidrográfica permite uma melhor compreensão do comportamento hidrológico propiciando a obtenção da real disponibilidade hídrica da unidade fisiográfica.

Em todas as etapas deste item os cálculos foram realizados com uso de uma planilha com programação específica, da mesma forma que as análises espaciais foram todas realizadas com suporte do aplicativo ArcGIS 9.2.

A  $Q_{95}$  foi adotada recentemente como vazão de referência no processo de tomada de decisão quanto à Outorga para captação de águas superficiais no Estado do Pará, a partir das soluções apresentadas à SEMA/PA, por um estudo encomendado a uma consultoria especializada na sistematização de procedimentos técnicos e normativos relativos à gestão de recursos hídricos.

A outorga é um dos principais instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal 9433/1997) e também da Política Estadual de Recursos Hídricos do Pará (Lei Estadual 6381/2001).

A implementação dos critérios de outorga tem o objetivo de garantir o controle quantitativo e qualitativo da água em consonância com os diversos usos múltiplos dos recursos hídricos e o efetivo exercício de acesso à água (Lei Estadual 6381/2001).

Segundo os critérios adotados pelo órgão gestor da Política Estadual de Recursos Hídricos do Pará, somados todos os usos da água de uma dada bacia hidrográfica estes não podem ultrapassar 70% do valor da  $Q_{95}$  calculada para a bacia, assim como um único usuário pode ter outorgado no máximo 20% do valor da  $Q_{95}$ . Logo, a disponibilidade hídrica para outorga no Pará limita-se a 70% da  $Q_{95}$ , estando os outros 30% indisponíveis para captação de qualquer espécie, constituindo a hoje bastante discutida vazão ecológica.

A fim de se evidenciar quais seriam os usuários dos recursos hídricos na bacia foi realizada uma pesquisa no Sistema de Monitoramento e Licenciamento Ambiental do Estado do Pará (SIMLAM-SEMA/PA) filtrando-se os resultados por município, utilizando-se obviamente os municípios que se encontram nos limites da bacia, conforme elucidado anteriormente.

Em seguida através de consulta aos títulos emitidos para cada usuário outorgado nos municípios obteve-se a localização geográfica das captações superficiais e o nome dos corpos hídricos utilizados nas mesmas.

Posteriormente, então se realizou a espacialização dos pontos a fim de se evidenciar se as outorgas expedidas para os municípios pesquisados encontravam-se nos limites da bacia do rio Itacaiunas.

Para tanto se criou uma planilha em que todas as informações relevantes dos usuários avaliados foram inseridas. Em seguida, foi criado um novo projeto no ArcGIS 9.2 onde foi adicionado o arquivo *shapefile* vetorial da bacia do rio Itacaiunas à vista. Complementarmente então, se inseriu os pontos de captação a partir da planilha.

Ao término do procedimento a distribuição espacial dos pontos de captação foi apresentada na vista, elucidando se todos estavam ou não na área de drenagem da bacia. De todos os pontos de captação outorgados nos municípios que compõem a bacia apenas três estão alocados fora dos limites, logo foram descartados da

análise. Dessa forma, a planilha original foi modificada ao eliminar-se os campos referentes às captações fora dos limites da bacia.

De posse das vazões outorgadas na bacia procedeu-se ao cálculo do impacto individual de cada usuário calculando-se o percentual equivalente a cada captação relativa à vazão de referência  $Q_{95}$ . Assim como, se calculou o impacto acumulado de todos os usuários através da soma das vazões de todas as captações da bacia e o posterior cálculo de seu percentual relativo à vazão  $Q_{95}$ .

Ao final então se subtraindo a vazão de referência da vazão total outorgada na bacia (balanço hídrico simplificado), pôde-se elucidar a disponibilidade hídrica remanescente para outorga na mesma.

## 5.2 AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DO USO DA TERRA

A avaliação da dinâmica do uso da terra na bacia foi realizada por meio da comparação entre as áreas correspondentes às classes adotadas na classificação supervisionada pelo método da mínima distância, para os anos de 1987-88 e 2005.

As cenas utilizadas como marco inicial da avaliação foram às seguintes:

- 224-64 de 27/07/1987;
- 223-65 de 07/08/1988;
- 224-65 de 14/08/1988;
- 225-64 de 06/09/1988;
- 223-64 de 08/09/1988.

Já com relação ao ano de 2005 as cenas utilizadas foram:

- 223-64 de 06/08/2005;
- 223-65 de 06/08/2005;
- 224-64 de 12/07/2005;
- 224-65 de 12/07/2005;
- 225-64 de 19/07/2005.

Os procedimentos de classificação foram todos realizados com uso do aplicativo ENVI 4.5 utilizando composição colorida RGB nas bandas 5,4 e 3 de cenas do sensor Landsat TM-5 (INPE, 2010). Entretanto para a elaboração da composição colorida RGB nas cenas optou-se por utilizar o SIG ArcGIS 9.2.

Também como forma de sistematizar as análises espaciais, foi utilizada a projeção UTM SAD-69 22 S, analogamente ao adotado nos procedimentos de regionalização hidrológica.

### **5.2.1 Definição das categorias de uso da terra**

Adotaram-se cinco classes nos procedimentos de classificação: vegetação (verde), não-vegetação (magenta), massa d' água (azul), nuvem (branco) e sombra de nuvem (preto).

A classe de uso “vegetação” não inclui as áreas de pastagens uma vez que este uso exerce em geral pressão sobre as florestas, sejam elas primárias ou secundárias, e sua assinatura espectral é muito mais influenciada pela resposta espectral do solo do que de sua biomassa vegetal e seu conteúdo de água, propriamente dito. Segundo Fearnside (2004), anualmente na Amazônia grandes áreas de floresta são convertidas em pastagens modificando o uso da terra como efeito das forças econômicas e políticas que incentivam o aumento do rebanho bovino e as exportações de carne do Brasil.

Outro aspecto que concorreu para a escolha da inclusão das pastagens na classe “não-vegetação” deveu-se ao fato de que quando mal manejadas estas últimas deixam o solo descoberto e sem proteção contra a ação da erosão hídrica e eólica, reduzindo substancialmente a infiltração e afetando diretamente a vazão (PINTO et al., 2005).

### **5.2.2 Seleção das amostras para classificação**

Um passo fundamental na classificação supervisionada é a escolha das amostras de controle, ou regiões de interesse como também são chamadas. Tal aspecto deve-se, sobretudo, porque é nesta etapa que são estabelecidos os padrões de resposta espectral de cada classe que serão utilizados para a

classificação dos *pixels* não classificados na imagem, por meio de extrapolações e aproximações estatísticas.

No ENVI 4.5 em cada mosaico foram coletadas as áreas correspondentes às tipologias de uso da terra previamente estabelecidas. Para esse processo inicialmente foram adicionados a um novo projeto o mosaico Landsat de cada período individualmente. Posteriormente ao clicar-se com o botão direito do mouse sobre o mosaico e escolher-se a opção *ROI Tool* foi aberta à janela onde por meio de seleção direta de áreas na cena as amostras foram coletadas e suas propriedades editadas.

Para o mosaico 1987-1988 foram coletadas 34 amostras sendo 10 de vegetação, 11 de não-vegetação, 8 de massa d'água, 3 de nuvens e e 2 de sombra de nuvem.

Já para o mosaico de 2005 foram amostrados 12 pontos correspondentes à classe vegetação, 11 à classe não-vegetação, 10 à classe massa d' água, 2 à nuvem e 2 à sombra de nuvem, totalizando 37 pontos de controle.

### **5.2.3 Classificação supervisionada**

A classificação supervisionada tomou por base os mosaicos dos dois períodos e as coleções de amostras de treinamento geradas nas etapas anteriores.

Dois procedimentos distintos foram realizados para ambas as classificações nos dois períodos da avaliação, empregando o comando *Minimum Distance* em *Supervised* em *Classification*.

Ao término do procedimento obteve-se o arquivo com a classificação segundo as classes previamente definidas.

### **5.2.4 Tratamentos pós-classificação**

Após gerar uma classificação deve-se ter especial atenção ao tamanho das áreas de algumas regiões das classes. Pode ocorrer de na classificação uma região ser formada por poucos *pixels* ou mesmo por um único *pixel* (SULSOFT, 2010).

Neste sentido, como meio de contornar esta problemática é recomendável passar a classificação final por um processo de “generalização” da classificação, que

consiste em aplicar um “SIEVE” e após um “CLUMP”. O primeiro filtra as regiões muito pequenas, agregando à região adjacente que for mais frequente, utilizando vizinhança 8 (SULSOFT, 2010).

Já o processo de “CLUMP” agrega as regiões de uma mesma classe, as quais existe conectividade entre si (SULSOFT, 2010).

Conforme recomendado acima, os filtros “Sieve” e “Clump” foram aplicados às classificações de ambos os períodos seguindo esta respectiva ordem, em projetos diferentes no ENVI 4.5.

A seguir com os arquivos de classificação já filtrados, foi necessário criar uma máscara na extensão . evf (formato raiz do ENVI) para posterior utilização, a fim de limitar o cálculo das áreas correspondentes às classes estudadas em ambos os mosaicos à área da bacia do rio Itacaiunas.

A aplicação da máscara da bacia do rio Itacaiunas foi feita a partir da opção *Buid Mask* em *Masking* em *Basic Tools*, presente na barra de ferramentas do programa. Após definida e aplicada à máscara da bacia do rio Itacaiunas partiu-se para os procedimentos de cálculo das áreas representativas de cada classe de uso da terra.

A princípio no ENVI 4.5 acionou-se *Class Statistics-Post Classification* na ferramenta *Classification*, que levou então à janela *Classification Input File* onde o arquivo do mosaico classificado foi adicionado. Em sequência utilizou-se a opção *Select Mask Band- Statistics Input File* para inserir a máscara criada anteriormente e limitar a ela a área para o cálculo das estatísticas de classificação.

Posteriormente todas as classes, incluindo a correspondente aos *pixels* eventualmente não classificados, foram adicionadas à análise por meio da ferramenta *Class Selection*.

Ao término dos procedimentos as estatísticas da classificação referentes somente à área da bacia estudada foram apresentadas.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 MORFOMETRIA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS

#### 6.1.1 Valores identificados

A análise das características morfométricas da bacia do rio Itacaiunas reportou os resultados apresentados na tabela 07:

Tabela 07: Parâmetros morfométricos da bacia do rio Itacaiunas

<b>PARÂMETROS BÁSICOS</b>	<b>VALORES</b>
ÁREA (Km <sup>2</sup> )	40170.11
ALTITUDE MÁXIMA (m)	903.00
ALTITUDE MÍNIMA (m)	64.00
ALTITUDE MÉDIA (m)	256.03
DECLIVIDADE MÁXIMA (graus)	44.11
DECLIVIDADE MÍNIMA (graus)	0.00
DECLIVIDADE MÉDIA (graus)	3.64
DENSIDADE DE DRENAGEM (Km/Km <sup>2</sup> )	0.16

Em termos de área total a bacia constitui-se em uma unidade fisiográfica de grande porte, haja vista possuir mais de 40.000 Km<sup>2</sup> de área de drenagem. Em seus limites estão presentes municípios inteiros, tais como Canaã dos Carajás, Eldorado dos Carajás e Curionópolis (figura 19).

Entretanto, o município que possui a maior área relativa à área total da bacia é Marabá, que ocupa cerca de 33,58% desta.

Parauapebas, com 16,99%, e Água Azul do Norte, com 16,32%, vêm em sequência a Marabá com os maiores percentuais de área da bacia.

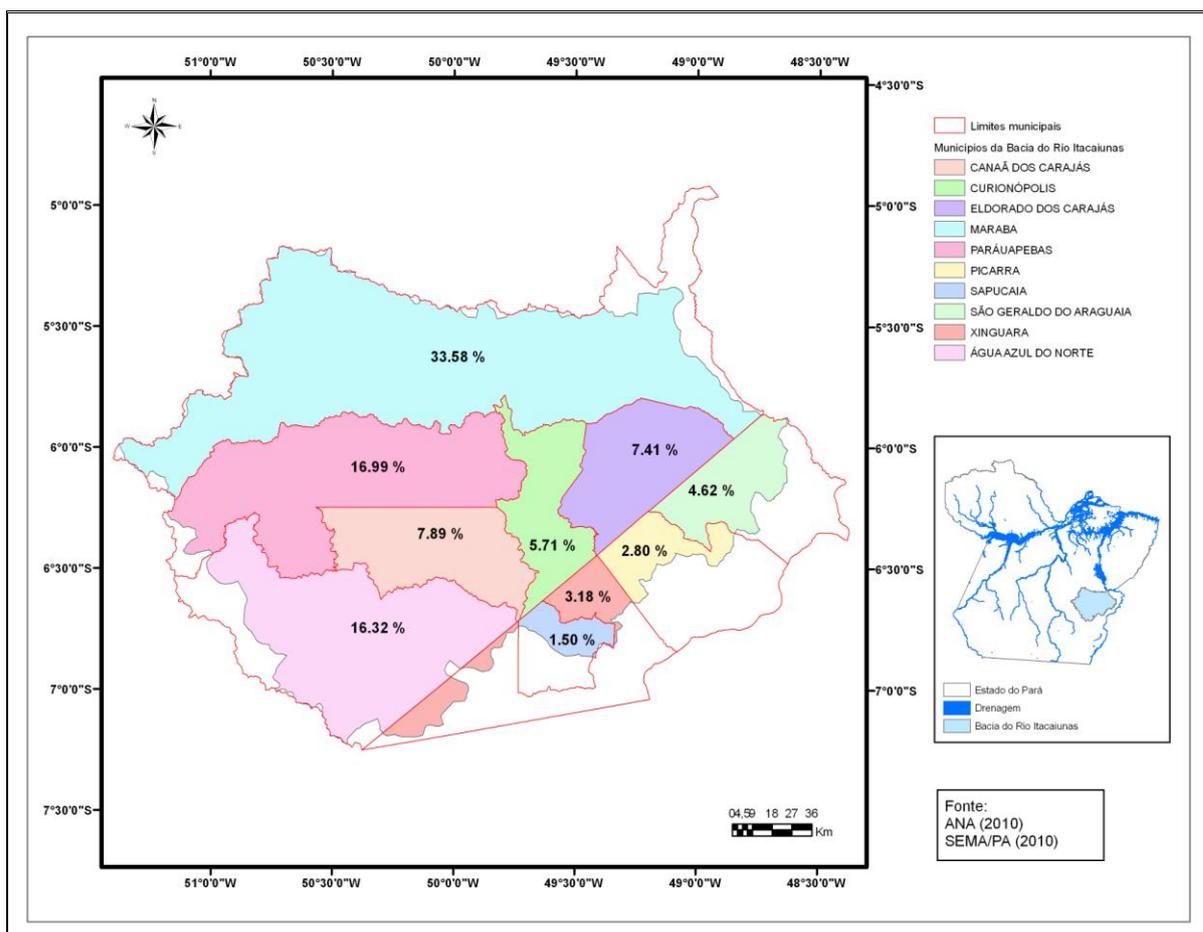


Figura 18: Municípios da bacia do rio Itacaiunas

A distribuição percentual de área de cada município individualmente na bacia estudada está presente na tabela 08, abaixo.

Tabela 08: Percentual de área dos municípios

<b>MUNICÍPIO</b>	<b>% ÁREA DA BACIA</b>
MARABÁ	33,58
CURIONÓPOLIS	5,71
ELDORADO DOS CARAJÁS	7,41
PARAUAPEBAS	16,99
SÃO GERALDO DO ARAGUAIA	4,62
CANAÃ DOS CARAJÁS	7,89
PICARRA	2,80
ÁGUA AZUL DO NORTE	16,32
XINGUARA	3,18
SAPUCAIA	1,50

As altitudes ao longo da bacia variam de 64 a 903 metros, constituindo uma amplitude altimétrica relativamente elevada. Já o valor médio é da ordem de 256 metros. Apesar dos altos valores de altitude obtidos, estes se concentram apenas no

eixo centro-oeste da mesma, sendo que no geral predominam valores baixos, caracterizando os níveis de baixas a médias altitudes (figura 20).

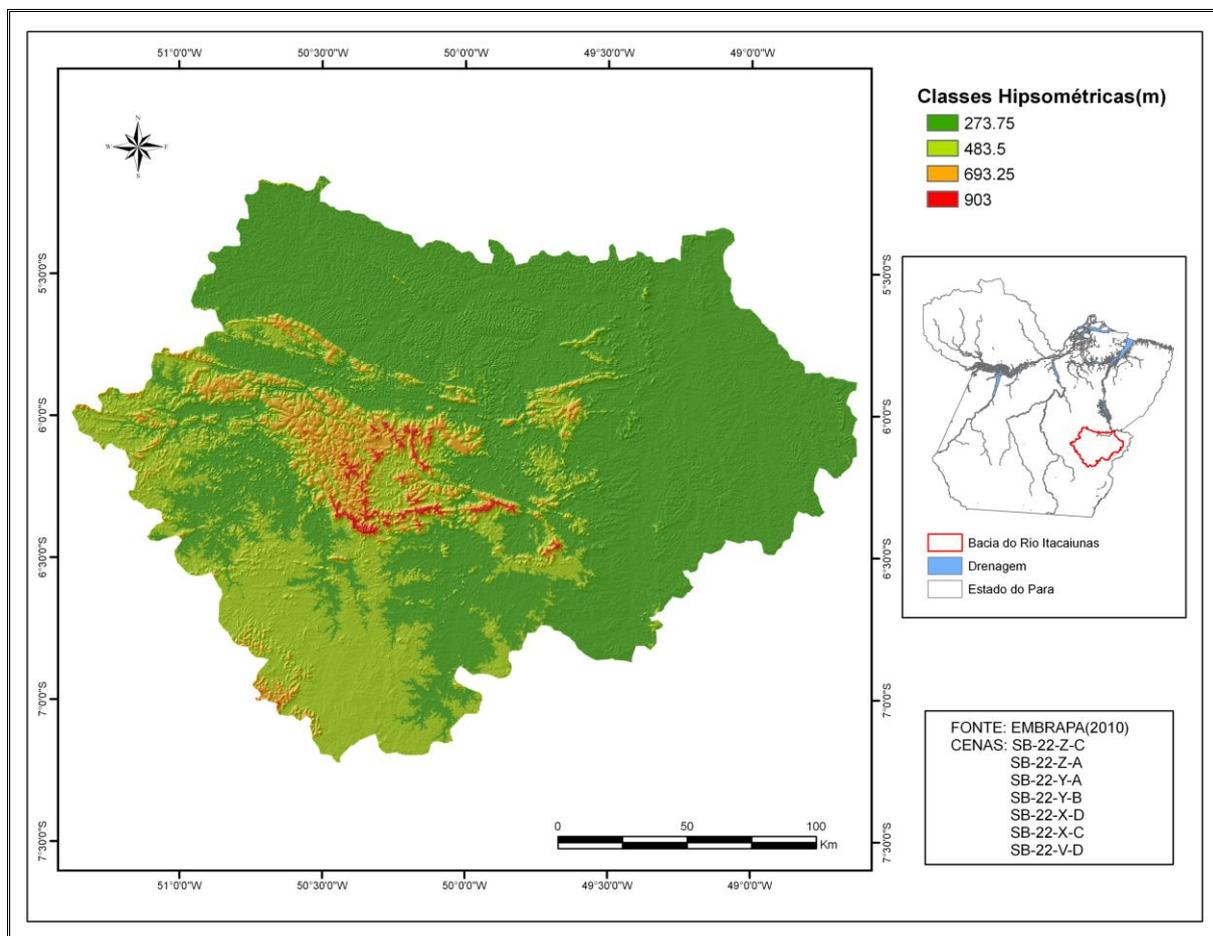


Figura 19: Mapa hipsométrico da bacia do rio Itacaiunas

Se dividirmos para efeito de análise a bacia em três setores: baixo, médio e alto curso, tomando-se como referência o delineamento do rio principal, fica evidente que no baixo curso predominam altitudes baixas que não ultrapassam os 273,75 metros, levando o rio principal e tributários a apresentarem neste setor potencial para o surgimento de planícies de inundação durante a cheia sazonal.

Somente no médio curso é que se registram os maiores níveis de elevação alcançando o valor máximo de 903 metros. Tal fato deve-se, sobretudo a um amplo soergimento de rochas que forma o conjunto de acidentes geográficos conhecido de forma geral como “Serra de Carajás”.

É nesta área que se encontram as anomalias geoquímicas onde foram implantados os primeiros grandes projetos minerários do Estado do Pará, assim como as unidades de conservação Floresta Nacional de Carajás, Área de Proteção

Ambiental do Igarapé Gelado, Reserva Biológica do Tapirapé, Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri e Floresta Nacional Itacaiunas; implementadas conjuntamente dentro de uma estratégia de contenção ao desmatamento na região.

Entretanto, é válido ressaltar que em virtude da exploração mineral realizada na serra é possível que estes níveis de altitude possam não mais representar os valores máximos, já que durante os procedimentos de lavra mineral é feita a retirada do solo, sedimentos estéreis e desmanche do minério, em suma alteram-se os padrões naturais do terreno.

No alto curso há uma redução gradual em relação ao médio curso dos valores de altitude, porém predominam as médias altitudes, e não as baixas como observado no baixo curso da bacia, e elevadas altitudes no médio curso.

Dessa forma as altitudes neste setor não ultrapassam de forma geral os 483,5 metros. Apenas na borda sudoeste, nos limites da bacia, é que se identificam pequenas áreas onde se registram níveis hipsométricos mais elevados, porém de menor representatividade em termos de área de abrangência.

As declividades em graus obtidas para a bacia do rio Itacaiunas variam de 0 a 44,11 graus, com valor médio de 3,64 graus (figura 20).

O comportamento da distribuição das declividades apresenta o mesmo padrão que a distribuição de altitudes na região, isto se deve ao fato das declividades terem sido obtidas indiretamente das altitudes, conforme descrito nos procedimentos metodológicos.

No baixo curso da bacia há predominância de baixas declividades com algumas manchas representando níveis mais íngremes, porém pouco representativos em termos de área geográfica.

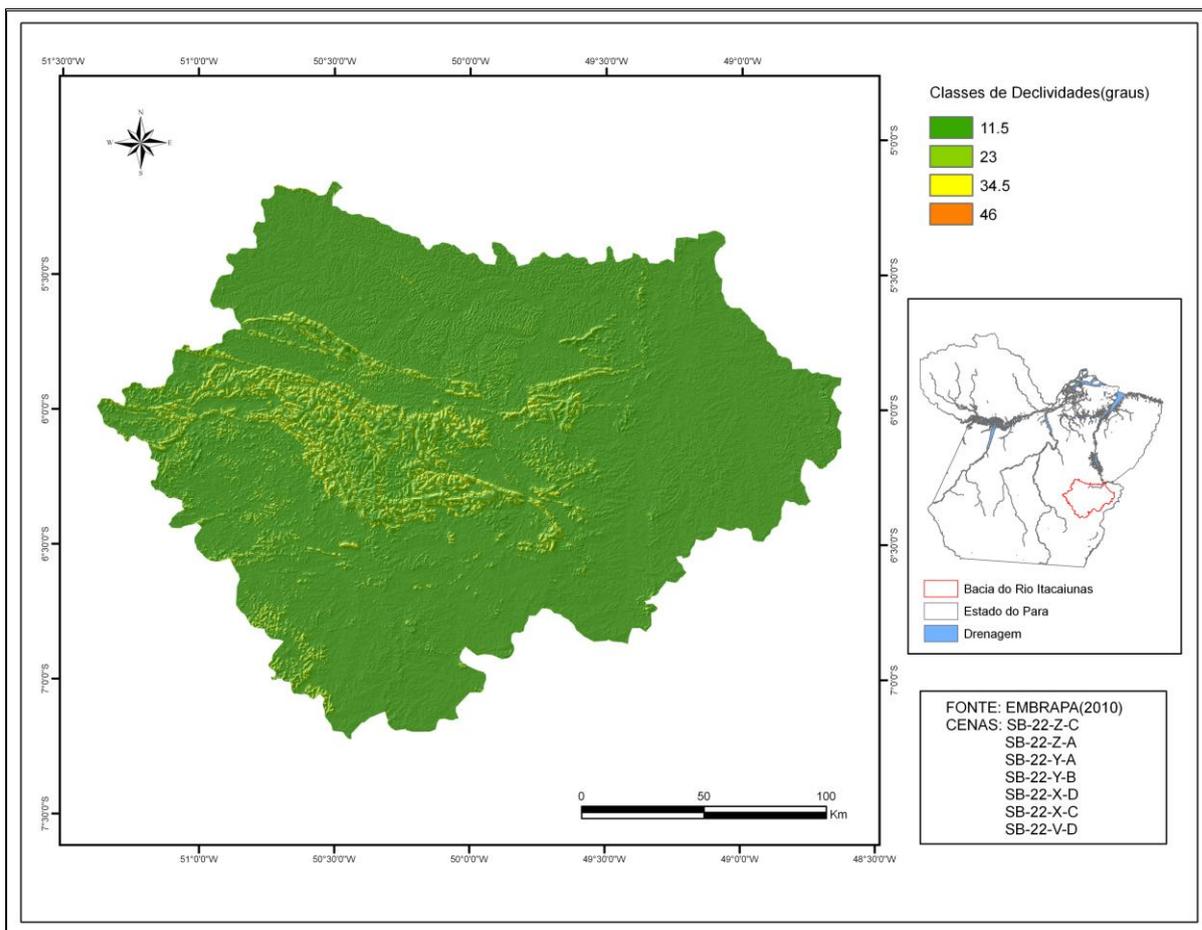


Figura 20: Mapa clinográfico da bacia do rio Itacaiunas

A densidade de drenagem da bacia do rio Itacaiunas é de  $0,16 \text{ km/km}^2$ , valor que se pode considerar baixíssimo, dado que segundo Teodoro et al. (2007) a densidade de drenagem pode variar de  $0,5 \text{ km/km}^2$  para bacias com drenagem pobre a  $3,5 \text{ km/km}^2$  para bacias bem drenadas.

A hierarquização hidrográfica segundo os critérios de Strahler demonstra que a bacia do rio Itacaiunas constitui uma unidade fisiográfica de quinta ordem, conforme apresentado na figura 21. Entretanto, o aspecto mais interessante desta análise refere-se à distribuição geográfica das sub-bacias, considerando sua ordem.

Na margem esquerda do rio principal há o predomínio de sub-bacias menores, em geral de primeira e segunda ordens, com exceção da sub-bacia do rio Tapirapé que constitui uma unidade de quarta ordem (figura 22).

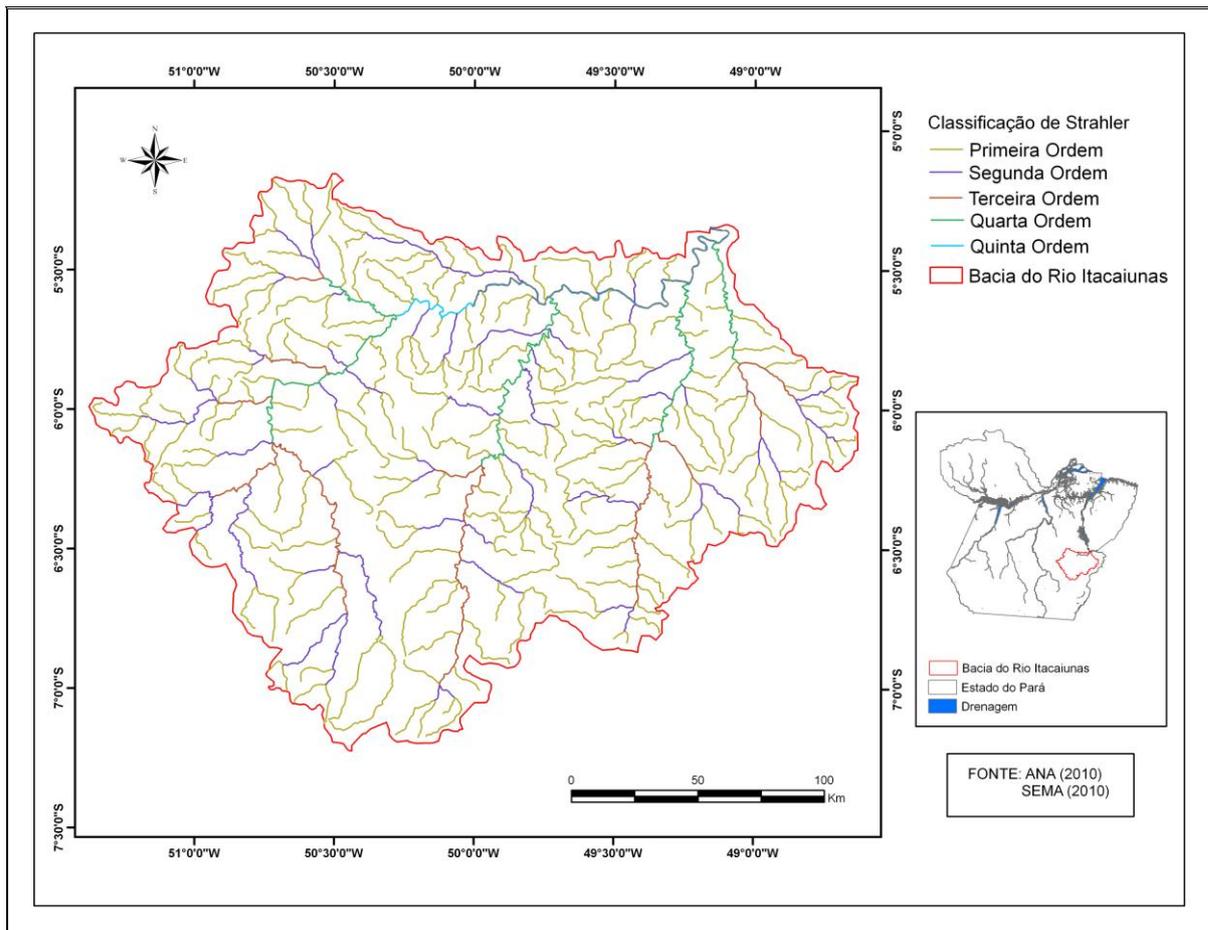


Figura 21: Classificação de Strahler da rede hidrográfica da bacia do rio Itacaiunas

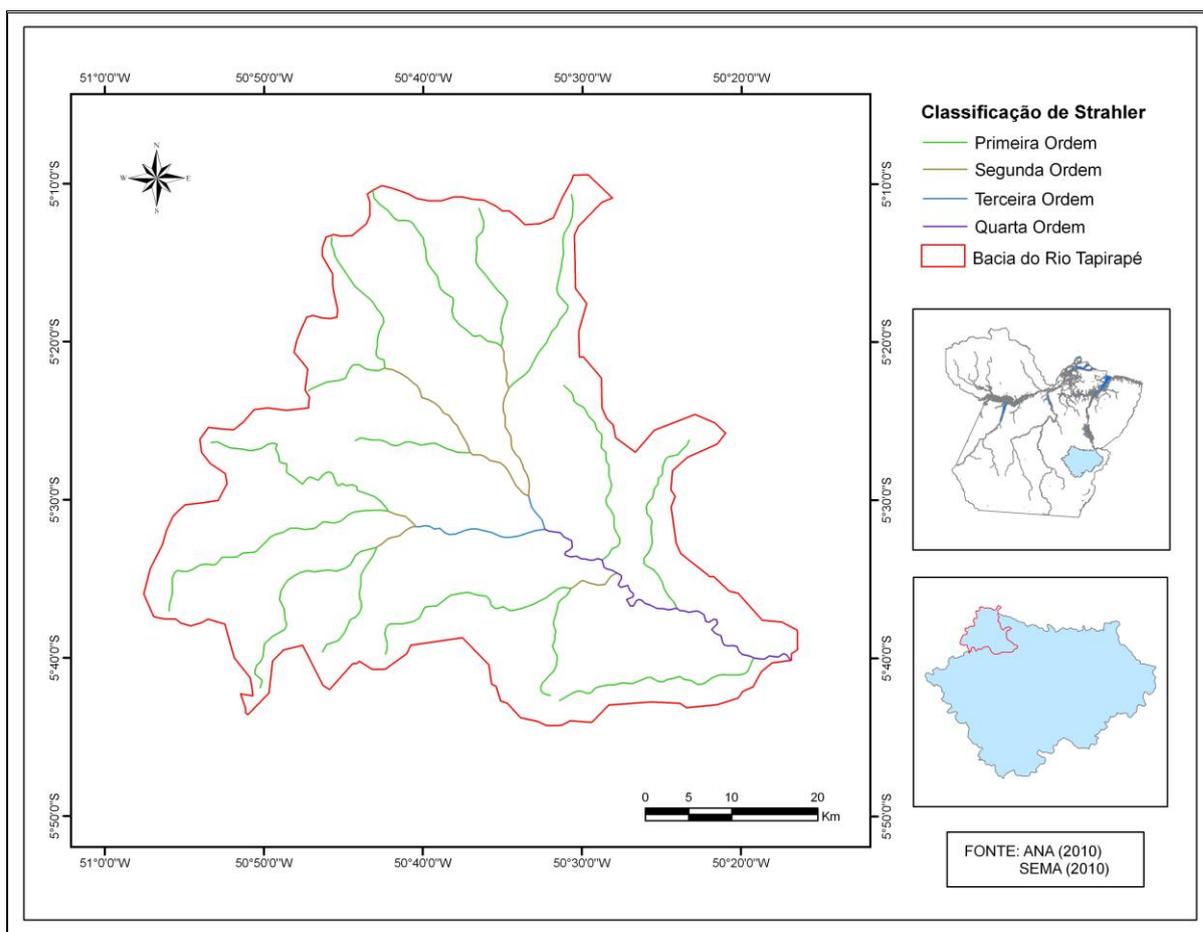


Figura 22: Classificação de Strahler da sub-bacia do rio Tapirapé

Em contrapartida, na margem direita do rio Itacaiunas concentram-se sub-bacias com maior complexidade fluvial, chegando às maiores a constituir unidades fisiográficas de quarta ordem, caso das sub-bacias dos rios Sororó, Parauapebas e Vermelho (figuras 23 a 25).

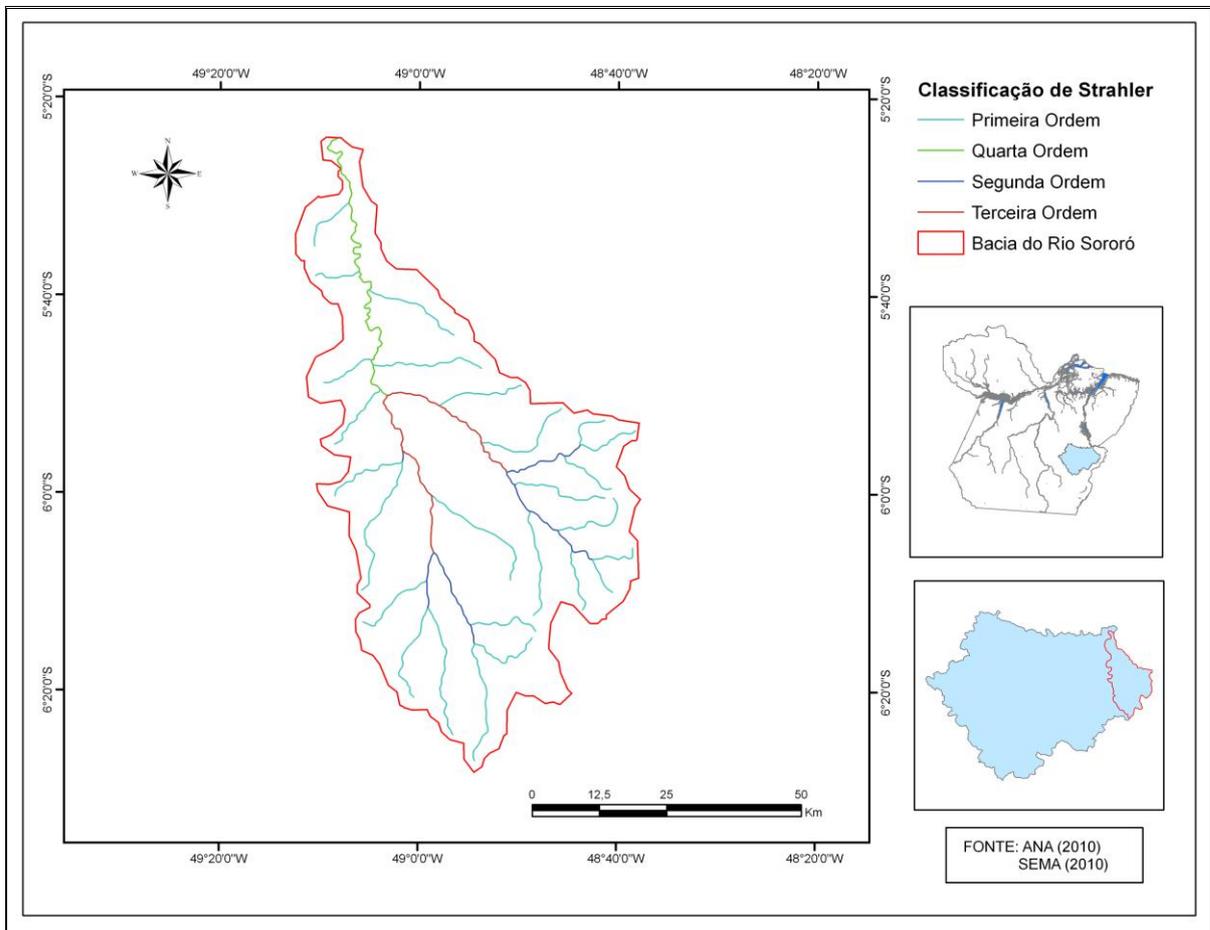


Figura 23: Classificação de Strahler da sub-bacia do rio Sororó

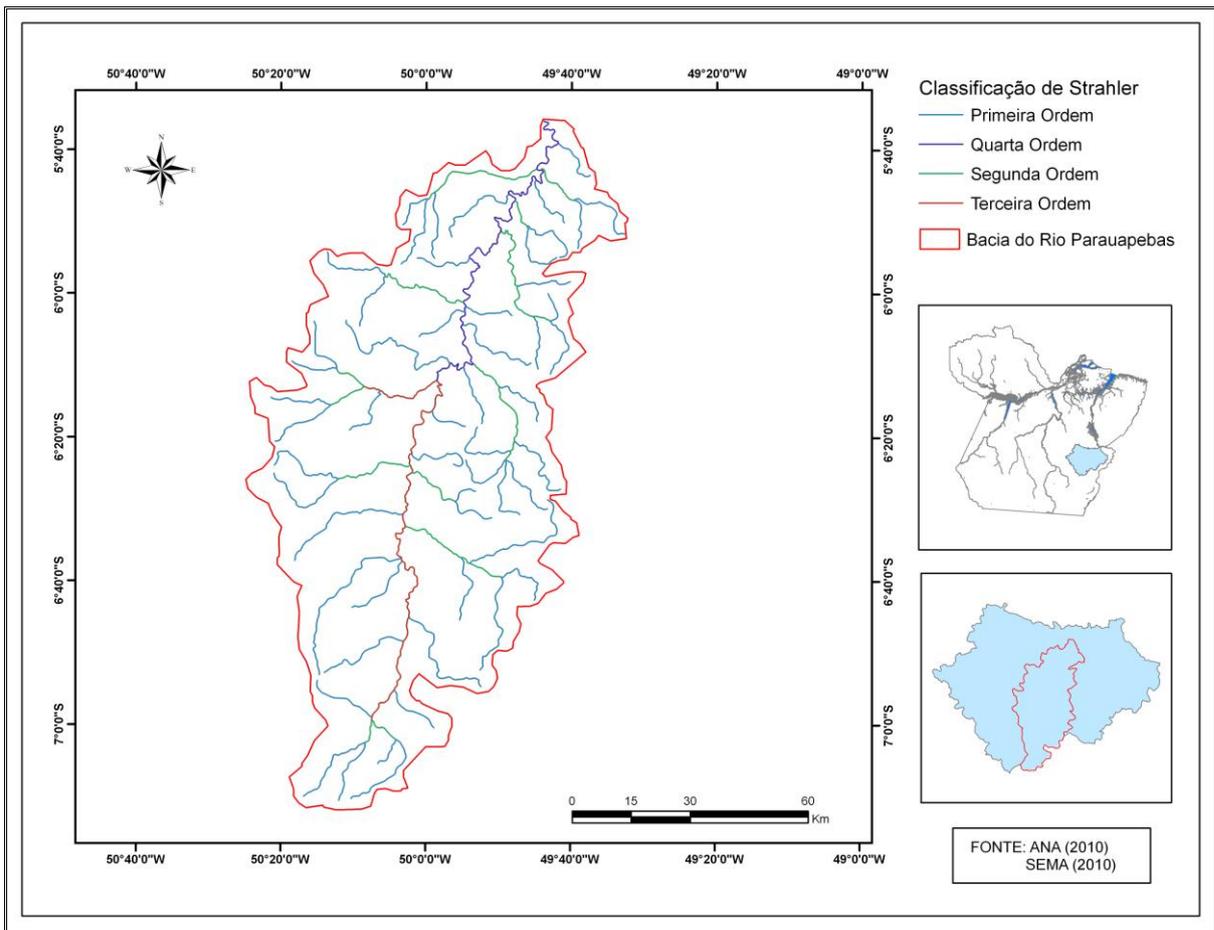


Figura 24: Classificação de Strahler da sub-bacia do rio Parauapebas

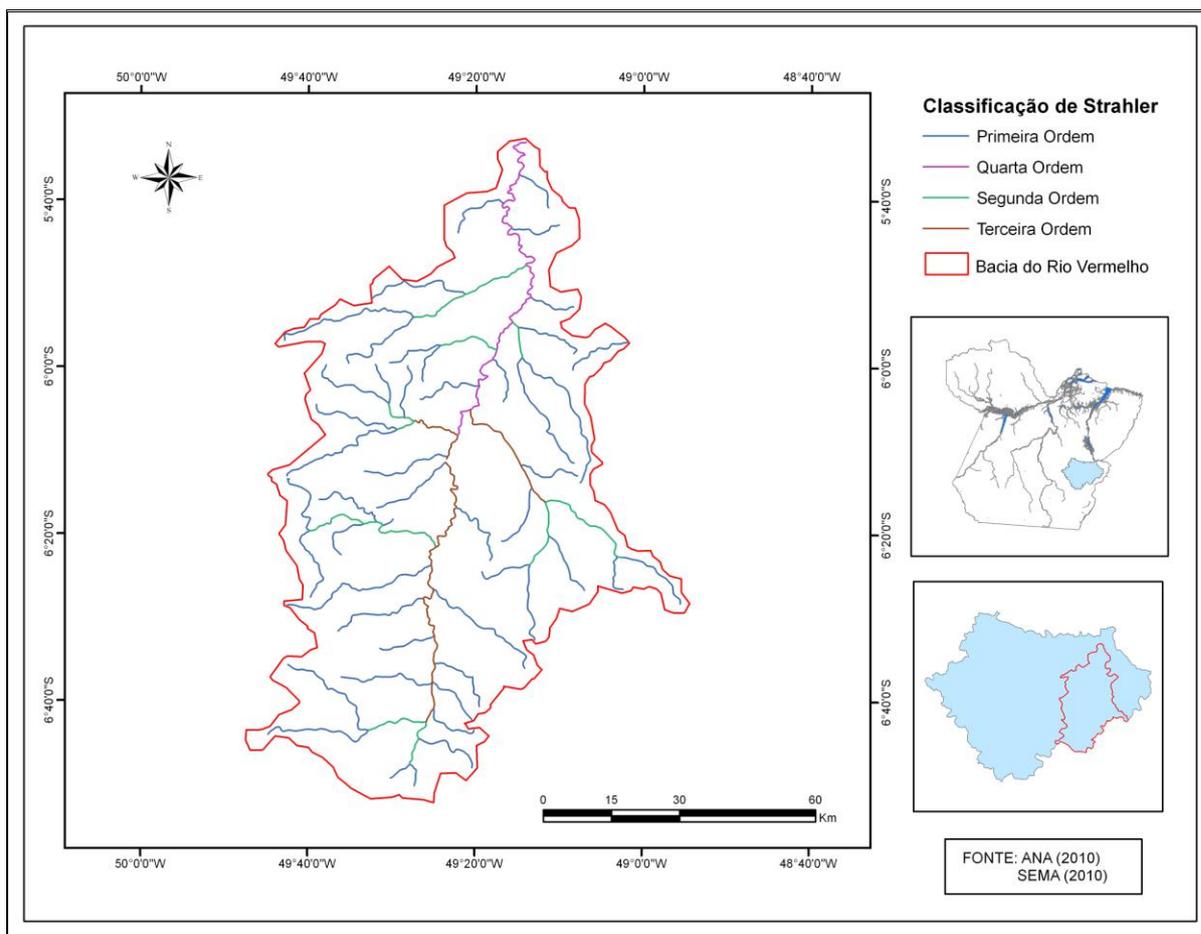


Figura 25: Classificação de Strahler da sub-bacia do rio Vermelho

### 6.1.2 Ponderações sobre os valores obtidos

#### a) Área de drenagem

- A área de drenagem é um dos principais parâmetros determinantes do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica.
- No caso de bacias muito extensas como a do rio Itacaiunas a mesma faixa limite dos valores de precipitações ocorre sob áreas muito diferenciadas na bacia, das cabeceiras a foz, concorrendo para as variações de nível registradas já que inevitavelmente o deflúvio dos tributários é conduzido ao rio principal.
- Entretanto, devido ao fator escala o pulso hidrológico registrado na foz pode levar alguns dias, quando relacionados a chuvas ocorrentes junto às cabeceiras mais distantes.
- Note-se que eventos de precipitações muito intensos em regiões de cabeceiras de grandes bacias podem ser moduladores de eventos de

enchentes bastante destrutivos. Porém, a partir de uma malha de monitoramento hidrológico espacialmente bem distribuída e alocada, estas situações críticas podem ser previstas com dias de antecedência, podendo assim ser tomadas as medidas necessárias para reduzir os impactos e perdas materiais e humanas nestas áreas, conforme demonstrado por Santos (2008b) para a bacia do rio Tocantins.

#### b) Declividade

- Por não possuir níveis clinográficos muito elevados, de forma geral a bacia não apresenta relevos fortes e enérgicos, normalmente associados a uma fragilidade natural a processos erosivos.
- Com efeito, a suscetibilidade a erosão na bacia passa a ser determinada não somente pelo comportamento da declividade, mas sobremaneira as mudanças no uso da terra.
- Apesar de não haver áreas com declive muito acentuado na bacia pôde-se identificar algumas áreas que devem receber maior atenção já que podem constituir fontes potenciais de produção de sedimentos associadas à mudanças extremas no uso da terra.
- Dada à constatação de que no baixo curso da bacia o relevo é bastante plano e os níveis de altitude são bastante baixos há uma atenuação natural à ocorrência de enxurradas e cheias na área. Sendo tais fenômenos quando observados neste setor, diretamente ligados a fatores antrópicos relativos à ocupação indevida do espaço geográfico, tais como a impermeabilização do solo pelo asfaltamento e o entupimento de canais e bueiros nos centros urbanos pelos resíduos sólidos.
- Neste contexto Alcântara e Amorim (2005) ressaltam que na época das chuvas o rio dispõe de mais água e necessita para tanto, de espaço para transportá-la, e se a cidade ocupa esse espaço, o rio o utilizará qualquer forma e invadirá as áreas urbanizadas, logo a questão das cheias nada mais é que a ocupação irregular do espaço.
- Excetua-se neste caso a recorrente enchente sazonal de Marabá que é atribuída ao efeito de barramento hidráulico que o rio Tocantins exerce sobre

o rio Itacaiunas, que não tendo como desaguar no primeiro se expande sobre as áreas marginais, alagando-as.

- No médio curso é que se encontram os maiores níveis de declividade, novamente associados às formações rochosas da “Serra de Carajás”. Na região eventos de precipitação apresentam um maior potencial de produção de escoamento superficial rapidamente, já que a velocidade de escoamento da água aumenta substancialmente em função do terreno mais acidentado, obtendo-se uma tendência a respostas em termos de vazão nos rios da região em curtos intervalos de tempo.
- Porém, em virtude da região possuir um elevado nível de cobertura vegetal associado ao mosaico de unidades de conservação criado na área, eventuais prejuízos oriundos de enxurradas e enchentes acabam sendo atenuados pelo efeito tamponador da vegetação neste processo. Observações de mesma ordem foram realizadas por Cardoso et al. (2006a) em análise morfométrica realizada na bacia do rio Debossan (RJ), corroborando com as conclusões apresentadas. O baixo grau de ocupação humana na área também concorre para este panorama.
- No alto curso da bacia, por sua vez, há uma redução gradativa dos níveis de declividade predominando níveis baixos, incorrendo assim como no baixo curso, em um baixo potencial para a ocorrência de enxurradas e enchentes, bem como baixo potencial natural de produção de sedimentos. Da mesma forma que evidenciado em relação às altitudes, maiores valores de declividade ocorrem em manchas presentes na borda sudoeste da bacia, constituindo os divisores topográficos.

#### c) Densidade de drenagem

- Algumas das hipóteses que poderiam explicar o baixo valor obtido deste parâmetro estão relacionadas ao clima e geologia regionais. O regime pluviométrico do sudeste paraense possui características diferenciadas das outras regiões do estado apresentando em geral menores volumes de precipitação anual com período seco bem definido, incorrendo em menor disponibilidade hídrica nos sistemas naturais e limitando, portanto a

transformação das chuvas em deflúvio o que gera por sua vez condições menos propícias ao surgimento de canais de drenagem perenes.

- Outro fator é a geologia regional formada predominantemente por rochas cristalinas. Devido ao fato dos aquíferos inseridos em formações cristalinas apresentarem transmissividade em geral muito reduzidas, se comparadas a aquíferos sedimentares, ficando limitadas somente às áreas onde há fraturas nas rochas, o fluxo de base que mantém a perenidade dos sistemas hídricos acaba sendo comprometido o que produz o desaparecimento de grande parte da malha hidrográfica durante a seca, isto é, nestas condições geológicas a sazonalidade passa a exercer um efeito maior sobre a perenidade da drenagem levando-a a apresentar muitos canais intermitentes que não possuem vazão durante a estiagem.
- Entretanto, a explicação mais plausível para o resultado obtido é que a escolha da base vetorial de drenagem para a aferição deste parâmetro não constituiu a melhor alternativa. Ao que parece mesmo a bacia apresentando uma área substancial, o que poderia minimizar o efeito da escala da base hidrográfica vetorial utilizada (1: 250.000), não foi suficiente para produzir boas aproximações da realidade.
- Desta forma, é bastante factível que os resultados de densidade de drenagem tenham sido subestimados, mesmo se considerarmos que as condições naturais da bacia já tendenciarão a produção de um baixo valor, sobretudo, se considerar-se que Porto, Andrade e Costa (2004) obtiveram o valor de 0,39 para a densidade de drenagem de uma bacia de 39.000 km<sup>2</sup>, no estado do Ceará, onde o clima é mais árido e não favorece a perenidade dos corpos hídricos.
- Uma alternativa que poderia atenuar esta problemática seria a produção de uma nova base vetorial de drenagem a partir de um modelo digital de elevação, como a base SRTM, porém, ao invés de obter um valor subestimado haveria propensão a superestimativas do parâmetro, uma vez que bases geradas dessa forma normalmente levam ao surgimento de trechos de rios em locais onde só há ocorrência de paleocanais que não constituem drenagens verdadeiras, mas sim marcas deixadas por canais correspondentes à drenagens antigas parcialmente dissecadas ou modificadas, de acordo com Nunes et al. (1994).

- Logo, o ideal é que seja realizado um trabalho futuro de extração da malha hidrográfica do estado a partir, por exemplo, do uso de produtos de sensoriamento remoto de alta resolução como imagens SPOT, que poderiam levar a consolidação de uma base mais confiável e gerar resultados mais coerentes.

#### d) Ordem da bacia

- Dos valores de ordem de sub-bacias obtidos à margem esquerda do rio Itacaiunas, supõem-se que precipitações nesta região tendem a promover uma rápido aporte do deflúvio da malha hidrográfica ao rio principal, haja visto não haver drenagens muito extensas a serem percorridas até a confluência com o rio Itacaiunas.
- No caso das sub-bacias localizadas à margem direita, por sua vez, por possuírem maiores áreas de drenagem, além das formas alongadas evidenciadas, o fenômeno de transformação de chuva em vazão nas sub-bacias e seu posterior deflúvio no rio Itacaiunas leva mais tempo, em outras palavras, há um maior tempo de detenção das águas levando a um atraso na manifestação do pulso hidrológico no rio principal. Fato este que é determinante nas ações preventivas relativas aos fenômenos hidrológicos extremos, tais como enchentes e enxurradas.

## 6.2 REGIONALIZAÇÃO FÍSICA DAS SUB-BACIAS PRINCIPAIS DO RIO ITACAIUNAS

A regionalização física aplicada às principais sub-bacias do rio Itacaiunas revelou haver comportamento similar na predominância de classes de altitude e declividade entre elas.

O método de quartiz permitiu observar a distribuição de frequências em termos de *pixels* de cada sub-bacia nas quatro categorias avaliadas em cada parâmetro.

As tabelas 09 a 12 representam as distribuições de frequência entre as classes hipsométricas de cada sub-bacia.

Tabela 09: Distribuição de frequência de altitudes da sub-bacia do rio Vermelho

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
799829	273.75	BAIXAS ALTITUDES	93.04
53218	483.5	MÉDIAS ALTITUDES	6.19
6156	693.25	ELEVADAS ALTITUDES	0.72
470	903	ALTITUDE MUITO ELEVADAS	0.05

A sub-bacia do rio Vermelho apresenta mais de 93% dos valores de cota distribuídos no intervalo que vai de 64 a 273,75 metros, possuindo dessa forma uma absoluta predominância de altitudes baixas (figura 26). Em segundo lugar na distribuição de frequência está à classe de médias altitudes com 6,19% da distribuição. As demais classes apresentaram percentuais menores que 1% cada.

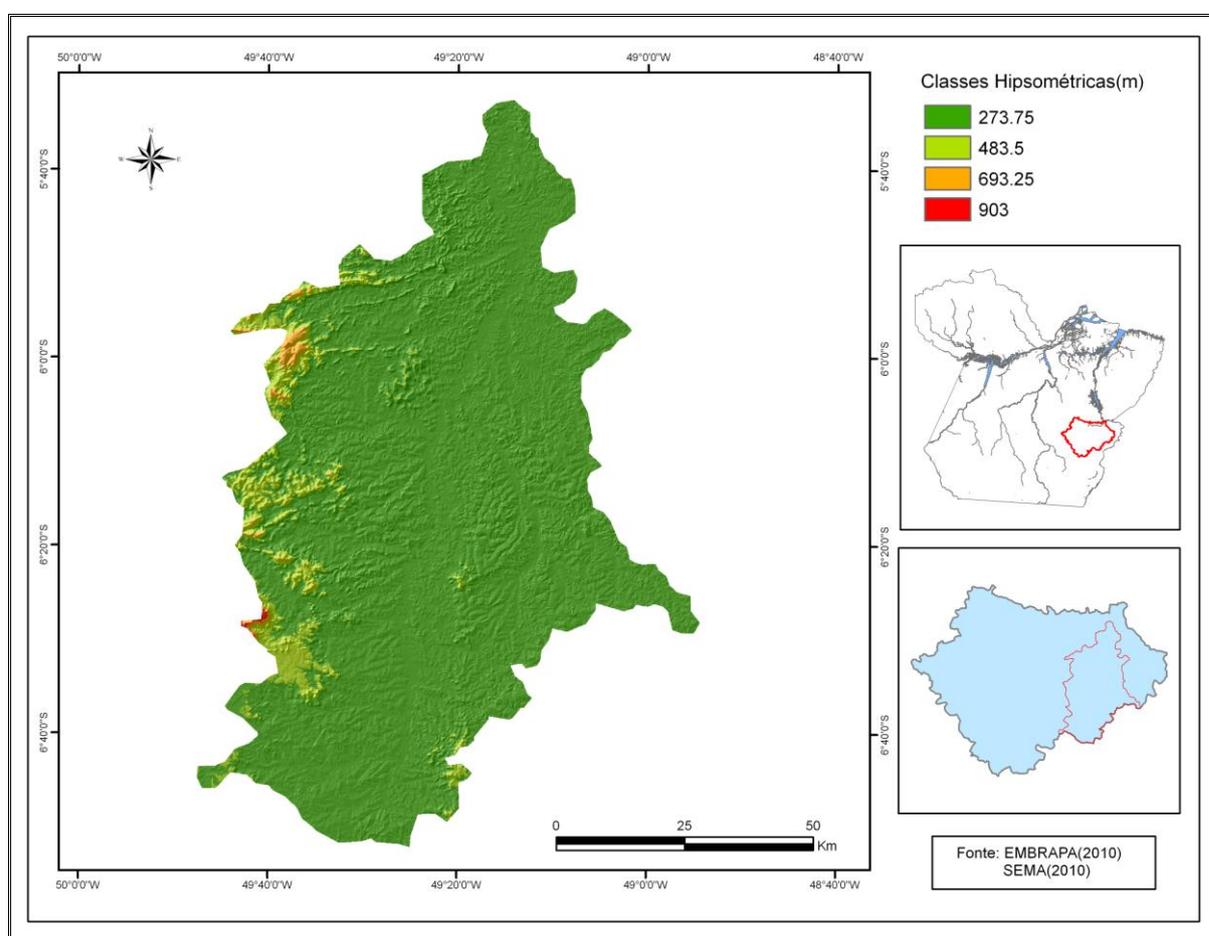


Figura 26: Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Vermelho

Tabela 10: Distribuição de frequência de altitudes da sub-bacia do rio Parauapebas

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
656731	273.75	BAIXAS ALTITUDES	58.59
351648	483.5	MÉDIAS ALTITUDES	31.37
89803	693.25	ELEVADAS ALTITUDES	8.01
22670	903	ALTITUDES MUITO ELEVADAS	2.02

A sub-bacia do rio Parauapebas apresenta uma distribuição de frequência mais equilibrada, porém ainda assim há predominância de altitudes classificadas como baixas na unidade, totalizando 58,59% da área da sub-bacia (figura 27). As médias altitudes estão melhor representadas aqui em comparação a sub-bacia do rio Vermelho, já que somam 31,37%. Em seguida está à classe “elevadas altitudes” com 8,01%, que já representa um aumento de mais de 800% em comparação a distribuição de frequência da classe na bacia citada anteriormente; e a classe “altitudes muito elevadas” com pouco mais de 2%.

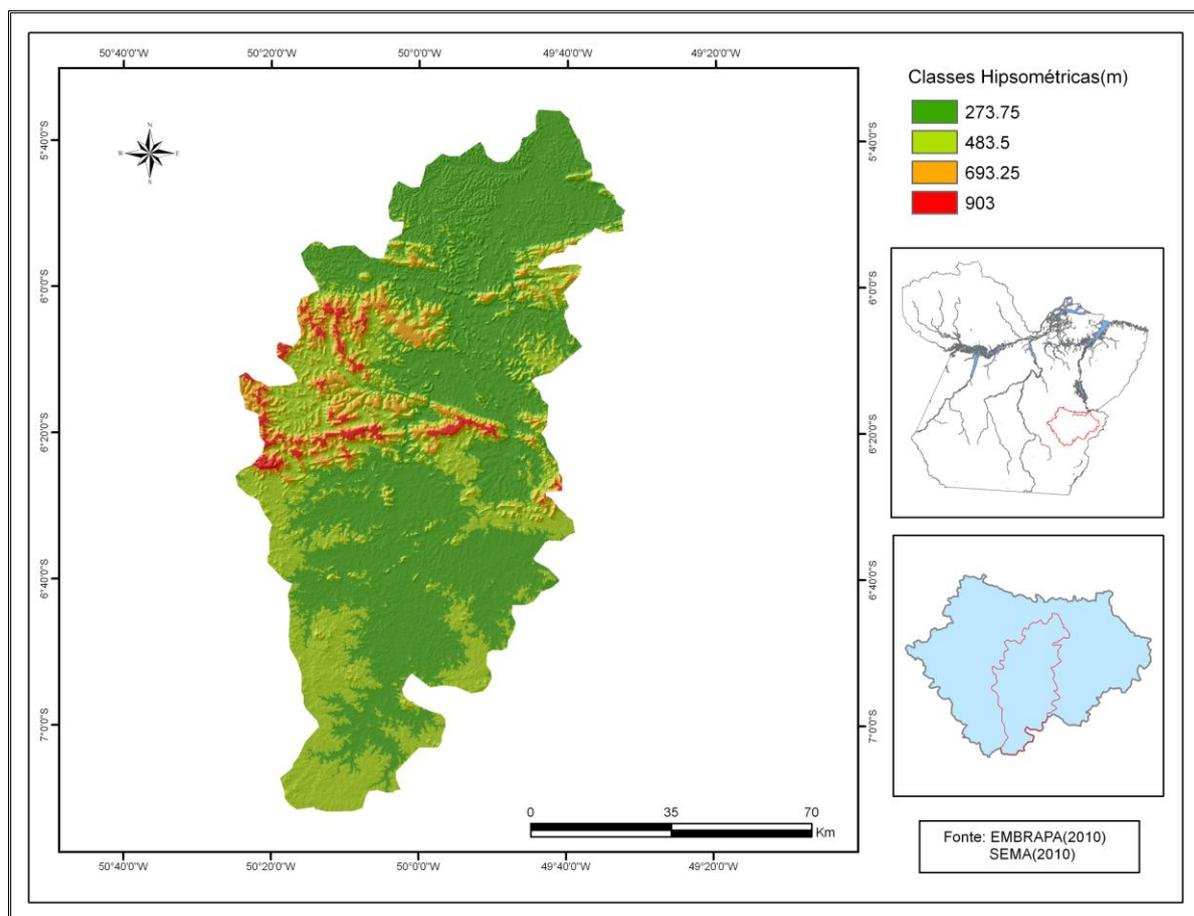


Figura 27: Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Parauapebas

Tabela 11: Distribuição de frequência de altitudes da sub-bacia do rio Tapirapé

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
298867	273.75	BAIXAS ALTITUDES	95.38
12160	483.5	MÉDIAS ALTITUDES	3.88
2310	693.25	ELEVADAS ALTITUDES	0.74

Apenas três das quatro categorias analisadas para efeito de estudo estão representadas nos resultados da distribuição de frequência de altitudes da sub-bacia do rio Tapirapé (figura 28), o que significa dizer que não foram identificados pixels na base raster de altitudes com cotas no intervalo que vai de 693,25 a 903 metros, classificados como “altitudes muito elevadas”.

Novamente há uma absoluta predominância de altitudes na classe definida como “baixas altitudes”, totalizando neste caso 95,38%. As médias altitudes perfazem 3,88% e as “elevadas altitudes”, rarefeitos 0,74% do total.

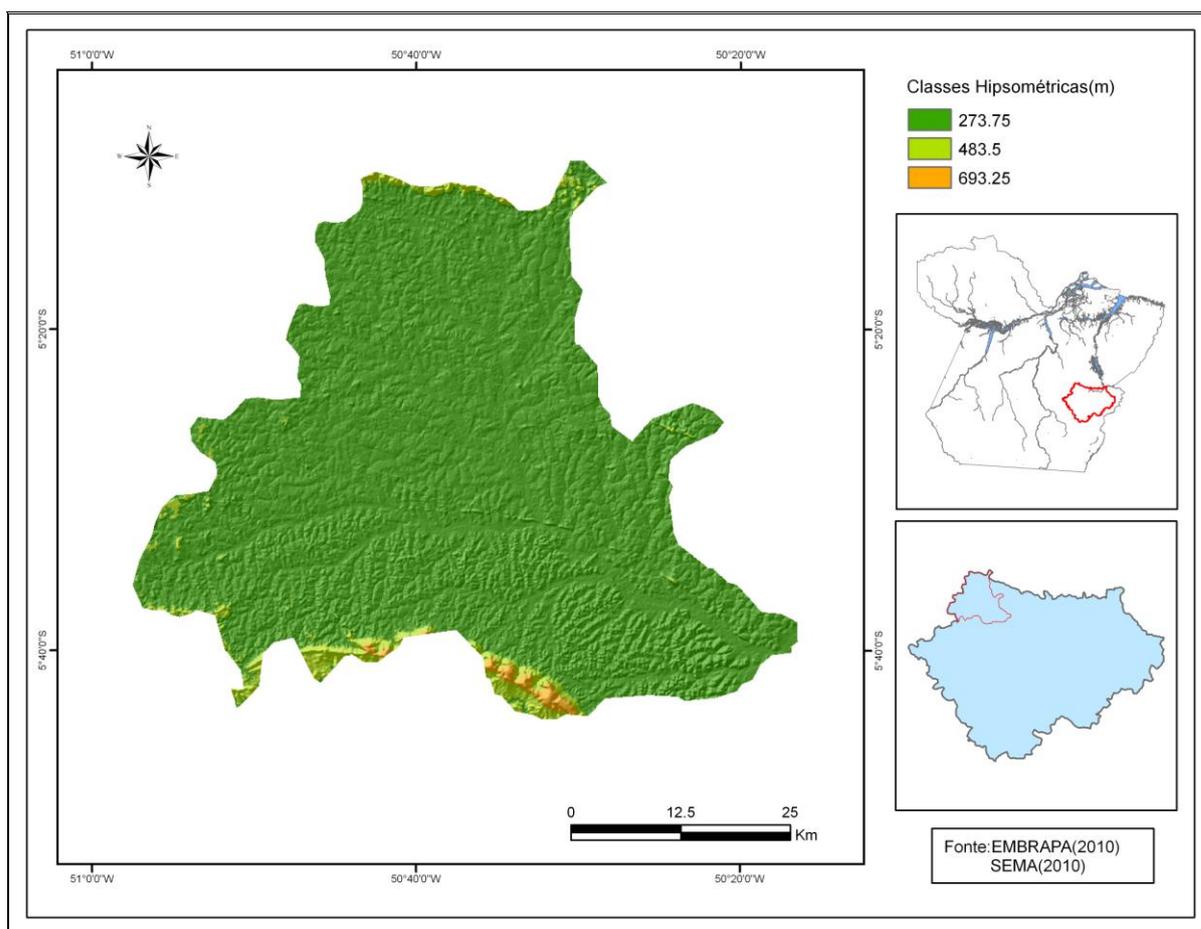


Figura 28: Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Tapirapé

Tabela 12: Distribuição de frequência de altitudes da sub-bacia do rio Sororó

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
434548	273.75	BAIXAS ALTITUDES	99.92
333	483.5	MÉDIAS ALTITUDES	0.08

A sub-bacia do rio Sororó apresenta uma distribuição de frequência de altitudes ainda mais limitada, composta de apenas duas das quatro categorias analisadas (figura 29). Da mesma forma que no caso da distribuição relativa à sub-bacia do rio Tapirapé as classes não representadas, “elevadas altitudes” e “altitudes muito elevadas”, não apresentaram *pixels* com valores de cota nos intervalos definidos para cada categoria.

Há nesta sub-bacia um absoluto predomínio de altitudes baixas variando entre 64 e 273,75 metros, somando 99, 92%. Já a outra classe presente correspondente a “médias altitudes” totaliza apenas 0,08%, sendo considerados irrisórios no contexto geral da sub-bacia.

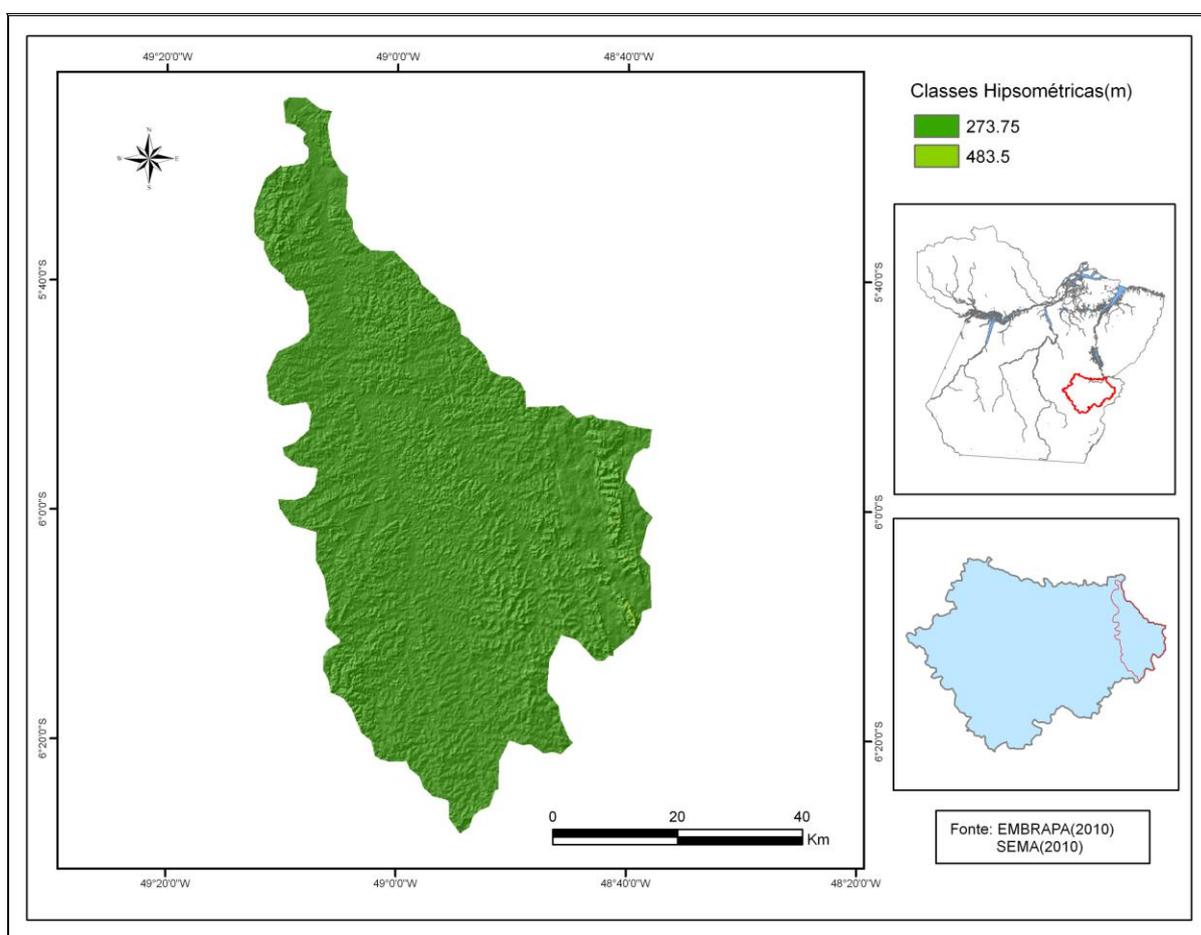


Figura 29: Mapa hipsométrico da sub-bacia do rio Sororó

Sumarizando os resultados apresentados pela distribuição de frequências de altitude das quatro sub-bacias evidencia-se uma similaridade no padrão de distribuição de todas. As classes “baixas altitudes” e “médias altitudes” são em geral aquelas que apresentam os maiores percentuais nas distribuições, sempre com predominância da primeira em todas as sub-bacias.

Já as classes “elevadas altitudes” e “altitudes muito elevadas” possuem baixa, ou nenhuma, representatividade no contexto de todas as unidades estudadas.

Desta forma, confirma-se a hipótese nula, no que se refere à distribuição de altitudes nas sub-bacias, que podem ser consideradas então como unidades homogêneas, dado o padrão similar evidenciado.

Os resultados relativos à regionalização das sub-bacias principais da bacia do rio Itacaiunas quanto à distribuição de frequência de declividades em classes estão representados nas tabelas 13 a 16.

A fim de promover uma melhor observação dos resultados foram também confeccionados os mapas clinográficos das quatro sub-bacias, apresentados nas figuras 30 a 33.

Diferentemente da regionalização das classes de altitude, a análise quanto à declividade foi feita tomando três casas decimais, em decorrência de algumas classes apresentarem valores percentuais ainda menores, que não seriam considerados caso se adotasse os mesmos critérios da análise anterior.

Tabela 13: Distribuição de frequência de declividades da sub-bacia do rio Vermelho

<b>Nº PIXELS</b>	<b>BLOCOS</b>	<b>CLASSES</b>	<b>%</b>
831475	11.5	BAIXAS DECLIVIDADES	96.720
25370	23	MÉDIAS DECLIVIDADES	2.951
2806	34.5	ELEVADAS DECLIVIDADES	0.326
22	46	DECLIVIDADES MUITO ELEVADAS	0.003

A sub-bacia do rio Vermelho possui as quatro classes de declividade representadas em sua área de drenagem, com diferentes percentuais de distribuição (figura 30). A classe “baixas declividades” se destaca na bacia possuindo 96,720% da unidade estudada. Em sequência vêm às classes “médias declividades”, “elevadas declividades” e “declividades muito elevadas” com 2,951; 0,326 e 0,003% respectivamente; constituindo valores bastante incipientes não se equiparando a primeira classe, sendo esta a predominante.

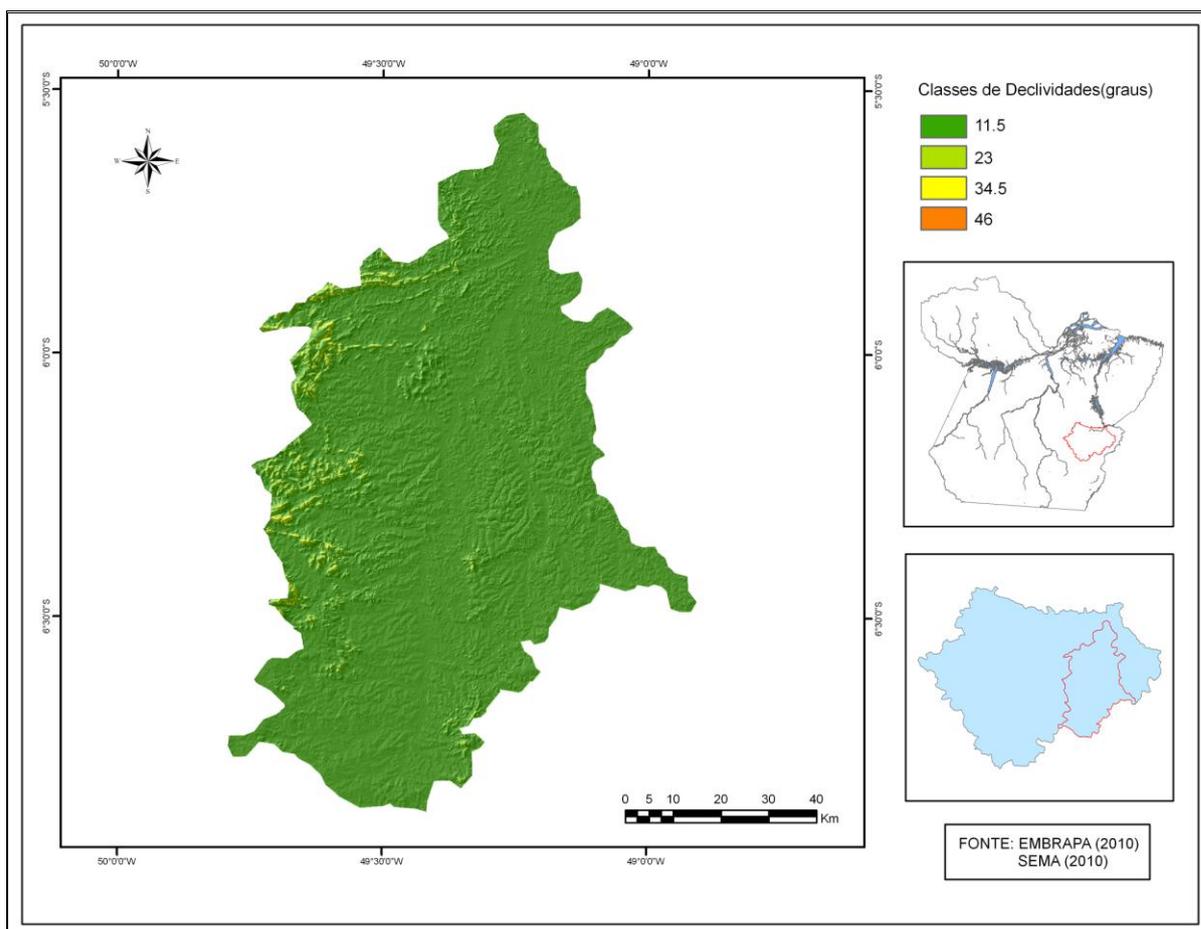


Figura 30: Mapa clinográfico da sub-bacia do rio Vermelho

Tabela 14: Distribuição de frequência de declividades da sub-bacia do rio Parauapebas

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
979322	11.5	BAIXAS DECLIVIDADES	87.373
116196	23	MÉDIAS DECLIVIDADES	10.367
24538	34.5	ELEVADAS DECLIVIDADES	2.189
796	46	DECLIVIDADES MUITO ELEVADAS	0.071

A sub-bacia do rio Parauapebas por sua vez mantém o mesmo padrão da sub-bacia anterior com diferença apenas nos percentuais atribuídos a cada classe (figura 31).

Há novamente predominância da classe “baixas declividades”, totalizando 87,373% do total da sub-bacia, seguida pela classe “médias declividades” com 10,367%, possuindo esta última maior representatividade nesta unidade fisiográfica que na anterior.

As classes “elevadas declividades” e “declividades muito elevadas” possuem 2,189 e 0,071%, do total de declividades da bacia respectivamente, constituindo classes menos representativas.

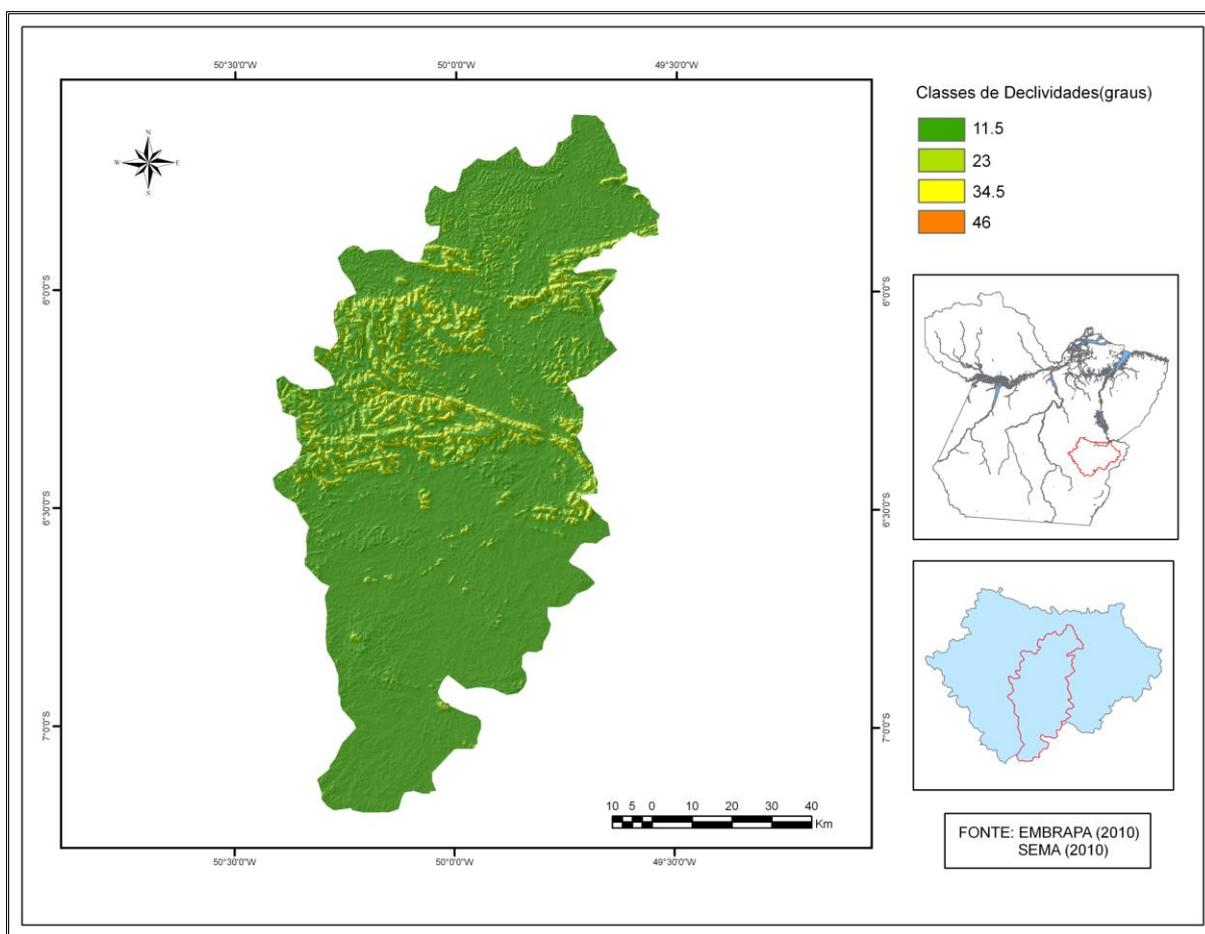


Figura 31: Mapa clinográfico da sub-bacia do rio Parauapebas

Tabela 15: Distribuição de frequência de declividades da sub-bacia do rio Tapirapé

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
307071	11.5	BAIXAS DECLIVIDADES	98.000
5360	23	MÉDIAS DECLIVIDADES	1.711
903	34.5	ELEVADAS DECLIVIDADES	0.288
3	46	DECLIVIDADES MUITO ELEVADAS	0.001

A classe “baixas declividades” possui predominância absoluta no contexto da sub-bacia do rio Tapirapé com 98% do número de *pixels* da sub-bacia (figura 32). A segunda classe de maior representatividade no contexto da bacia é a “médias declividades” com 1,711%, valor ainda muito incipiente em termos percentuais. Já as classes “elevadas declividades” e “declividades muito elevadas” possuem respectivamente 0,288 e 0,001% do total, constituindo analogamente às sub-bacias anteriores classes pouco representativas na unidade fisiográfica.

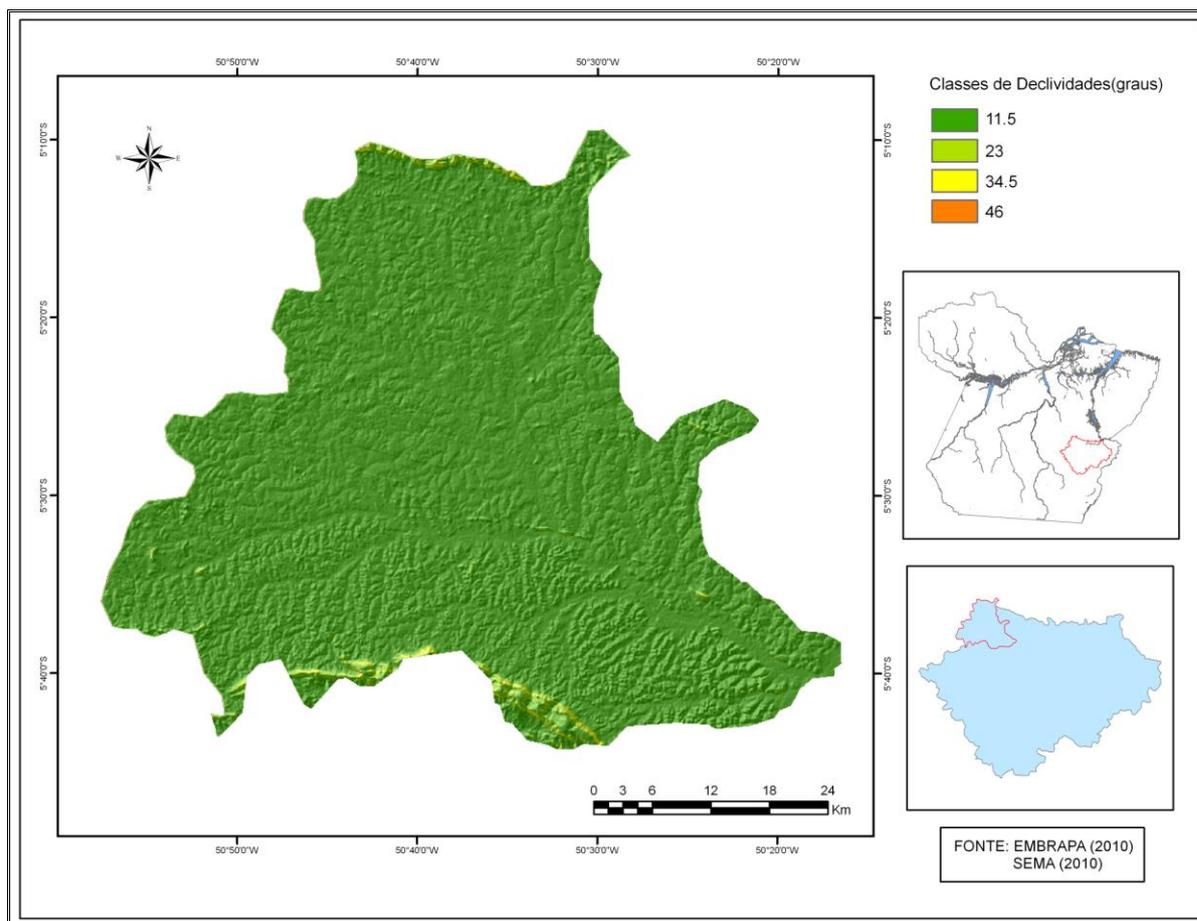


Figura 32: Mapa clinográfico da sub-bacia do rio Tapirapé

Tabela 16: Distribuição de frequência de declividades da sub-bacia do rio Sororó

Nº PIXELS	BLOCO	CLASSES	%
434370	11.5	BAIXAS DECLIVIDADES	99.882
511	23	MÉDIAS DECLIVIDADES	0.118

Quanto à sub-bacia do rio Sororó esta possui apenas duas das classes definidas na análise representadas, em virtude de não haver *pixels* na base raster de declividades da sub-bacia com valores presentes nos intervalos definidos para as classes “elevadas declividades” e “declividades muito elevadas”, respectivamente 34,5 e 46 graus (figura 33).

A classe “baixas declividades” predomina novamente com 99,882% do total de *pixels* da sub-bacia, seguida pela classe média declividade com 0,118%, valor irrisório em termos percentuais.

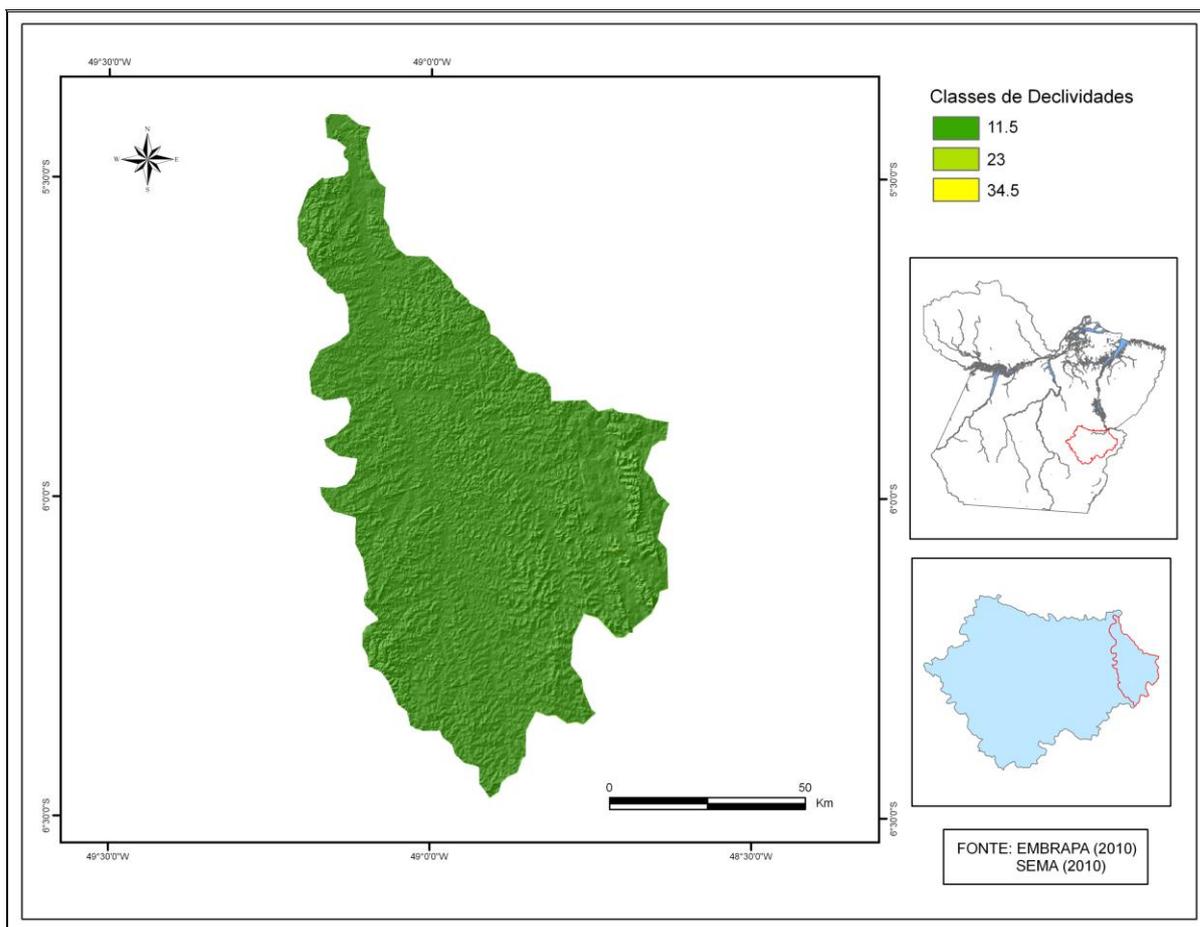


Figura 33: Mapa clinográfico da sub-bacia do rio Sororó

Desta forma a partir de um olhar sistêmico sobre os resultados de cada sub-bacia quanto à distribuição de frequência de declividades constata-se que todas seguem um padrão, onde as classes “baixas declividades” e “médias declividades” possuem maior representatividade que as classes “elevadas declividades” e “declividades muito elevadas”. Além disto, em todas as unidades fisiográficas há predomínio absoluto como classe de maior representatividade da classe “baixa declividade”.

Portanto, conclui-se que também em termos de distribuição de frequência de declividades as sub-bacias estudadas constituem unidades fisiográficas homogêneas, novamente confirmando a hipótese nula de homogeneidade da bacia principal.

### 6.3 REGIONALIZAÇÃO CLIMÁTICA DAS SUB-BACIAS DO RIO ITACAIUNAS

O marco inicial da regionalização climática das sub-bacias do rio Itacaiunas, que correspondeu à definição dos polígonos de Thiessen de cada uma das estações pluviométricas previamente selecionadas para o estudo, reportou a configuração apresentada na figura 34.

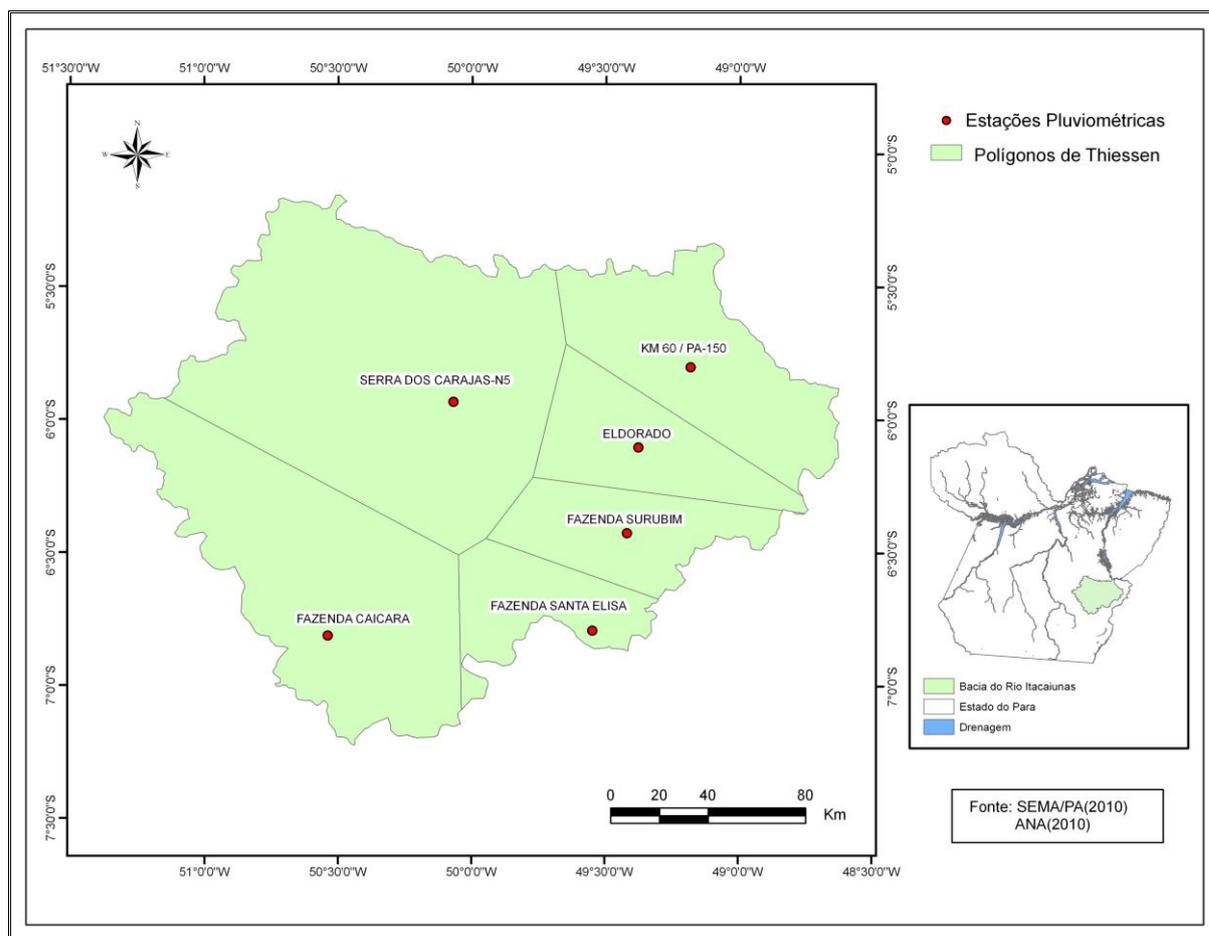


Figura 34: Polígonos de Thiessen da bacia do rio Itacaiunas

Observando a disposição espacial das estações e a área de influência de cada uma (polígono) percebe-se que por haver apenas o posto “Serra dos Carajás N5” registrando os eventos de precipitação ocorrentes ao norte (médio curso da bacia) este passa a constituir a única fonte de dados sobre este setor, levando a geração de um polígono cuja área é visualmente muito maior que a dos demais.

O baixo nível de informações sobre o clima nesta região da bacia pode ser justificado pela constatação de que há predomínio de sub-bacias de menor ordem e complexidade à margem esquerda do rio Itacaiunas, hipoteticamente com menor

grau de importância para o contexto hidrológico da bacia quando considerada integralmente, fato que não enseja o adensamento da rede de monitoramento com a instalação de novos postos de observação na área.

Decorre disto, que as precipitações pontuais observadas no posto são extrapoladas pelo método do Polígono de Thiessen para uma área bastante significativa. Por outro lado, por se tratar de uma área relativamente extensa, eventos de precipitações às adjacências, fora da localização exata da estação, acabam não sendo registrados e, portanto, não sendo contabilizados no cálculo dos totais anuais de precipitação.

Entretanto, o cálculo das precipitações anuais das sub-bacias principais não sofre influência determinante desta estação, com exceção da sub-bacia do rio Tapirapé, mas sim do conjunto, em função das sub-bacias mais representativas (ordem quatro) estarem localizadas exatamente na região oposta da bacia do rio Itacaiunas (margem direita). Fato que em última análise garante a confiabilidade dos resultados obtidos pelo método.

Sendo assim, devido às outras cinco estações estarem dispostas no eixo que vai do leste ao sudoeste da bacia há uma cobertura mais eficiente dos eventos de precipitação na região (margem direita) levando a uma maior confiabilidade dos valores calculados para o método nas sub-bacias localizadas neste setor, já que sua qualidade invariavelmente depende de forma direta do número de estações utilizadas para a construção dos Polígonos, isto é, da discretização dos fenômenos de precipitação.

A partir da configuração dos polígonos de Thiessen da bacia, obtiveram-se as respectivas áreas de influência das estações em cada sub-bacia analisada (figura 35).

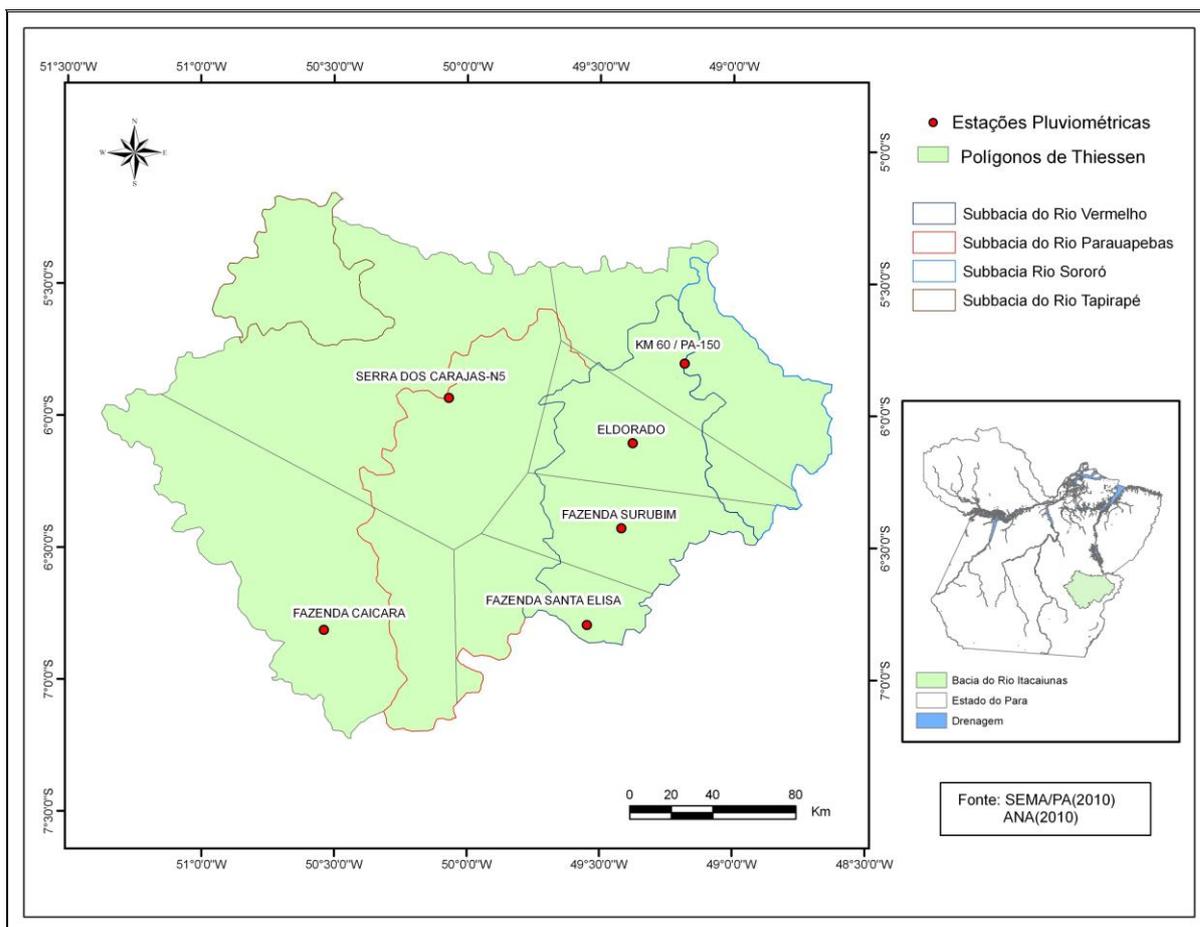


Figura 35: Polígonos de Thiessen e sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas

A sub-bacia do rio Parauapebas possui influência dos polígonos correspondentes às estações Eldorado, Fazenda Caiçara, Fazenda Santa Elisa, Fazenda Surubim, KM 60 e Serra dos Carajás N5.

A tabela 17 onde estão representadas as áreas de cada polígono nos limites da sub-bacia demonstra que a estação “Serra dos Carajás N5” é aquela que exerce maior influência sobre a precipitação da sub-bacia, com área do polígono correspondente igual a 4464 Km<sup>2</sup>; seguido por “Fazenda Caiçara” com 2369 Km<sup>2</sup> e Fazenda Santa Elisa com 1640 Km<sup>2</sup>. As estações Eldorado, Fazenda Surubim e Km 60 possuem menor representatividade no contexto da configuração espacial dos polígonos na sub-bacia totalizando áreas de 447, 580 e 22 Km<sup>2</sup>, respectivamente.

Tabela 17: Área dos Polígonos de Thiessen na sub-bacia do rio Parauapebas

<b>ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>
ELDORADO	447
FAZ. CAIÇARA	2369
FAZ. SANTA ELISA	1640
FAZ. SURUBIM	580
KM 60	22
SERRA DOS CARAJÁS N5	4464
<b>TOTAL</b>	<b>9522</b>

Na sub-bacia do rio Sororó apenas três das seis estações pluviométricas da bacia do rio Itacaiunas exercem influência sobre os valores de precipitação registrados na sub-bacia, a saber: Km 60, Eldorado e Fazenda Surubim.

A estação “Km 60” é aquela com maior área de influência na sub-bacia predominando sobre as demais com área equivalente a 2895 Km<sup>2</sup>. Em segundo lugar em ordem de influência encontra-se a estação “Eldorado” totalizando 605 Km<sup>2</sup> de área. Já a menor representatividade na sub-bacia coube à estação “Fazenda Surubim” com 194 Km<sup>2</sup> (tabela 18).

Tabela 18: Área dos Polígonos de Thiessen na sub-bacia do rio Sororó

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>
ELDORADO	605
FAZ. SURUBIM	194
KM 60/PA 150	2895
<b>TOTAL</b>	<b>3694</b>

As estações “Eldorado” e “Fazenda Surubim” se equivalem, como as mais determinantes nos valores de precipitação registrados na sub-bacia do rio Vermelho, com áreas de 2460 e 2588 Km<sup>2</sup> dos respectivos polígonos, porém a segunda possui uma pequena vantagem, revelando-a ser a de maior influência. Da mesma forma as estações “Fazenda Santa Elisa” e “Km 60” também possuem áreas de influência muito próximas, todavia, por possuir área do respectivo polígono de 1171 Km<sup>2</sup> contra 1075 Km<sup>2</sup>, a segunda possui maior influência que a primeira, citada.

Diferentemente do constatado em relação ao padrão espacial dos polígonos de Thiessen das duas sub-bacias anteriormente descritas, a estação “Serra dos Carajás N5” não exerce grande influência sob a precipitação registrada na sub-bacia do rio Vermelho, possuindo área do respectivo polígono de apenas 7 Km<sup>2</sup> (tabela 19).

Tabela 19: Área dos Polígonos de Thiessen na sub-bacia do rio Vermelho

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>
ELDORADO	2460
FAZ. SANTA ELISA	1075
FAZ. SURUBIM	2588
KM 60/PA 150	1171
SERRA DOS CARAJÁS/N5	7
<b>ÁREA TOTAL</b>	<b>7301</b>

Em virtude de estar localizada em uma região coberta apenas pela estação “Serra dos Carajás N5” a sub-bacia do rio Tapirapé teve sua precipitação total anual aferida exclusivamente pelos dados fornecidos pelo respectivo posto, cuja área de influência corresponde, conseqüentemente, a própria área da sub-bacia que é de 2664 Km<sup>2</sup> (tabela 20).

Diante deste panorama gerou-se certo grau de desconfiança sobre a validade dos resultados reportados pelo método dos Polígonos de Thiessen para a precipitação total anual da sub-bacia, entretanto, por constituir uma unidade hidrográfica de quarta ordem (única à margem direita do Itacaiunas), optou-se por ainda mantê-la nos procedimentos de regionalização climática das principais sub-bacias da bacia do rio Itacaiunas.

Tabela 20: Polígono de Thiessen na sub-bacia do rio Tapirapé

<b>ESTAÇÃO</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>
SERRA DOS CARAJÁS N5	2664

A equação do método do Polígono de Thiessen foi utilizada com base nas precipitações totais anuais registradas em cada posto, a área total de cada sub-bacia e as áreas de influência de cada posto em cada sub-bacia, tendo-se obtido a precipitação total anual registrada em cada sub-bacia (mm), conforme apresentado na tabela 21.

Tabela 21: Precipitação total anual das sub-bacias do rio Itacaiunas

<b>ANO</b>	<b>BACIA</b>			
	<b>PARAUPEBAS</b>	<b>SORORO</b>	<b>TAPIRAPÉ</b>	<b>VERMELHO</b>
<b>1988</b>	1864.43	2210.63	2178.20	1944.23
<b>1989</b>	2059.12	2165.62	2266.90	1865.21
<b>1992</b>	1475.14	1348.64	1589.80	1505.01
<b>1993</b>	1432.04	1347.45	1719.70	1368.55
<b>1994</b>	1691.58	1903.86	1911.30	1929.06
<b>1995</b>	1678.66	1732.20	1838.20	1791.72
<b>1996</b>	1520.47	1555.06	1677.90	1548.33
<b>1997</b>	1582.14	1452.26	1873.10	1532.84
<b>1998</b>	1403.98	1419.15	1139.90	1437.56
<b>1999</b>	2096.55	1777.82	1884.20	1771.55
<b>2000</b>	2053.65	1968.03	2226.10	2000.24
<b>2001</b>	1640.45	1685.55	1591.80	1844.49
<b>2003</b>	1786.04	1599.50	1883.40	1645.35
<b>2004</b>	1811.23	1989.35	1600.50	1865.87
<b>2005</b>	1332.66	1667.78	1277.30	1501.86
<b>MÁX</b>	2096.55	2210.63	2266.90	2000.24
<b>MÍN</b>	1332.66	1347.45	1139.90	1368.55
<b>DESVIO PADRÃO</b>	246.82	279.69	319.11	207.24

A sub-bacia do rio Parauapebas apresentou o ano de 1999 como o mais chuvoso, totalizando 2096,55 mm de precipitação total, e o ano de 2005 como o mais seco, tendo acumulado apenas 1332,66 mm durante todo o período.

A sub-bacia do rio Sororó registrou 2210,63 mm de precipitação total no ano de 1988, tendo sido o ano mais chuvoso durante o período da análise hidrológica. Em contrapartida, 1993 com apenas 1347,45 mm foi ano com menor precipitação registrada na respectiva unidade fisiográfica.

Em 1988 foram registrados 2266,90 mm de precipitação sob a sub-bacia do rio Tapirapé, constituindo o ano mais chuvoso do período. Já em 1998 com 1139,90 mm de precipitação, foi registrado o ano mais seco na sub-bacia.

A sub-bacia do rio Vermelho, por sua vez, apresentou 2000 como o ano mais chuvoso totalizando 2000,24 mm de precipitação total, enquanto 1993 com apenas 1368,55 mm foi evidenciado como o ano mais seco no período de análise.

Note-se que apenas as sub-bacias dos rios Sororó e Vermelho, apresentaram analogias tendo ambas registrado os menores níveis de precipitação no ano de 1993, o que pode ser entendido como um efeito da proximidade geográfica entre as sub-bacias, já que constituem unidades vizinhas.

A análise de variância aplicada aos dados de precipitação total anual reportou os resultados, apresentados na tabela 22.

É válido lembrar que os grupos de análise foram constituídos pelas sub-bacias e as amostras os valores de precipitação total anual.

Tabela 22: Resultados da ANOVA: um critério.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	61332.7463	3	20444.24877	0.288021464	0.833851	2.769431
Dentro dos grupos	3974974.345	56	70981.68474			
Total	4036307.092	59				

Onde: SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = média quadrada; F = teste de Fisher

A média quadrada dos grupos “MQG” que corresponde à variância entre os grupos apresentou valor de 20444.24877, enquanto que para “MQR” que corresponde à variância dentro dos grupos obteve 70981.68474.

O teste-F reportou o valor 0.288021464, assim como o F-crítico definido para o teste a 0,05 de risco para a hipótese alternativa foi de 2.769431.

Em função do valor de “MQR” ter sido maior que o de “MQG”, e também do valor obtido pelo teste-F ter ficado abaixo do patamar do F-crítico, a hipótese nula assumida na regionalização climática das principais sub-bacias do rio Itacaiunas não foi rejeitada.

Dessa forma conclui-se com base nos dados de precipitação total anual que as sub-bacias de quarta ordem, da bacia do rio Itacaiunas, não apresentam diferença estatisticamente significativa entre si, no horizonte avaliado pelo estudo, de forma que se pode assumir que elas constituem unidades fisiográficas climaticamente homogêneas, a 5% de risco.

Caso a resposta fosse diferente e levasse a rejeição da hipótese nula, isto é, se os resultados demonstrassem haver diferença estatisticamente significativa entre o clima das sub-bacias, seria necessário buscar um método de agrupamento das sub-bacias com base em níveis de similaridade na precipitação registrada pelas mesmas.

O agrupamento das sub-bacias seria feito então segundo a metodologia proposta por Fachine e Galvínio (2008a).

Tal método propõe o agrupamento ou aglomeração dos grupos baseado no método de Ward, que tem o objetivo de minimizar o quadrado da distância euclidiana às médias dos conglomerados.

Segundo Ayres et al. (2003) a distância euclidiana ( $d_{ij}$ ) abrange amostras com  $n$  indivíduos cada um representando  $p$  variáveis –  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – mensuradas a nível intervalar ou de razões, procurando-se determinar a distância entre os elementos estudados. Sendo que o tamanho das amostras pode ser igual ou desigual:

$$d_{ij} = \sqrt{\left\{ \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2 \right\}}. \quad \text{Equação nº 37}$$

Onde:  $i$  - indivíduos;  $p$  - número de variáveis.

Fechine & Galvêncio (2008a) ainda ressaltam que este é um dos métodos mais utilizados em estudos de *clusters* e mostra-se adequado às características da precipitação pluviométrica.

#### 6.4 VAZÕES MÁXIMA, MÉDIA E MÍNIMA REGIONAIS

Com base na constatação que fisicamente e climaticamente as sub-bacias mais importantes, no contexto hidrológico da bacia do rio Itacaiunas, são homogêneas (conforme demonstrado nos itens anteriores) foi possível assumir a premissa que mesmo havendo apenas uma estação fluviométrica com dados de vazão na unidade fisiográfica estudada as variáveis hidrológicas obtidas pela regionalização seriam representativas do comportamento hidrológico da mesma.

Desta forma procedeu-se a obtenção das variáveis hidrológicas regionais relativas ao período seco e chuvoso.

Dentre os sete modelos de distribuição de probabilidades teóricas testados para os eventos hidrológicos de mínima para o período chuvoso, o modelo Normal foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados da série histórica de vazões, com valor de %K-S igual a 20 e C.V. da ordem de 9,530765.

Em virtude de todos os modelos, com exceção de Log-Pearson 3, terem reportado %K-S igual a 20, o que definiu de fato a escolha pelo modelo Normal para a determinação da vazão mínima com dez anos de recorrência foi o valor de C.V., tendo tal modelo apresentado o menor valor (9,530765).

O bom ajuste do modelo aos dados da série histórica pode ser observado graficamente pela figura 37, em que a curva representa o comportamento do modelo Normal e os pontos os eventos de mínima.

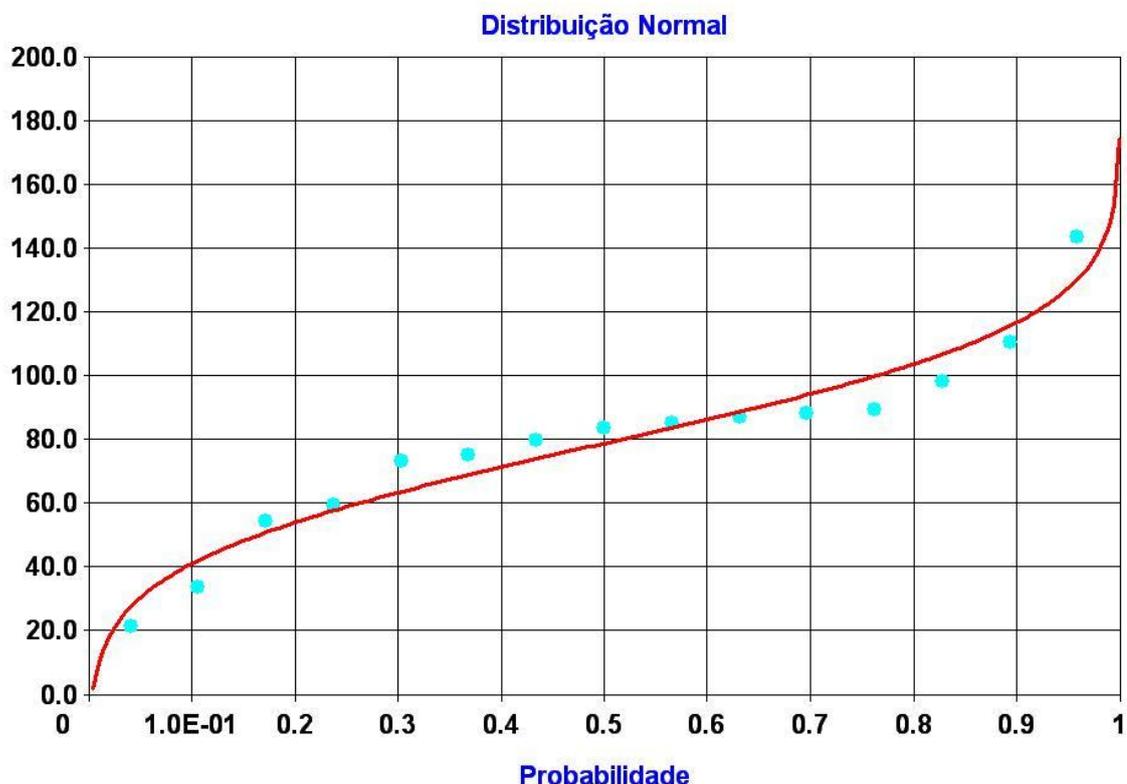


Figura 36: Gráfico do ajuste do modelo Normal aos eventos de mínima da série histórica no período chuvoso

A vazão mínima de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência correspondente ao modelo é de 41,25 m<sup>3</sup>/s.

Com relação aos eventos de máxima no período chuvoso, novamente o fator determinante na definição do modelo que melhor se ajustou aos dados hidrológicos, foi o valor de C.V. Uma vez que o modelo probabilístico Pearson 3; com 7,026088; apresentou a menor variação ele correspondeu ao modelo que melhor representou os eventos de vazão máxima da bacia no período chuvoso. Com exceção de Log-Pearson 3, com %K-S igual a 1, todos os demais apresentaram %K-S igual a 20.

O modelo reporta como vazão máxima de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência 3013,44 m<sup>3</sup>/s.

Note-se que por se tratar da vazão máxima no período chuvoso este resultado representa um forte elemento orientativo no planejamento das ações preventivas e mitigadoras das enchentes anuais do rio Itacaiunas que pode auxiliar substancialmente políticas públicas relativas aos eventos extremos (historicamente

ocorrentes na foz do rio Itacaiunas em Marabá), ações estruturantes com vistas à contenção das enchentes e as ações da defesa civil no apoio as vítimas destes eventos.

A partir da figura 37 pode-se constatar graficamente o bom resultado do ajuste do modelo aos dados hidrológicos de máxima, no período chuvoso.

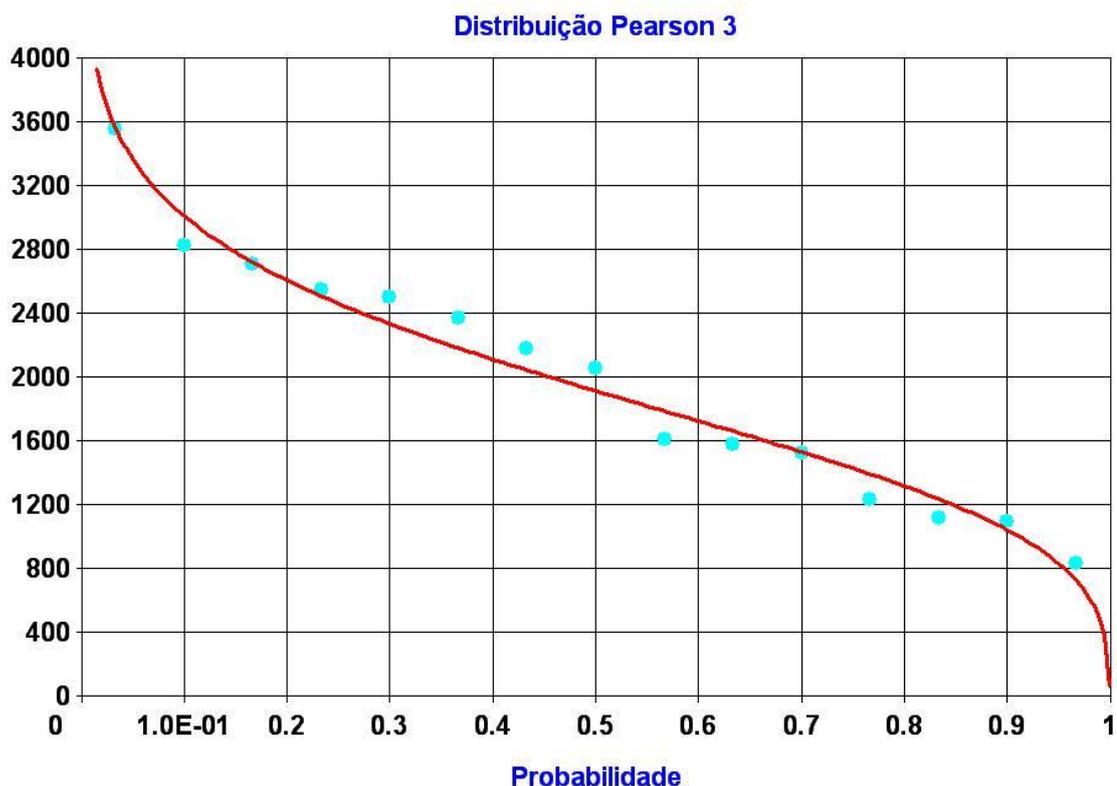


Figura 37: Gráfico do ajuste do modelo Pearson 3 aos eventos de máxima da série histórica no período chuvoso

Da mesma forma que o ajuste dos modelos teóricos de distribuição probabilística para os eventos de máxima, para as vazões médias no período chuvoso o modelo probabilístico que apresentou o melhor ajuste aos dados foi o Pearson 3.

Com valor de %K-S igual a 20, analogamente a seis dos sete modelos testados, e C.V. de 5,972202 o modelo foi a escolha natural dentro dos critérios adotados para a definição do melhor ajuste.

A vazão média, segundo o cenário projetado pelo modelo é de 930,03 m<sup>3</sup>/s.

O ajuste considerado bom do modelo Pearson 3 aos dados de vazões médias no período chuvoso pode ser confirmado pela observação da figura 38, logo abaixo.

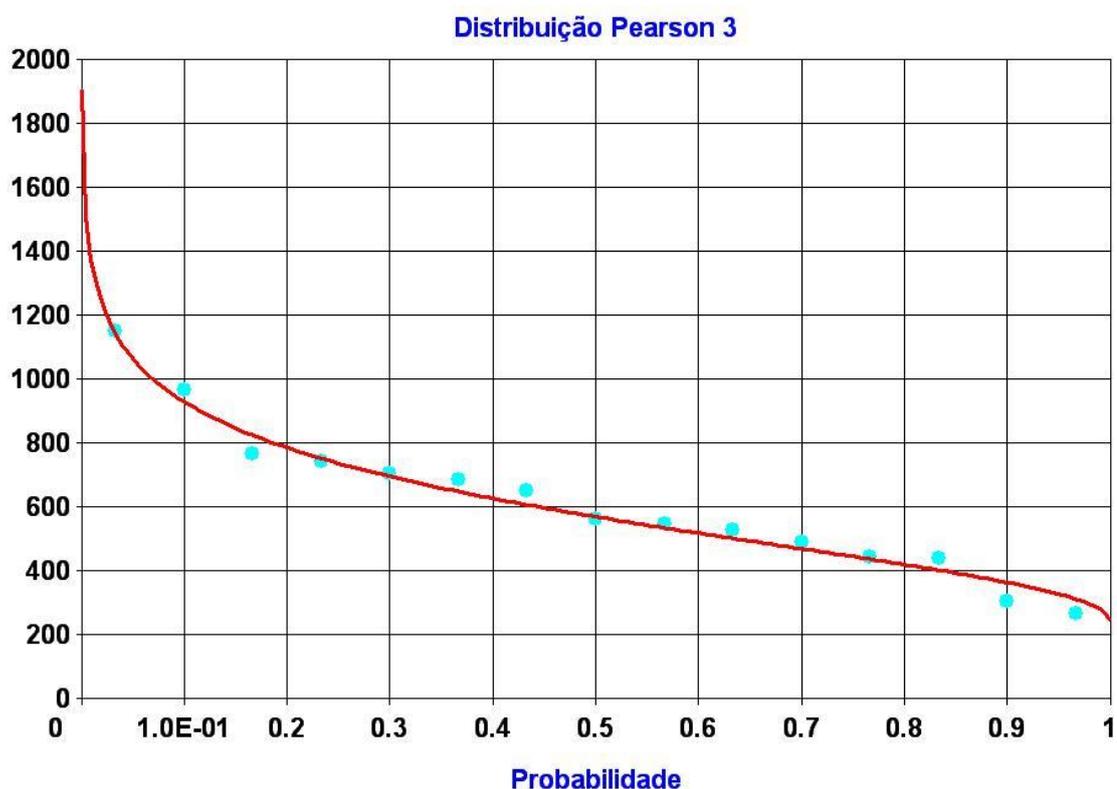


Figura 38: Gráfico do ajuste do modelo Pearson 3 aos eventos médios da série histórica no período chuvoso

Para os eventos de mínima registrados no período seco dentre todos os sete modelos de distribuição teórica de probabilidades testados foi o Log-Pearson 3 que apresentou o melhor ajuste aos dados hidrológicos.

O valor de %K-S obtido pelo modelo, igual a 20, também foi reportado por outros cinco modelos, entretanto, seu valor de C.V. (29,19324) foi o menor registrado entre todos tendo sido então a escolha natural à luz dos critérios de escolha do melhor ajuste.

Com base no modelo o valor da vazão mínima de sete dias consecutivos e recorrência de dez anos, no cenário projetado, é da ordem de 37,20 m<sup>3</sup>/s.

Note-se que em comparação a vazão mínima obtida para o período chuvoso há um déficit de apenas 9.81%, aproximadamente, o que gerou certa surpresa quando da constatação, já que dado o fato da sazonalidade local produzir períodos bem distintos, com uma estação seca bem definida na bacia típica do clima Aw, a resposta esperada seria um contraste mais marcante entre as vazões apontadas entre os dois períodos sazonais.

Porém, ao que parece há um mecanismo interno à bacia que permite compensar a redução do aporte de água ao sistema pelas precipitações durante o período seco.

Uma possível hipótese para justificar esse efeito seria uma contribuição de maior magnitude que o esperado do fluxo de base dos aquíferos da bacia aos rios perenes da área, na estiagem. Todavia somente, a partir de pesquisas hidrogeológicas e geofísicas realizadas na área poderia se viabilizar a confirmação desta hipótese ou o descarte da mesma, de forma que tal questão ainda permanece em aberto.

A figura 39 demonstra graficamente o ajuste do modelo Log-Pearson 3 aos dados hidrológicos de mínima, revelando que possivelmente o ajuste do melhor modelo probabilístico relativo ao período chuvoso obteve melhor êxito na explicação do comportamento hidrológico das vazões mínimas, já que no período seco há uma maior tendência ao espalhamento dos dados ao redor da curva.

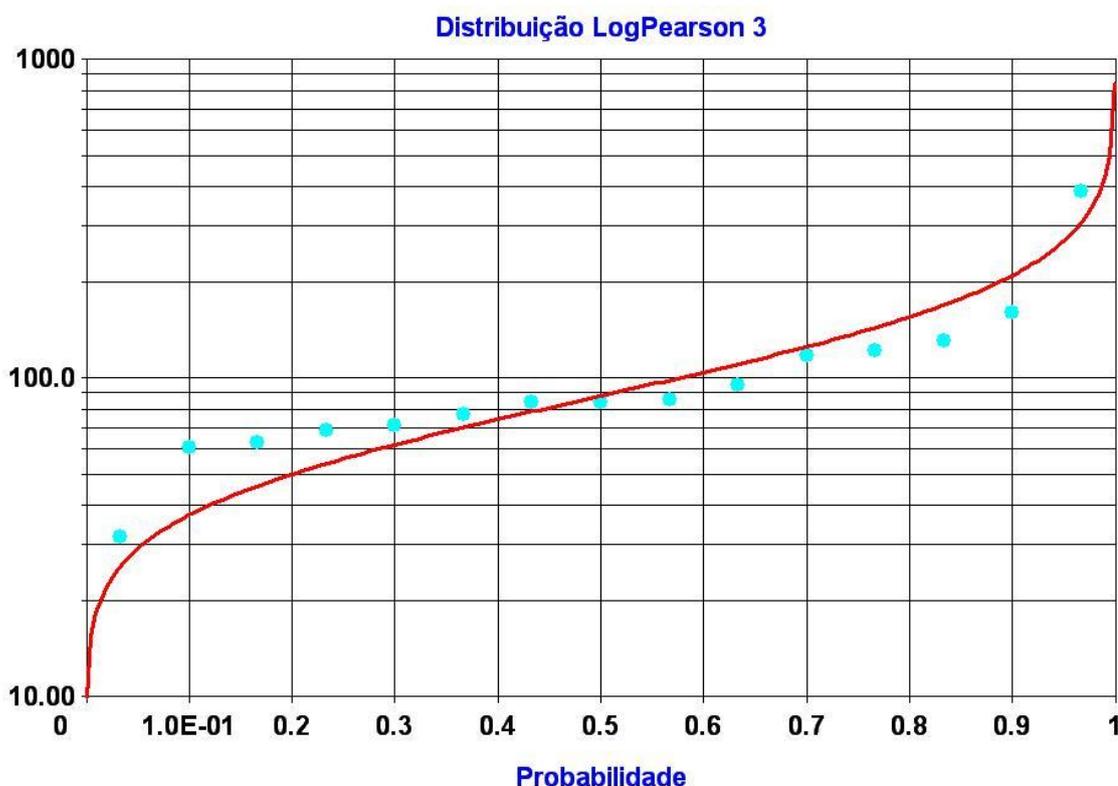


Figura 39: Gráfico do ajuste do modelo Log-Pearson 3 aos eventos de mínima da série histórica no período seco

Com relação aos eventos de máxima, analogamente ao evidenciado no período chuvoso, dentre os sete modelos ajustados aquele que apresentou os melhores resultados para o período seco foi o modelo probabilístico Pearson 3.

O teste %K-S reportou valor de 20, juntamente com outros cinco modelos, de forma que o C.V de 5,116818 foi o fator determinante na escolha do modelo, pois correspondeu a menor variação apresentada por todos os modelos testados.

Com base no cenário projetado pelo modelo Pearson 3 a vazão máxima de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência é de 2415,11 m<sup>3</sup>/s.

Comparativamente aos dados de vazão máxima reportados pelo modelo Pearson 3 para o período chuvoso há uma redução de aproximadamente 19.85% no período seco, o que é uma diferença razoável e mais plausível que aquela apontada pela comparação entre os eventos de mínimas nos diferentes períodos de análise.

Ainda, a partir de uma análise gráfica (figura 40) torna-se ainda mais evidente o bom ajuste do modelo Pearson 3 aos dados de vazão máxima da bacia.

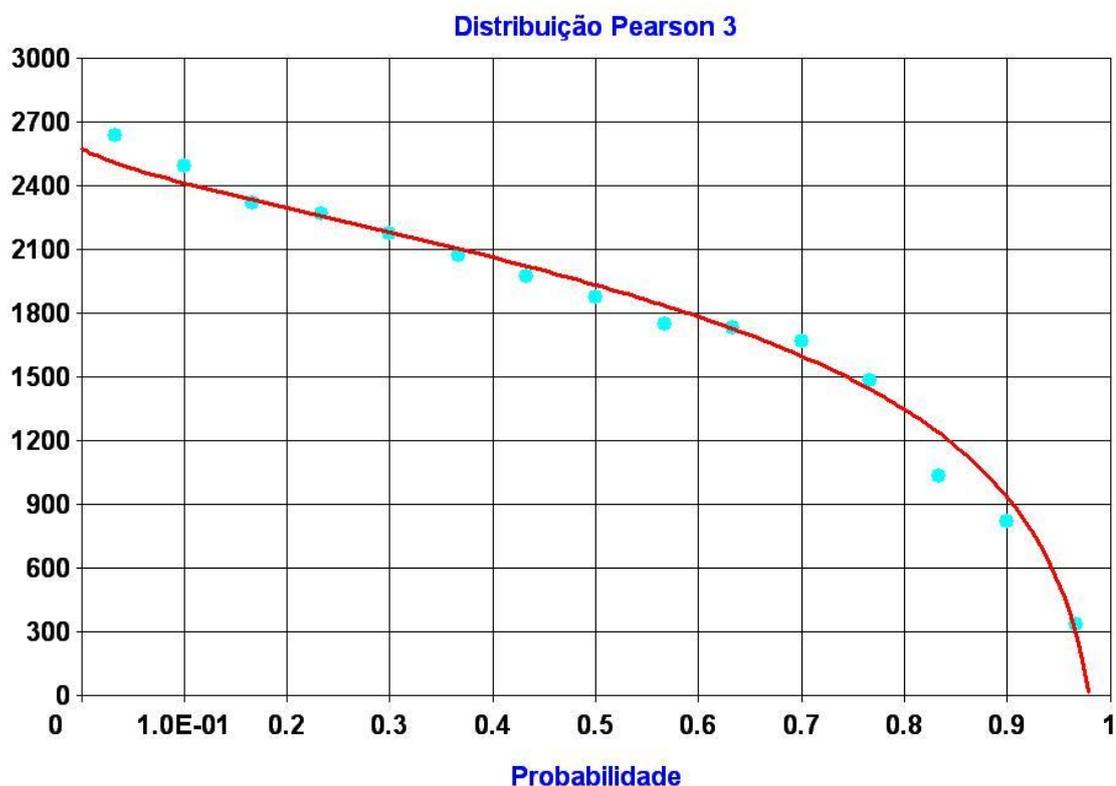


Figura 40: Gráfico do ajuste do modelo Pearson 3 aos eventos de máxima da série histórica no período seco

Para os eventos médios relativos ao período seco, diferentemente de todos os resultados obtidos anteriormente independentemente do período sazonal, o modelo de distribuição teórica de probabilidades que reportou o melhor ajuste aos dados hidrológicos constituiu o Log-Normal 2.

Porém, da mesma forma que todos os ajustes anteriores, o fator que definiu a escolha pelo modelo foi sua menor variação apontada pelo valor de C.V. (21,04851), já que além do modelo em questão outros cinco apresentaram %K-S iguais a 20.

O valor de vazão média no cenário do modelo escolhido é da ordem de 900,28 m<sup>3</sup>/s.

A diferença observada entre as vazões médias pelos modelos Pearson 3, para o período chuvoso, e Log-Normal 2, para o seco é de aproximadamente 3.20% apenas, sendo quase insignificantes, de forma que as vazões médias aparentemente não sofrem influência da sazonalidade na mesma ordem de magnitude que as vazões máximas.

A representação gráfica do ajuste do modelo Log-Normal 2 aos dados hidrológicos médios da bacia do rio Itacaiunas pode ser observado na figura 41.

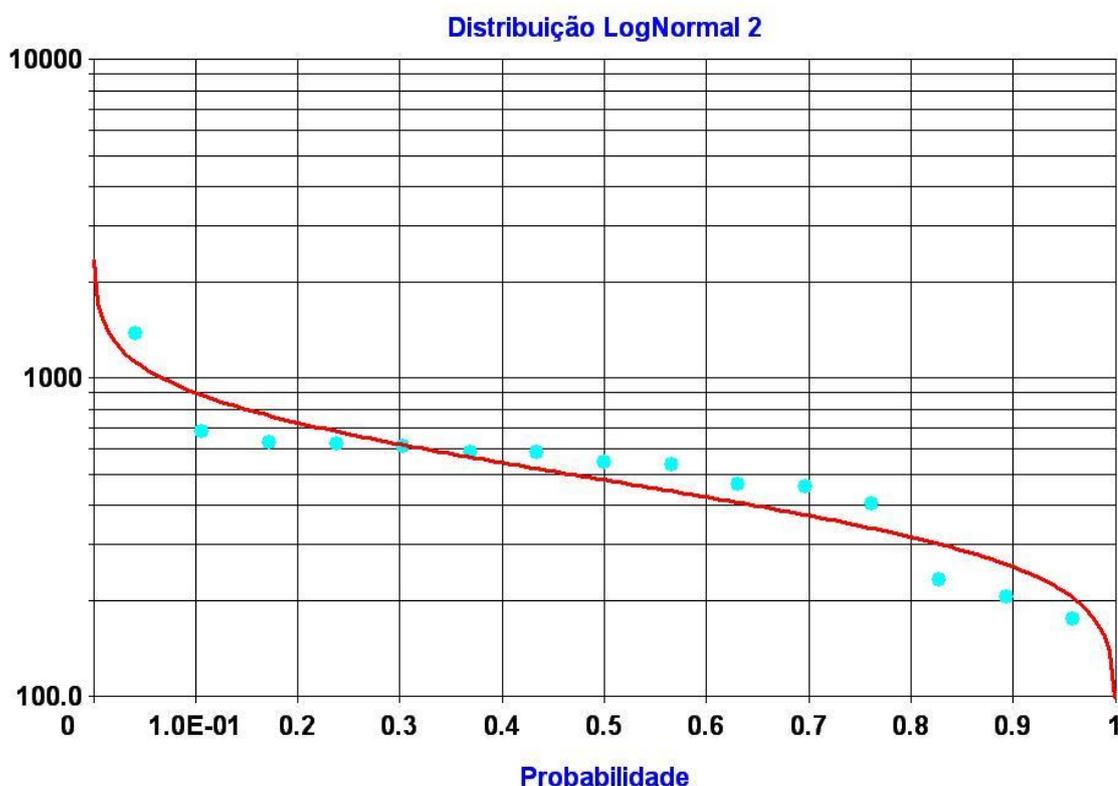


Figura 41: Gráfico do ajuste do modelo Log-Normal 2 aos eventos médios da série histórica no período seco

Os resultados obtidos para os eventos de mínima, máxima e média nos dois distintos períodos sazonais analisados estão representados sinteticamente na tabela 23.

Tabela 23: Vazões de referência obtidas para diferentes períodos sazonais

PERÍODO SAZONAL	VAZÕES DE REFERÊNCIA (m <sup>3</sup> /s)		
	MÍN	MÁX	MED
CHUVOSO	41,25	3013,44	930,03
SECO	37,20	2415,11	900,28

Apesar do exercício da obtenção das vazões regionalizadas ter reportado bons ajustes dos modelos de distribuição teórica de probabilidades, aferidos tanto pelos testes de aderência quanto pela análise gráfica, os valores não devem ser tomados como resultados finalísticos uma vez que por constituir uma ciência essencialmente probabilística, a hidrologia depende fundamentalmente do número de dados observados, isto é da discretização dos fenômenos hidrológicos, que por sua vez está diretamente relacionada ao volume de dados disponíveis.

Dessa forma as limitações do número de postos fluviométricos presentes na área de drenagem da bacia e do horizonte de análise hidrológica (limitado pelas séries históricas de precipitação) certamente exerceram influência determinante nos resultados obtidos. Se estivessem disponíveis mais postos de controle fluviométrico na bacia, com maior número de anos com dados fluviométricos consistidos, as respostas em termos de vazões projetadas pelos cenários dos modelos apresentariam variações, apesar da magnitude destas últimas não poder ser mensurada previamente.

Neste sentido torna-se claro e evidente que o adensamento da atual rede de monitoramento fluviométrico na bacia do rio Itacaiunas, tanto em termos de postos de controle pluviométrico quanto fluviométrico, é necessária para que se possa viabilizar estudos mais refinados sobre o comportamento hidrológico da bacia.

## 6.5 CURVA DE PERMANÊNCIA REGIONAL E Q<sub>95</sub>

A curva de permanência de vazões regionalizada para a bacia do rio Itacaiunas, obtida pelo conjunto total dos dados da estação fluviométrica “Fazenda

Alegria” limitada ao horizonte de estudo previamente definido, reportou o delineamento apresentado abaixo (figura 42).

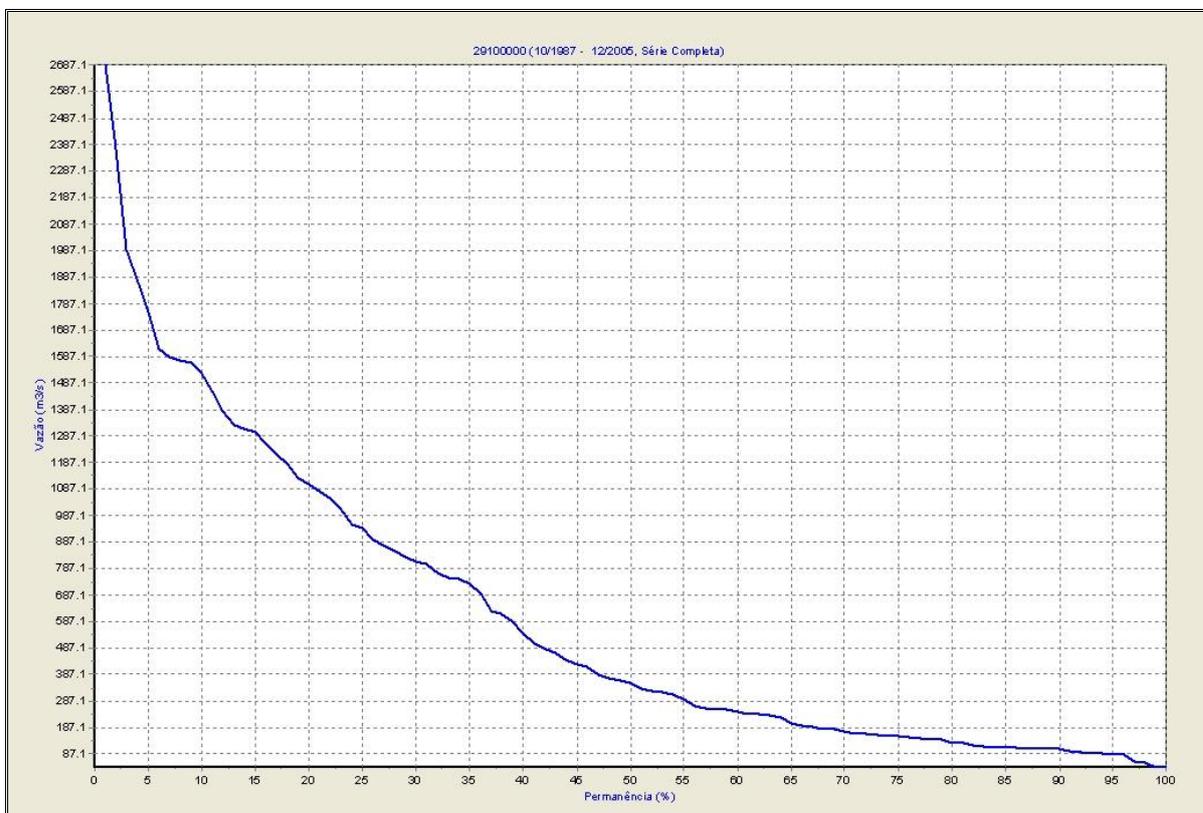


Figura 42: Curva de permanência regional da bacia do rio Itacaiunas

A vazão global com permanência de 95% no tempo ( $Q_{95}$ ) obtida perfaz 85,7  $m^3/s$ .

Considerando-se que tanto a  $Q_{95}$  quanto a  $Q_{7,10}$  (vazão mínima de sete dias consecutivos e dez anos de retorno) são vazões utilizadas em procedimentos de tomada de decisão relativas à outorga de água superficiais no Brasil, evidencia-se que se a segunda fosse adotada como referência no Pará haveriam maiores restrições de disponibilidade hídrica para outorga, fato que se reproduz igualmente no contexto específico da bacia do rio Itacaiunas, haja visto esta apontar valores de vazão cerca de 48% menores que a  $Q_{95}$ . Corrobora para esta constatação o trabalho de Pertel et al. (2007) que avaliando três diferentes metodologias para a estimativa de vazões residuais, ou ecológicas, aplicáveis a bacia do rio Itapemirim constatou que dentre todas a mais restritiva compreendeu a  $Q_{7,10}$ .

Porém, deve-se ter em mente que o valor da  $Q_{7,10}$  adotado na análise acima corresponde ao cenário mais crítico, período seco, enquanto que a  $Q_{95}$  utilizada foi

obtida com a série global de dados, isto é, sem considerar somente os dados da estiagem. Dessa forma as diferenças em termos de vazão disponível para outorga entre ambas as vazões de referência, se fossem sistematizados os períodos sazonais de avaliação, obviamente seriam atenuadas e não apresentariam disparidades tão pronunciadas.

A dinâmica da  $Q_{95}$  em cada mês do ano civil pode ser observada na figura 43.

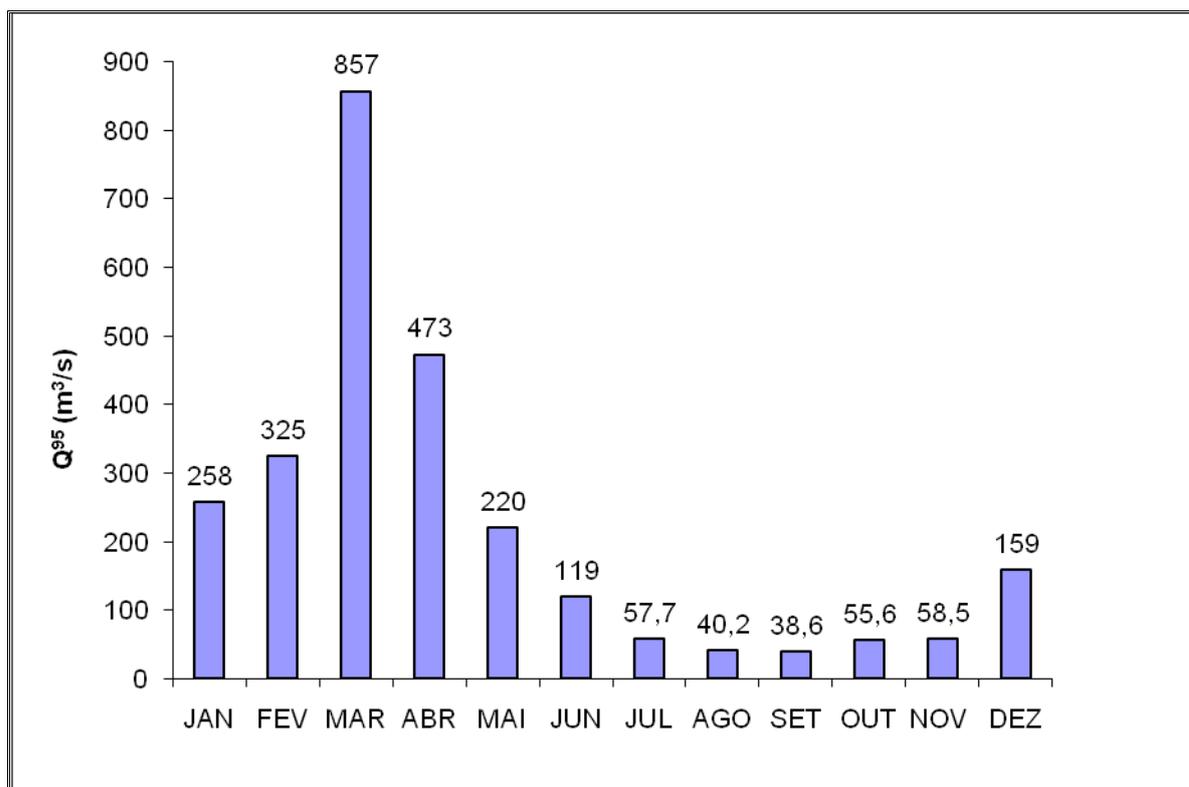


Figura 43: Comportamento da  $Q_{95}$  nos 12 meses do ano civil

Pela análise do gráfico nota-se claramente que há uma forte correlação dos valores de  $Q_{95}$  com a sazonalidade apresentando o período chuvoso na bacia, Outubro a Março, os maiores valores de vazão disponíveis e o seco, Abril a Setembro, as menores disponibilidades hídricas.

No mês de março, em função do significativo aporte de chuvas na bacia, se obtém a maior disponibilidade hídrica com vazão de 857 m<sup>3</sup>/s.

Por outro lado o mês que sofre o maior impacto da estiagem, e consequentemente, registra o menor valor de  $Q_{95}$  é Setembro com 38,6 m<sup>3</sup>/s disponíveis, apenas.

Apesar de ser bastante forte o efeito da sazonalidade na bacia, que se reproduz na disponibilidade hídrica para outorga, a avaliação da dinâmica da  $Q_{95}$  nos

doze meses do ano civil possui caráter apenas acadêmico, uma vez que nos procedimentos de outorga sistematizados pelo órgão gestor de recursos hídricos do estado do Pará só se considera a  $Q_{95}$  global na decisão referente às vazões passíveis de serem outorgadas. Porém, Rodriguez (2008) ressalta que a consideração da sazonalidade das vazões nos procedimentos de tomada de decisão quanto à outorga permitiria um melhor planejamento do uso da água, reduzindo, conseqüentemente conflitos pelo seu uso, isto é, a SEMA/PA poderia outorgar vazões para captação superficial com base nas disponibilidades mensais apresentadas pela variação da  $Q_{95}$ , tendo assim, maior eficiência no gerenciamento da relação oferta e demanda hídrica no Estado do Pará.

## 6.6 DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA OUTORGA DA BACIA DO RIO ITACAIUNAS

A consulta ao Sistema Estadual de Monitoramento e Licenciamento Ambiental do Pará (SIMLAM/PA), que constituiu a primeira etapa do processo de avaliação da disponibilidade hídrica da bacia do rio Itacaiunas, seguida da plotagem dos respectivos pontos de captação superficial, revelou haver oito usuários devidamente outorgados na unidade fisiográfica.

Do universo total de usuários sete estão alocados no município de Marabá e apenas um desenvolve suas atividades no município de Parauapebas. Os demais municípios que também fazem parte da bacia não possuem atualmente usuários das águas superficiais da unidade outorgados, estando dessa forma fazendo uso indevido dos recursos hídricos e sendo passíveis de aplicação de sanções administrativas previstas em lei; tais como autuação, aplicação de multa e embargo da atividade.

Com relação à finalidade das captações observa-se, a partir da tabela 24, que dois usuários possuem outorga para viabilizar os procedimentos de terraplagem (umidificação de vias e atenuação da emissão de particulados à atmosfera), os outros seis pertencem ao segmento da indústria siderúrgica, utilizando as águas nos seus processos industriais de produção de ferro-gusa.

Tabela 24: Usuários de recursos hídricos superficiais na bacia do rio Itacaiunas

<b>USUÁRIO</b>	<b>USO</b>	<b>MUNICÍPIO</b>
A	TERRAPLANAGEM	PARAUAPEBAS
B	SIDERÚRGICA	MARABÁ
C	SIDERÚRGICA	MARABÁ
D	SIDERÚRGICA	MARABÁ
E	SIDERÚRGICA	MARABÁ
F	SIDERÚRGICA	MARABÁ
G	SIDERÚRGICA	MARABÁ
H	TERRAPLANAGEM	MARABÁ

No total há 23 pontos de captação superficiais presentes na bacia, conforme demonstrado na tabela 25.

O usuário “A” possui 12 pontos de captação, representando o maior usuário com relação ao número de captações individuais, distribuídos da seguinte forma: 8 pontos no rio Azul e 4 pontos no igarapé Gelado,

Os usuários “B”, “C”, “D”, “E”, “F” e “G” por sua vez possuem um único ponto de captação cada, estando todos captando simultaneamente do próprio rio Itacaiunas.

Já o usuário “H” possui cinco captações individuais, distribuídas entre cinco diferentes mananciais, a saber: rio Sororó, igarapé das Onças, rio Castanheira, igarapé Surpresa e rio Parauapebas.

O manancial que possui o maior número de captações individuais é o rio Azul com 8 pontos no total, em segundo lugar está o próprio rio Itacaiunas com 6 pontos distribuídos ao longo de seu curso, em seguida vem o igarapé Gelado com 4 pontos. O rio Sororó, igarapé das Onças, rio Castanheira, igarapé Surpresa e rio Parauapebas, por sua vez possuem apenas uma captação superficial outorgada cada.

A distribuição espacial das captações superficiais individuais pode ser observada na figura 44.

Com base no valor da  $Q_{95}$  global e nas vazões outorgadas para cada ponto de captação pôde-se complementarmente avaliar o impacto individual de cada captação na disponibilidade hídrica da bacia, conforme demonstrado na tabela 26.

Tabela 25: Captações superficiais individuais dos usuários da bacia do rio Itacaiunas

<b>PONTO</b>	<b>CAPTAÇÃO</b>	<b>USO</b>	<b>USUÁRIO</b>
1	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
2	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
3	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
4	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
5	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
5	IG. GELADO	TERRAPLENAGEM	A
7	IG. GELADO	TERRAPLENAGEM	A
8	IG. GELADO	TERRAPLENAGEM	A
9	IG. GELADO	TERRAPLENAGEM	A
10	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
11	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
12	RIO AZUL	TERRAPLENAGEM	A
13	RIO ITACAIUNAS	SIDERURGICA	B
14	RIO ITACAIUNAS	SIDERURGICA	C
15	RIO ITACAIUNAS	SIDERÚRGICA	D
16	RIO ITACAIUNAS	SIDERÚRGICA	E
17	RIO ITACAIUNAS	SIDERÚRGICA	F
18	RIO ITACAIUNAS	SIDERÚRGICA	G
19	SORORÓ	TERRAPLENAGEM	H
20	IG. DAS ONÇAS	TERRAPLENAGEM	H
21	RIO CASTANHEIRA	TERRAPLENAGEM	H
22	IG. SURPRESA	TERRAPLENAGEM	H
23	RIO PARAUPEBAS	TERRAPLENAGEM	H

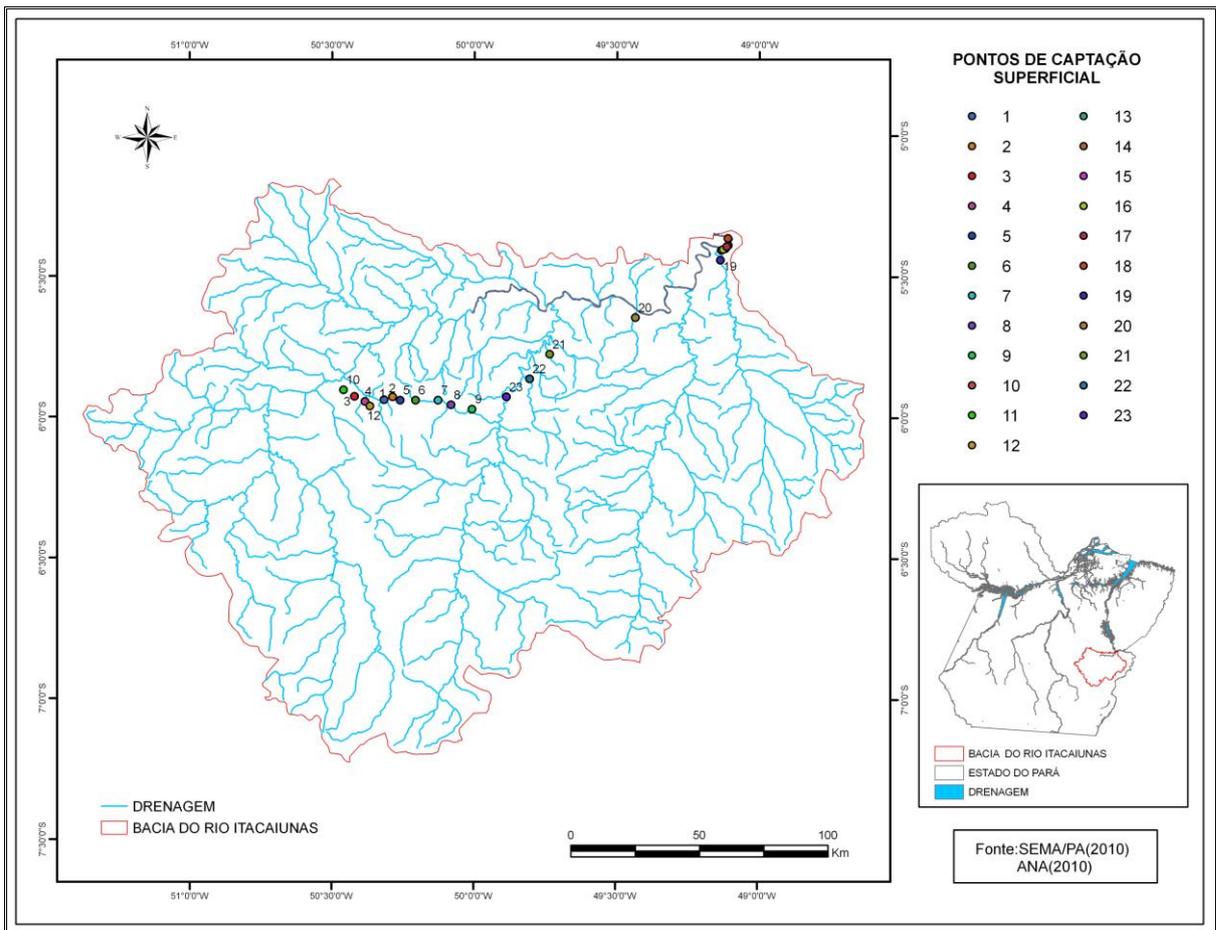


Figura 44: Distribuição espacial das captações superficiais na bacia do Itacaiunas

Tabela 26: Vazões captadas em cada ponto e sua relação com a  $Q_{95}$  da bacia

PONTO	CAPTAÇÃO	USUÁRIO	Q (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>95</sub> (m <sup>3</sup> /s)	% Q <sub>95</sub>
1	RIO AZUL	A	0,023611	85,7	0,027551
2	RIO AZUL	A	0,012500	85,7	0,014586
3	RIO AZUL	A	0,002778	85,7	0,003241
4	RIO AZUL	A	0,027778	85,7	0,032413
5	RIO AZUL	A	0,006944	85,7	0,008103
6	IG. GELADO	A	0,006944	85,7	0,008103
7	IG. GELADO	A	0,006944	85,7	0,008103
8	IG. GELADO	A	0,012500	85,7	0,014586
9	IG. GELADO	A	0,006944	85,7	0,008103
10	RIO AZUL	A	0,023611	85,7	0,027551
11	RIO AZUL	A	0,004167	85,7	0,004862
12	RIO AZUL	A	0,006944	85,7	0,008103
13	RIO ITACAIUNAS	B	0,041667	85,7	0,048619
14	RIO ITACAIUNAS	C	0,019444	85,7	0,022689
15	RIO ITACAIUNAS	D	0,059028	85,7	0,068877
16	RIO ITACAIUNAS	E	0,017361	85,7	0,020258
17	RIO ITACAIUNAS	F	0,011806	85,7	0,013775
18	RIO ITACAIUNAS	G	0,014583	85,7	0,017017
19	SORORÓ	H	0,003102	85,7	0,003619
20	IG. DAS ONÇAS	H	0,002037	85,7	0,002377
21	RIO CASTANHEIRA	H	0,007523	85,7	0,008778
22	IG. SURPRESA	H	0,008044	85,7	0,009386
23	RIO PARAUAPEBAS	H	0,001157	85,7	0,001351
TOTAL			0,327419		

As maiores vazões captadas no rio Azul constituem os pontos 4 (0,027778 m<sup>3</sup>/s), 1 (0,023611 m<sup>3</sup>/s) e 10 (0,023611 m<sup>3</sup>/s). Todas estas captações outorgadas pertencem ao usuário A.

Quanto ao igarapé Gelado o maior volume captado está localizado no ponto 8, com vazão de 0,012500 m<sup>3</sup>/s, cuja outorga para captação superficial neste manancial pertence também ao usuário "A". Com relação à  $Q_{95}$  esta captação representa individualmente 0,014586% da mesma.

Dos seis diferentes usuários que fazem captação superficial no rio Itacaiunas pertence ao usuário "D" o maior volume de vazão individual captada com 0,059028 m<sup>3</sup>/s (ponto 15), correspondendo a 0,068877% da  $Q_{95}$ .

O rio Sororó, Igarapé das Onças, rio Castanheira, igarapé Surpresa e rio Parauapebas por sua vez possuem apenas um ponto de captação cada com vazões outorgadas de 0,003102; 0,002037; 0,007523; 0,008044 e 0,001157 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, representando em termos de valores relativos à  $Q_{95}$  0,003619;

0,002377; 0,008778; 0,009386 e 0,001351%, respectivamente. Todas estas captações foram outorgadas somente para o usuário “H”.

As vazões totais outorgadas para cada manancial e seus percentuais relativos à  $Q_{95}$  são apresentados na tabela 27.

Tabela 27: Vazões totais captadas por manancial na bacia do rio Itacaiunas

<b>MANANCIAL</b>	<b>VAZÃO OUTORGADA</b>	<b>%<math>Q_{95}</math></b>
RIO AZUL	0,108333	0,126410
IG. GELADO	0,033333	0,038895
RIO ITACAIUNAS	0,163889	0,191236
RIO SORORÓ	0,003102	0,003619
IG. DAS ONÇAS	0,002037	0,002377
RIO CASTANHEIRA	0,007523	0,008778
IG. SURPRESA	0,008044	0,009386
RIO PARAUPEBAS	0,001157	0,001351
<b>TOTAL</b>	<b>0,327418</b>	

Da tabela acima se pode constatar que o rio Itacaiunas constitui o manancial mais demandado da bacia com vazão total outorgada de 0,163889  $m^3/s$ ; que representa um impacto de 0,191236% na disponibilidade hídrica na bacia, definida em termos de  $Q_{95}$ .

Em segundo lugar está o rio Azul com 0,108333  $m^3/s$  de vazão total outorgada, que constitui 0,126410% da  $Q_{95}$  da bacia.

Em sequência vem o igarapé Gelado com 0,033333  $m^3/s$  de vazão total outorgada e impacto na disponibilidade hídrica na bacia da ordem de 0,038895% da  $Q_{95}$ .

Os demais mananciais, por disporem de apenas um ponto de captação cada, possuem vazões captadas e percentuais relativos à  $Q_{95}$  já devidamente elucidados na tabela 26.

Com base nos dados de captação total de cada usuário e na  $Q_{95}$  pôde-se analisar o impacto individual relativo à vazão de referência  $Q_{95}$  regional da bacia e a disponibilidade hídrica remanescente da mesma, conforme os dados apresentados na tabela 28.

Tabela 28: Impacto individual dos usuários de água e disponibilidade hídrica da bacia do rio Itacaiunas

USUÁRIO	Q <sub>95</sub>	%Q <sub>95</sub>
A	85,7	0,165305
B	85,7	0,048619
C	85,7	0,022689
D	85,7	0,068877
E	85,7	0,020258
F	85,7	0,013775
G	85,7	0,017017
H	85,7	0,025512
<b>TOTAL</b>		0,382052
<b>DISPONIBILIDADE</b>		99,617948

O principal usuário dos recursos hídricos da bacia do rio Itacaiunas é o “A”, cuja vazão captada em seus 12 pontos distribuídos entre o rio Azul e o igarapé Gelado, totaliza 0,165305% da vazão Q<sub>95</sub> regional. Note-se que sua captação apesar de representar o maior impacto sobre a disponibilidade hídrica local deve brevemente deixar de ser contabilizado para efeito de balanço hídrico, uma vez que finalizada a pavimentação das rodovias cuja captação está relacionada diretamente (por meio dos procedimentos de umidificação na terraplanagem), deixa de haver a demanda e logo o usuário é desautorizado a deslocar água do manancial.

Com impacto na disponibilidade hídrica da bacia de 0,068877% da Q<sub>95</sub> o usuário “D”, que tem como manancial superficial de seu único ponto de captação o rio Itacaiunas, ocupa o posto de segundo maior usuário da bacia. Deve-se lembrar também que o usuário em questão pertence ao segmento da indústria siderúrgica de Marabá.

O terceiro maior usuário das águas superficiais da bacia do rio Itacaiunas também pertence ao segmento da indústria siderúrgica e capta águas do próprio rio Itacaiunas, sendo definido como usuário “B”. A vazão captada pelo mesmo representa 0,048619% da Q<sub>95</sub> regional.

Apesar de constituir o quarto maior usuário das águas superficiais da bacia, com 0,025512% da Q<sub>95</sub> regional, o usuário “H” encaixa-se no mesmo perfil descrito para o usuário “A”, em virtude de possuir outorga deferida para a mesma finalidade de uso. É válido também ressaltar que sua captação total corresponde à soma das vazões captadas individualmente no rio Sororó, Igarapé das Onças, rio Castanheira, igarapé Surpresa e rio Parauapebas.

O usuário “C” individualmente produz um impacto da ordem de 0,022689% da  $Q_{95}$  na disponibilidade hídrica regional, ocupando o posto de quinto maior usuário da bacia. Assim como outros usuários já citados, o mesmo realiza sua única captação superficial no rio Itacaiunas a fim de viabilizar a atividade siderúrgica.

O impacto da captação individual no rio Itacaiunas do usuário “E”, também pertencente à indústria siderúrgica de Marabá, perfaz 0,020258% da  $Q_{95}$  regional, dessa forma levando-o a representar o sexto maior usuário das águas da bacia.

Também pertencendo ao segmento industrial da indústria siderúrgica, cuja única captação é feita no próprio rio Itacaiunas, o usuário “G” ocupa o lugar de sétimo maior usuário da bacia em termos de vazão outorgada, com captação equivalente a 0,017017% da  $Q_{95}$ .

O usuário “F”, cuja captação superficial realizada em um único ponto no próprio rio Itacaiunas subsidia a produção industrial de ferro gusa, impacta a disponibilidade hídrica regional em 0,013775% da  $Q_{95}$ , levando-o ao patamar de oitavo maior usuário de recursos hídricos da bacia.

Somadas as captações realizadas pelos oito usuários da bacia hidrográfica do rio Itacaiunas, as vazões outorgadas na área totalizam apenas 0,382052% da vazão  $Q_{95}$ . Porém, se considerar-se que a máxima vazão outorgável em uma bacia no Pará é de 70% da vazão de referência  $Q_{95}$ , este valor passa a representar um percentual de uso das águas superficiais na unidade de 0,545789% da vazão disponível para captação superficial.

Decorre disto que utilizando como critério para o balanço hídrico a vazão máxima outorgável disponível na bacia (70% da  $Q_{95}$ ) e o percentual total das vazões captadas relativas a 70% da vazão de referência  $Q_{95}$ , sendo a disponibilidade hídrica a diferença entre ambos (balanço hídrico simplificado), constata-se que ainda permanece disponível para a utilização de outros potenciais usuários de recursos hídricos que se aloquem na bacia o total de 99,454211% da  $Q_{95}$ , que representa a atual disponibilidade hídrica regional.

Apesar de aparentemente haver uma significativa disponibilidade hídrica na bacia do rio Itacaiunas, ilustrada pelo baixo número de usuários e incipiente vazão utilizada pelos mesmos, o que de fato ocorre é que por ser relativamente nova a obrigatoriedade da outorga para captação de água de mananciais superficiais, estabelecida pela resolução CERH nº 003 de 2008, certamente a grande maioria dos usuários de água da bacia ainda não buscou a legalização deste processo, o que faz

com que estes últimos não tenham suas vazões captadas contabilizadas no balanço hídrico, mascarando dessa forma a real disponibilidade, que passa a ser superestimada.

Dessa forma, torna-se evidente que para uma estimativa mais confiável e segura da disponibilidade hídrica regional, gerando bases mais concretas ao processo de gestão dos recursos hídricos, é necessária uma ação de regularização de usuários dos mananciais superficiais específica na bacia, que pode ser feita por meio de implementação do cadastro de usuário de recursos hídricos censitário, cuja finalidade é identificar os reais usuários de recursos hídricos existentes e iniciar o seu rito administrativo de regularização.

## 6.7 MUDANÇAS NO USO DA TERRA NA BACIA DO RIO ITACAIUNAS

A avaliação da dinâmica da paisagem da bacia do rio Itacaiunas foi feita utilizando cinco diferentes classes de uso da terra, conforme descrito na metodologia, entretanto, especial atenção deve ser dada às classes “vegetação” e “não-vegetação”, uma vez que mudanças ocorridas nestas classes é que podem determinar efeitos diretos no comportamento hidrológico da bacia.

Com base na figura 45 observa-se que no período 1987-88 a bacia estudada possuía áreas de “não-vegetação” (onde se inclui as áreas de afloramentos de rochas, urbanização e pastagens), localizadas predominantemente na região central da bacia e no eixo de orientação nordeste-sudoeste. Estas últimas, frequentemente, estavam localizadas no entorno das sedes municipais, com exceção de manchas de “não-vegetação” ocorrentes ao norte, que seguem o delineamento da malha hidrográfica (figura 46).

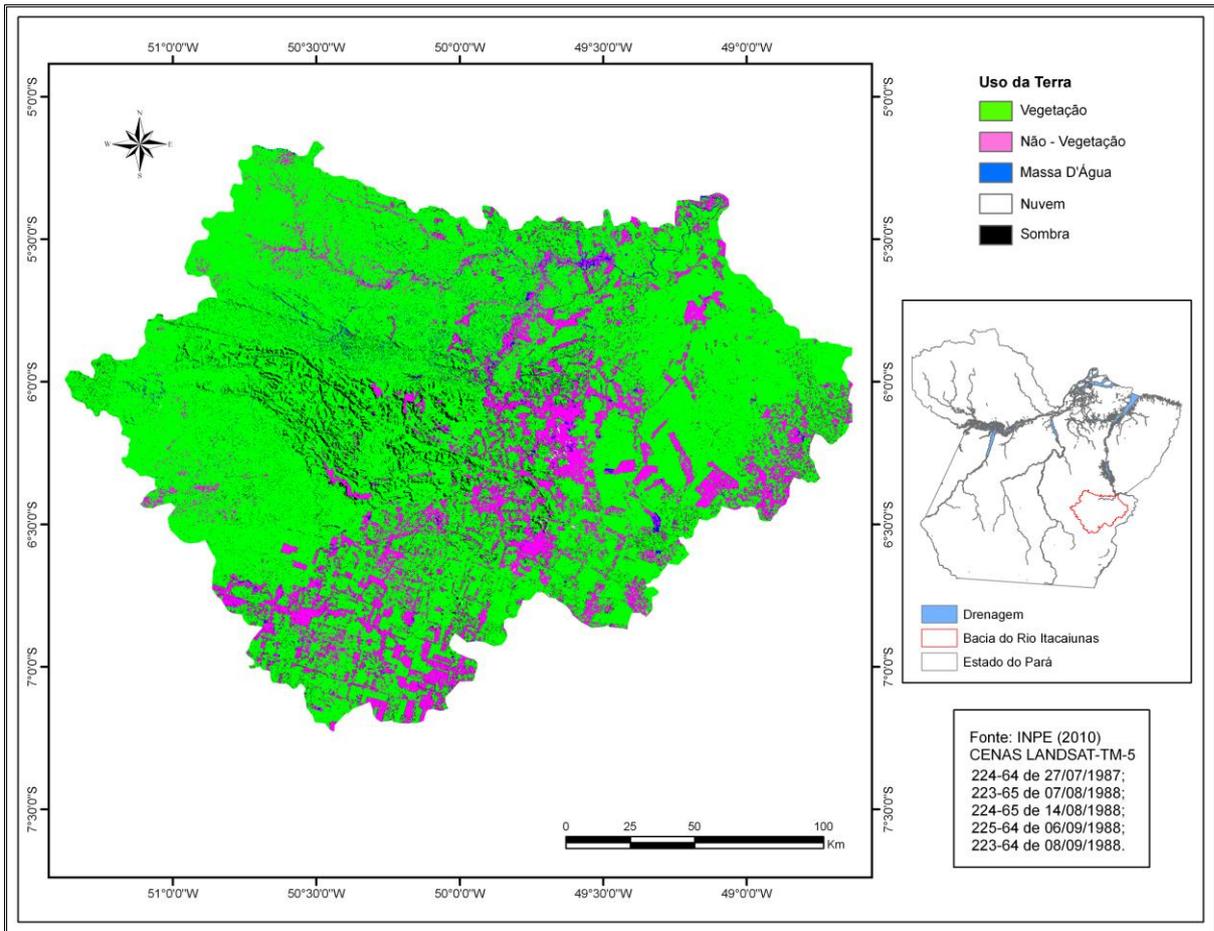


Figura 45: Uso da terra na bacia do rio Itacaiunas no período 1987-88

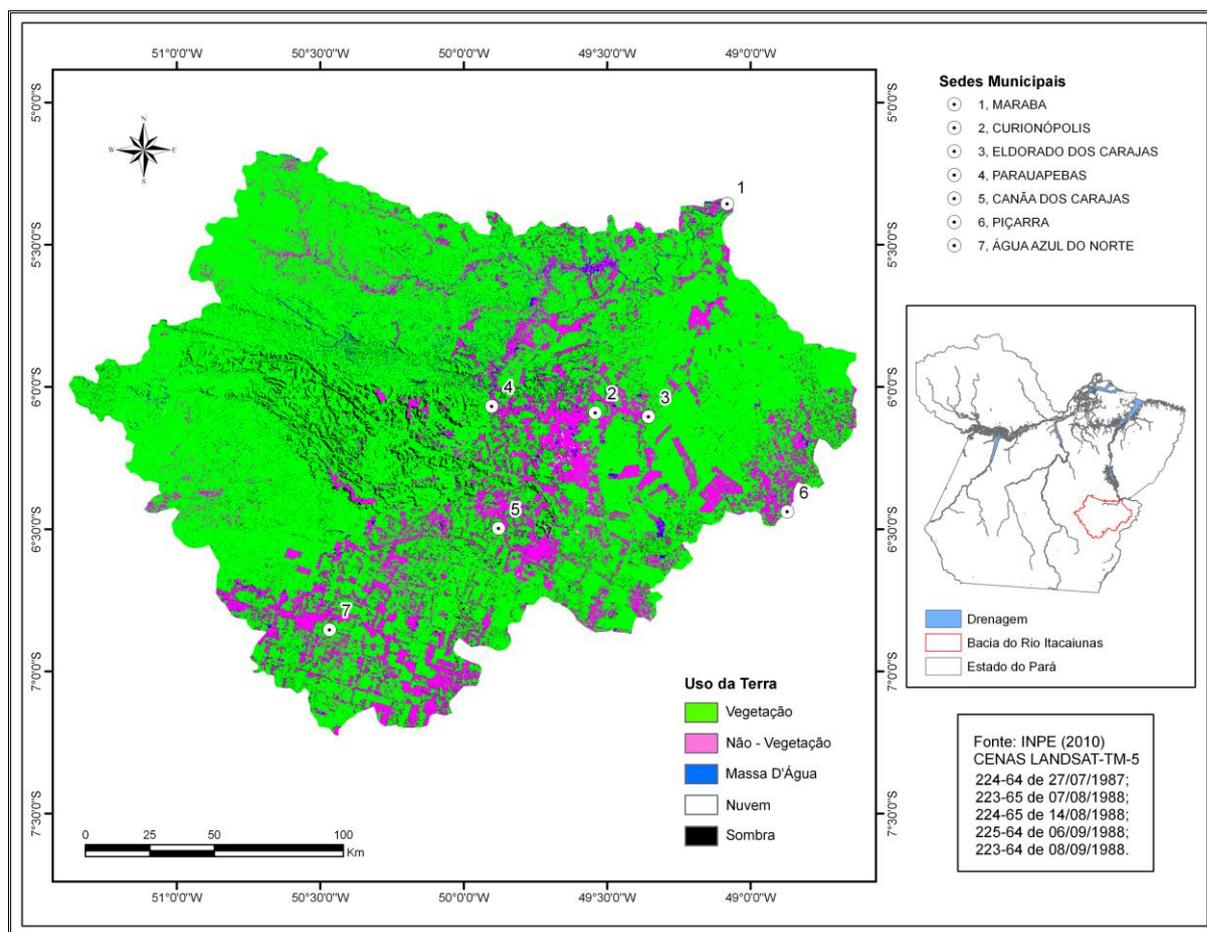


Figura 46: Uso da terra e sedes municipais no período de 1987-88 na bacia do rio Itacaiunas

Com base em interpretação visual, tomando-se como critério a geometria das áreas de “não-vegetação”, percebe-se também que muitas destas áreas apresentam formas regulares levando a inferir que o antropismo da bacia estava fortemente relacionado ao desenvolvimento de atividades agropecuárias. Sobretudo, se observar-se a localização geográfica dos municípios na unidade de estudo, de onde nota-se que o desflorestamento na bacia se concentra em alguns municípios onde historicamente a criação de gado bovino ocupa papel de destaque na economia local (IBGE, 2010), tais como Água Azul do Norte e Curionópolis.

Em contrapartida na região onde estão alocados os grandes projetos minerários da bacia, e o mosaico de unidades de conservação, as áreas de vegetação predominavam sobre as áreas alteradas, levando a crer que as UC's (unidades de conservação) de fato desempenhavam seu papel de proteção ecológica (figura 47). Analogamente, corrobora para o baixo nível de alterações observado nesta área, no período, a acessibilidade que é bastante comprometida e

infere grandes entraves de logística à região, fato que provavelmente dificultou o desflorestamento no período.

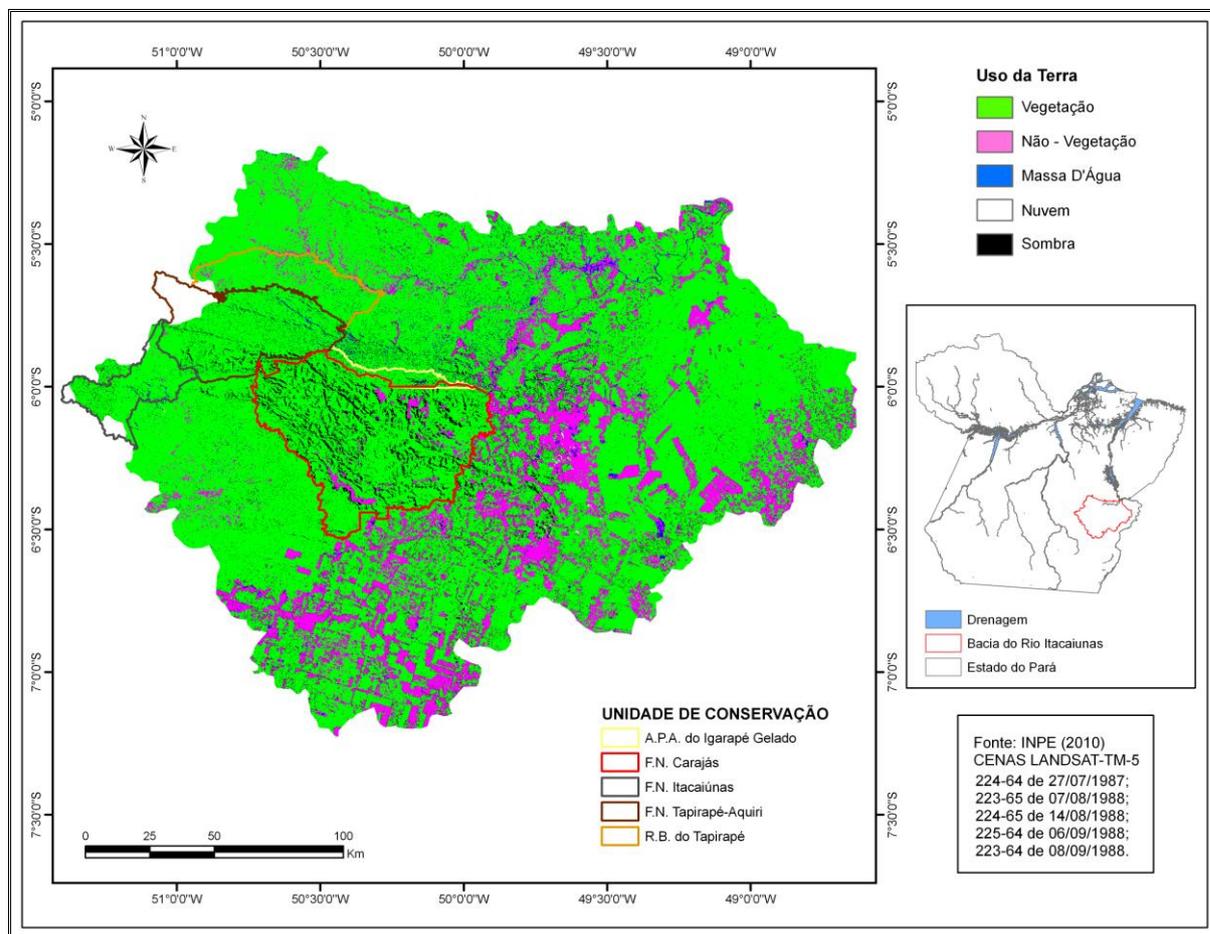


Figura 47: Uso da terra e UC's na bacia do rio Itacaiunas no período 1987-88

Outro aspecto interessante do ponto de vista da relação do uso da terra com a integridade hidrológica da bacia é que no período 1987-88 as áreas de maiores níveis de declividade da região (vide figura 20), que coincidem com as áreas onde se encontram as unidades de conservação, por apresentarem relativamente graus pouco significativos de antropismo têm seu potencial natural de erosão e/ou produção de sedimentos bastante atenuado, contribuindo para a manutenção das condições hidráulicas do rio Itacaiunas e tributários, ocorrentes neste setor, em particular.

As áreas em termos absolutos e relativos de cada uma das classes de uso da terra avaliadas no período 1987-88 são apresentadas na tabela 29.

Tabela 29: Uso da terra na bacia do Itacaiunas em 1987-88

<b>CLASSES</b>	<b>ÁREA (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>%ÁREA</b>
Vegetação	31157.76	77.58
Não-Vegetação	6089.97	15.16
Massa d' água	80.3	0.20
Nuvem	30.66	0.08
Sombra de Nuvem	730.58	1.82
Não-classificado	2071.82	5.16

No período a classe que apresentou os maiores valores de área correspondeu a “vegetação” com 31157,76 Km<sup>2</sup>, correspondendo a 77,58% da área da bacia. Note-se que nestes valores estão incluídos tanto aqueles relativos à floresta primária quanto floresta secundária não havendo diferenciação entre ambos.

A escolha pela não distinção entre ambos decorre que mesmo a capoeira, quando deixada em pousio, pode atingir um nível de desenvolvimento que se aproxima bastante de uma floresta primária, além de também desempenhar um importante papel no ciclo hidrológico, que não pode ser desprezado.

As áreas da classe “não-vegetação” contabilizaram 6089,97 Km<sup>2</sup>; 15,16% da bacia em termos percentuais. A maior parte destas correspondia a áreas de urbanização, sobretudo nas sedes municipais da bacia, e as áreas de fazendas localizadas nas periferias dos centros urbanos. As áreas de afloramentos de rochas apesar de terem sido incorporadas a classe “não-vegetação” na análise são em termos de abrangência bastante incipientes não contribuindo significativamente para os valores obtidos no período, haja visto, disporem de uma densa floresta cobrindo-as, gerando um bom nível de conservação.

A classe “massa d’água” apresentou valor de 80,3 Km<sup>2</sup>; 0,20% da área total. Contudo, é válido ressaltar que estes valores certamente encontram-se subestimados uma vez que por apresentar resolução espacial de 30 m, isto é, cada *pixel* na imagem representa uma área de 30 m por 30 m, o imageamento realizado pelo sensor Landsat TM-5 não consegue capturar os corpos hídricos que apresentam larguras menores que este valor, o que faz com que estes não possam ser identificados, o que leva estas áreas a não serem contabilizadas nos procedimentos de classificação.

Já as classes “nuvem” e “sombra de nuvem” apresentaram o menor percentual de áreas na imagem classificada no período, com valores da ordem de 0,08% (30,66 Km<sup>2</sup>) e 1,82% (730,58 Km<sup>2</sup>), respectivamente.

Já as regiões da imagem cujos *pixels* não apresentaram respostas espectrais que permitissem serem classificados nas respectivas classes de avaliação corresponderam a áreas de 2071,82 Km<sup>2</sup>; ou 5,16%.

Com relação ao ano final de avaliação, que corresponde à classificação da bacia do rio Itacaiunas realizada para 2005, observou-se uma mudança relativamente grande nas áreas abrangidas principalmente pelas classes “vegetação” e “não-vegetação” e na distribuição espacial destas últimas, quando comparada ao ano período inicial da análise (1987-88).

A partir da figura 48 pode-se observar claramente que o padrão anteriormente observado na distribuição espacial das áreas de “não-vegetação” foi potencializado substancialmente gerando uma considerável redução das áreas da classe “vegetação” no eixo nordeste-sudoeste da bacia.

Em decorrência deste fato, seguramente muitas áreas que foram sendo modificadas ao longo dos anos se aglutinaram, de tal forma, que apenas alguns poucos fragmentos de vegetação remanescente passaram a existir entre estas áreas levando-as a não mais apresentarem características geométricas que permitissem a distinção individual das mesmas na região, mas sim apenas manchas de antropização que se estendem por grandes áreas.

Desta maneira os focos principais de “não-vegetação” que estavam anteriormente localizados preferencialmente no entorno das sedes municipais da bacia se expandiram e passaram a não mais apresentar esta sistemática pontual, conforme mostrado na figura 49.

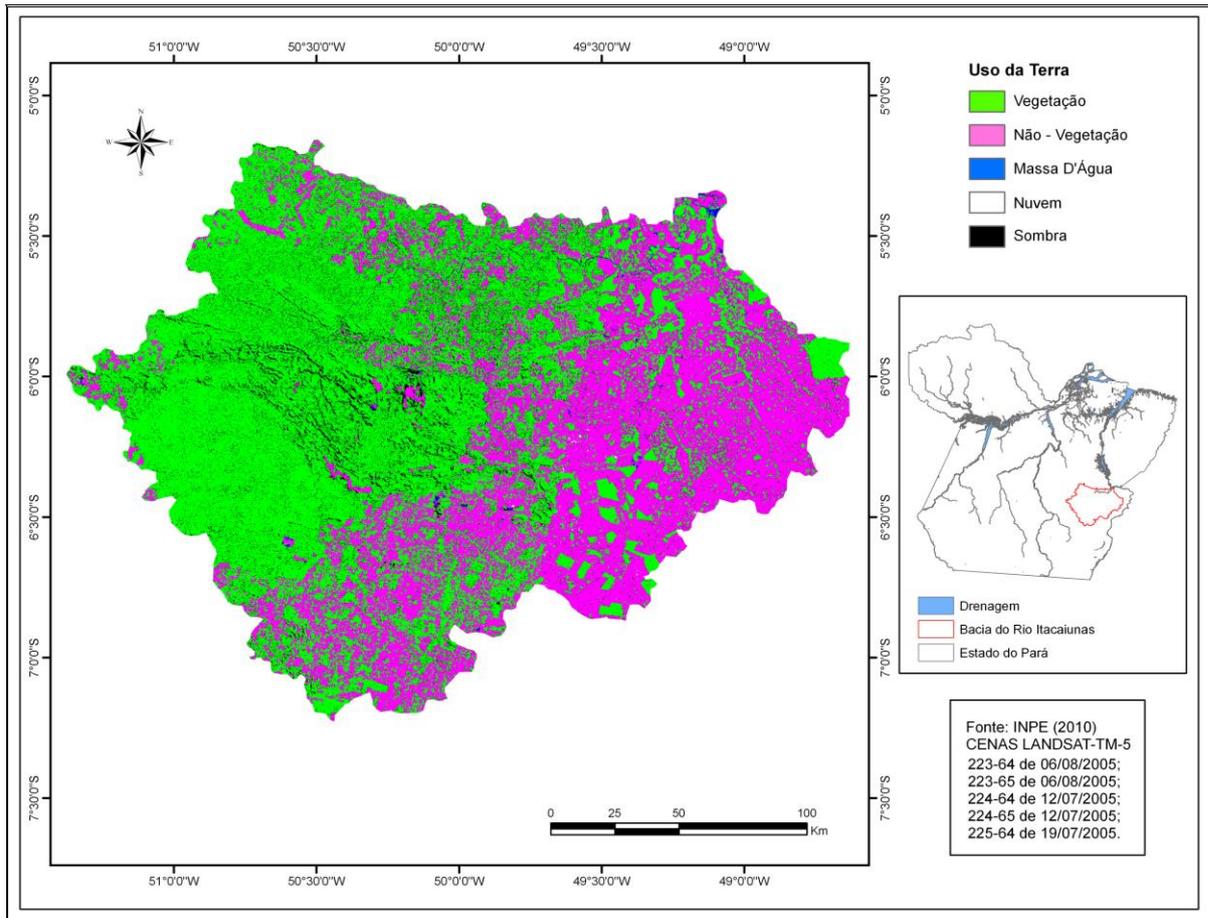


Figura 48: Uso da terra na bacia do rio Itacaiunas em 2005

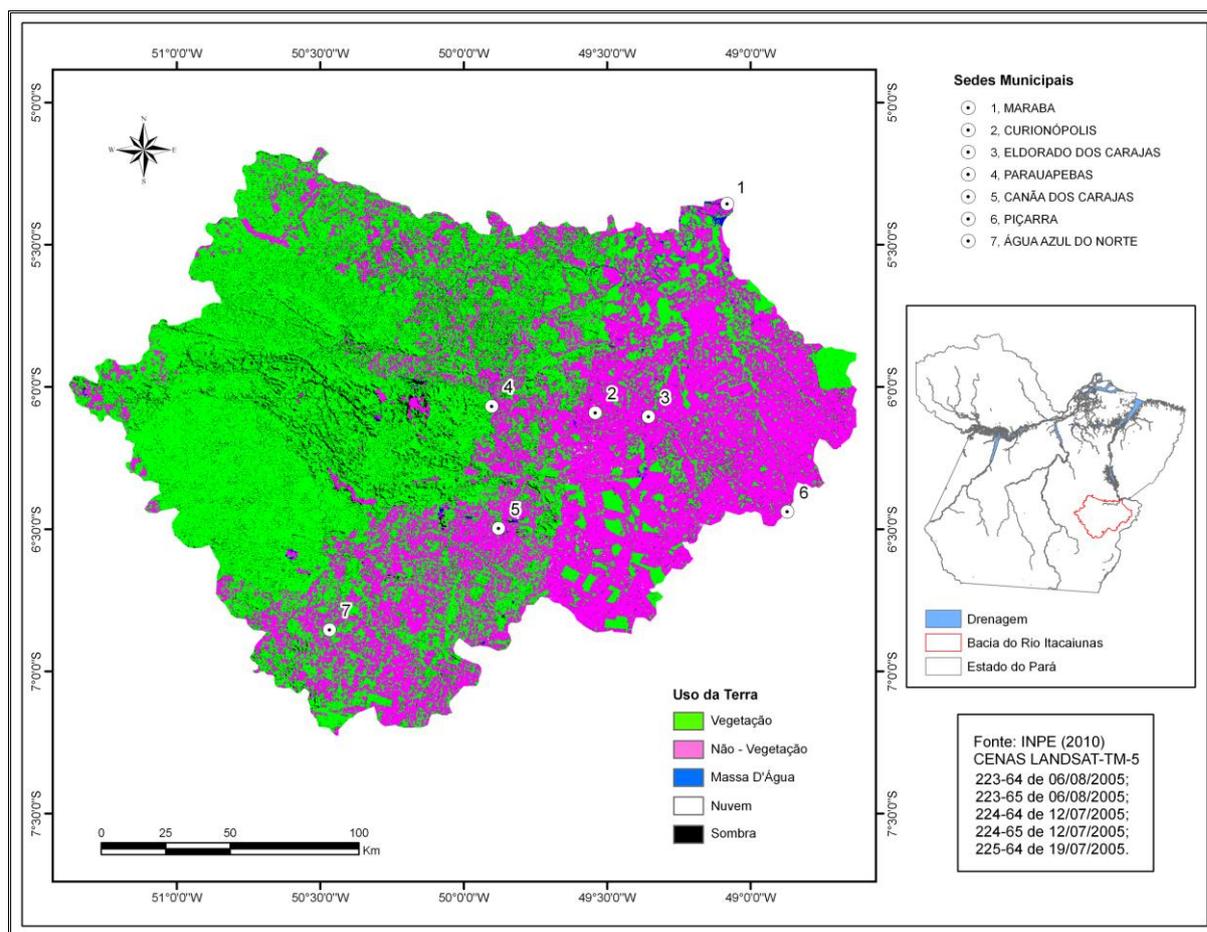


Figura 49: Uso da terra e sedes municipais em 2005 na bacia do rio Itacaiunas

Entretanto, nas áreas mais periféricas do eixo principal de antropização da bacia ainda é possível observar as formas regulares características de propriedades rurais, e mais especificamente de pastagens, de tal forma que é bastante plausível se supor que grande parte das alterações evidenciadas deve-se a verticalização da atividade agropecuária na região.

Um fator que concorre para a consolidação desta hipótese apoia-se na constatação de que um substancial acréscimo de antropismo na bacia claramente foi produzido nas áreas dos municípios de Eldorado dos Carajás, Água Azul do Norte e Curionópolis, que conforme mencionado anteriormente possuem economias fortemente apoiadas na atividade agropecuária.

Os municípios de Xinguara, Sapucaia, Piçarra e São Geraldo do Araguaia no primeiro período de avaliação visualmente apresentavam predominância de áreas de “vegetação” sobre as de “não-vegetação”, porém observando-se a região referente a 2005 constata-se que ocorreu uma profunda modificação na paisagem ao longo dos anos com “vegetação” agora ocorrendo limitada a poucos fragmentos

dispersos enquanto o antropismo prevalece substancialmente. Note-se que segundo dados do IBGE (2010), a exceção de Xinguara, todos os demais municípios possuem a agropecuária atualmente exercendo grande impacto no produto interno bruto local.

O contraponto do quadro de significativas alterações observadas na paisagem ficou por conta das áreas das unidades de conservação. Estas últimas ao longo dos anos sofreram antropismos bastante incipientes possuindo ainda uma abrangente área de vegetação inalterada levando-as por consequência a apresentar uma baixa propensão à erosão e produção de sedimentos, apesar de naturalmente apresentarem vocação a este processo, dados seus níveis de declividades mais elevados que no restante da bacia (figura 50).

Porém, na unidade de conservação federal Floresta Nacional do Itacaiunas é evidente a substituição de áreas de vegetação por outros usos, bastante pronunciada durante o horizonte da avaliação. Tal constatação gera certa preocupação sobre a integridade da biodiversidade e demais atributos ambientais da área já que por tratar-se de uma unidade de conservação, em tese o desenvolvimento de atividades humanas que promovem profundas alterações na paisagem não deveria ser permitido, inclusive sendo fortemente coibido por ações de fiscalização local.

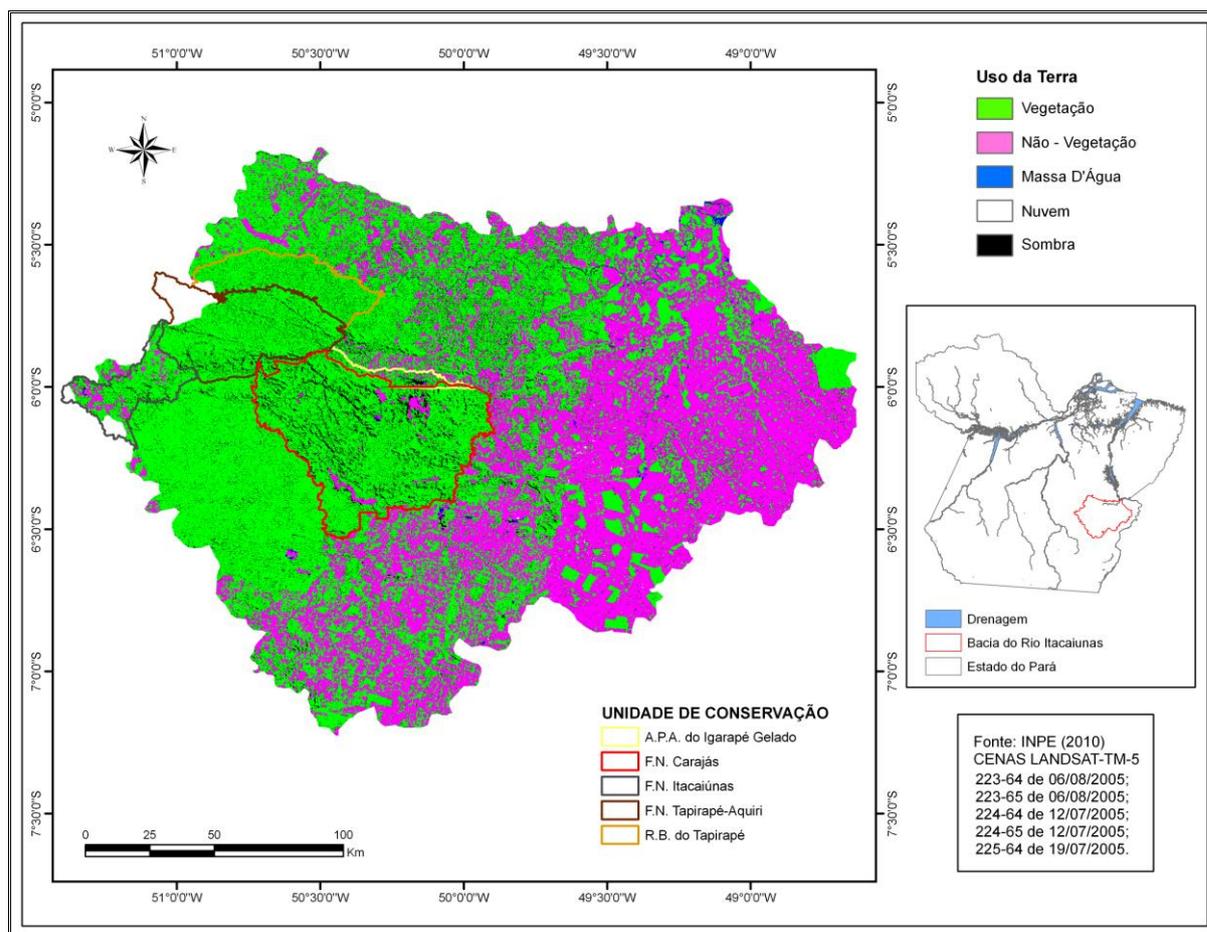


Figura 50: Uso da terra e UC's na bacia do rio Itacaiunas em 2005

Em valores a distribuição absoluta e relativa das classes de uso da terra da bacia do rio Itacaiunas obtida pela classificação para o ano de 2005, reportou os resultados apresentados na tabela 30.

Tabela 30: Uso da terra na bacia do Itacaiunas em 2005

CLASSES	ÁREA (Km <sup>2</sup> )	%ÁREA
Vegetação	22330.87	55.60
Não-Vegetação	14561.83	36.26
Massa d' água	84.7	0.21
Nuvem	28.57	0.07
Sombra de Nuvem	796.82	1.98
Não-classificado	2360.07	5.88

A classe “vegetação” na bacia estudada passou de uma área de abrangência de 77,58% em 1987-88 para 55,6% (22330.87 Km<sup>2</sup>) em 2005, representando uma retração de 8826,89 Km<sup>2</sup>. Estes valores refletem a virtual perda de cobertura vegetal (desflorestamento) observada, sobretudo no eixo nordeste-sudoeste da bacia, comentado anteriormente.

Antagonicamente, a classe “não-vegetação” que em 1987 representava 15,16% da área da bacia passou a 36,26%; correspondendo a uma área de 14561,83 Km<sup>2</sup>. Em termos de área houve um acréscimo na classe da ordem de 21,09%.

Este incremento está diretamente relacionado à intensa antropização observada nas mesmas áreas onde houve retração da floresta por pressão das atividades econômicas que sofreram forte verticalização na região.

Ressalta-se que a antropização das áreas antes ocupadas por vegetação é que foram determinantes neste processo já que as áreas de afloramentos de rochas não sofreram modificações que pudessem ser observadas na classificação.

As áreas correspondentes à classe “massa d’ água” como previsto apresentaram pouca variação representando em termos absolutos uma área mapeada de 84,7 Km<sup>2</sup> (0,21% da área total da bacia), contabilizando uma variação de 0,01% comparada ao período inicial da avaliação. É válido destacar que as mesmas limitações para o mapeamento da classe “massa d’ água” referentes aos produtos de sensoriamento remotos utilizados na classificação da bacia para o período 1987-88 também estiveram presentes no ano final.

Da mesma forma as classes “nuvem” e “sombra de nuvem” sofreram variações pouco significativas na classificação para a bacia em 2005, quando comparadas à classificação de 1987-88. Em termos de áreas estas classes ocuparam 0,07% (28,57 Km<sup>2</sup>) e 1,98% (796,82 Km<sup>2</sup>).

As regiões não classificadas na bacia em 2005, totalizaram 5.88% da área da unidade fisiográfica.

Apesar das áreas de maior fragilidade física na bacia estarem relativamente bem protegidas, em virtude do intenso processo de antropização evidenciado no período de análise (cujo percentual fica em torno de 21%), sobretudo no eixo que segue de nordeste a sudoeste da bacia, cria-se um panorama de grande risco à manutenção das condições hidráulicas e hidrológicas da unidade, dado a intensidade e velocidade em que se deram estas mudanças na cobertura da terra.

O papel determinante da vegetação nas condições e processos hidrológicos em bacias hidrográficas pôde ser atestado por Cardoso et al. (2006b), onde através de caracterização do comportamento hidrológico da bacia do rio Debossan (RJ) evidenciaram que a capacidade de retenção de água da floresta no solo provocou

efeito-tampão, amenizando os picos de vazão nos períodos de alta pluviosidade, o que reforça a dimensão da problemática discutida.

Ainda se considerar-se que o desflorestamento da bacia ocorreu predominantemente na região onde estão localizadas as principais sub-bacias (Sororó, Vermelho e Parauapebas), que são importantes elementos na dinâmica fluvial da bacia principal, o risco de avanço de um processo de erosão/deposição nestas unidades torna-se bastante preocupante, podendo levar a efeitos negativos na disponibilidade hídrica regional pelo assoreamento da rede hidrográfica, dado que segundo Cardoso et al. (2006a) a remoção da vegetação em um ambiente florestal leva conseqüentemente a processos erosivos, gerando degradação ambiental.

Também corrobora para ressaltar a importância desta problemática o fato de que o processo de transporte, deposição e sedimentação de partículas que é regido pela força que tem a água de escoamento superficial na remoção de material dos solos, ocorre de maneira mais intensa num terreno exposto, levando a intensa degradação da paisagem (PISSARRA; POLITANO; FERRAUDO, 2004).

Neste sentido o fomento a atividades econômicas que promovam a redução do desflorestamento da área, tais como reflorestamento, assim como uma ação mais efetiva dos poderes público estadual e municipal no sentido de planejar e orientar o processo de ocupação do solo na região são ações que poderiam certamente atenuar a problemáticas associadas às mudanças ocorridas na paisagem regional, melhorar as condições ambientais da bacia e garantir a disponibilidade hídrica necessário ao desenvolvimento das atividades econômicas da região.

## 7 CONCLUSÃO

A bacia hidrográfica do rio Itacaiunas constitui uma unidade fisiográfica de grandes dimensões, possuindo área de mais de 40000 Km<sup>2</sup>, abarcando municípios onde se encontram alocados alguns segmentos de usuários de água mais importantes da região sudeste do Pará, como Marabá e Parauapebas.

Quanto aos aspectos morfométricos de maneira geral na bacia predominam baixos e médios níveis de altitudes e declividades, à exceção de algumas áreas onde ocorrem acidentes geográficos, tais como a Serra de Carajás, em que foram identificados os maiores declives e níveis hipsométricos.

O clima mais seco, quando comparado com outras regiões do Estado, associado à geologia formada predominantemente por rochas cristalinas exerce forte efeito na malha hidrográfica da bacia, levando-a a apresentar muitos cursos d'água intermitentes, o que produz um baixo nível de densidade de drenagem. Entretanto, este cenário parece estar muito mais relacionado à base vetorial utilizada nos procedimentos metodológicos de cálculo do parâmetro do que aos fatores naturais propriamente ditos.

Do ponto de vista hidrográfico à hierarquização realizada concluiu que a bacia constitui uma unidade de quinta ordem de magnitude (método de Strahler) enquanto suas sub-bacias principais pertencem à ordem quatro.

O esforço de regionalização física das principais sub-bacias revelou haver um padrão comum de distribuição de frequências de altitudes e declividades entre as classes definidas para ambos os parâmetros, levando-as a serem consideradas como unidades fisicamente homogêneas, para efeito deste estudo.

Com relação ao comportamento climático das sub-bacias estudadas, os volumes totais precipitados durante o período do estudo não apresentou variação estatisticamente significativa. Dessa forma, também se pôde concluir que climaticamente as sub-bacias constituem unidades fisiográficas homogêneas.

Dado a homogeneidade das principais sub-bacias, comprovada por meio da regionalização física e climática, foram obtidas as vazões regionais com maior confiabilidade de serem representativas do contexto integral da bacia do rio Itacaiunas, que desta forma pôde ser assumida como uma unidade hidrologicamente homogênea.

Dentre os sete modelos probabilísticos ajustados aos dados de vazão máxima, mínima e média referentes a período seco na bacia do rio Itacaiunas os que apresentaram a melhor aderência aos dados hidrológicos foram respectivamente Pearson 3, Log-Pearson 3 e Log-Normal 2.

As vazões de sete dias consecutivos e dez anos de referência máxima, média e mínima projetadas pelos cenários dos modelos probabilísticos com os melhores ajustes para o período seco foram 2415,11; 900,281 e 37,2027 m<sup>3</sup>/s; respectivamente.

Já no período chuvoso os modelos que representam melhor o comportamento hidrológico da bacia com vistas as vazões máxima, mínima e média são Pearson 3, Normal e Pearson 3, respectivamente.

Os modelos apresentaram nos respectivos cenários para as vazões máxima, mínima e média de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência no período chuvoso valores da ordem de 3013,44; 41.2516 e 930,027 m<sup>3</sup>/s; respectivamente.

A curva de permanência regional reportou o valor de 85,7 m<sup>3</sup>/s para a vazão de referência Q<sub>95</sub> global da bacia. Pôde também concluir que a dinâmica mensal desta vazão está fortemente relacionada à sazonalidade com os menores valores sendo registrados de Abril à Setembro, e os maiores de Outubro à Março.

Nos limites da bacia estudada estão presentes oito usuários de recursos hídricos, que respondem conjuntamente por um impacto da ordem de 0,545789% da Q<sub>95</sub> regional, o que por sua vez indica que ainda há uma disponibilidade hídrica remanescente para outorga na bacia de 99.454211%.

Contudo, esta disponibilidade não representa de fato a real disponibilidade hídrica regional, uma vez que é sabido que um grande número de usuários de águas superficiais da região ainda não estão devidamente outorgados, levando o balanço hídrico da bacia a não contabilizar as vazões retiradas dos mananciais por estes últimos.

Decorre então que a disponibilidade hídrica encontrada está na verdade superestimada. Porém, a partir da implementação de ações de regularização dos usuários de recursos hídricos da bacia, esta situação pode ser modificada e o déficit de informações atenuado, podendo gerar condições mais favoráveis à uma gestão das águas mais eficiente.

Apesar da análise hidrológica ter reportado resultados satisfatórios é válido ter em mente que o baixo número de postos de controle hidrológico, fluviométricos e

pluviométricos, na bacia limitou substancialmente o número de dados disponíveis para a investigação científica o que foi determinante nos valores das vazões de sete dias consecutivos e dez anos de recorrência e vazão  $Q_{95}$  regional obtidos.

Dessa forma é altamente recomendável que sejam instalados futuramente um maior número de postos, tanto fluviométricos quanto pluviométricos, na bacia a fim de que ao longo do tempo possam estar disponíveis um maior volume de dados, que poderão subsidiar melhor outros estudos hidrológicos posteriores. Além de contribuir substancialmente para otimizar o processo de gestão dos recursos hídricos da região.

Em relação à dinâmica da paisagem da bacia, a investigação das alterações do uso/ocupação do solo na unidade no horizonte projetado revelou a ocorrência de uma substancial retirada da cobertura vegetal, sobretudo no eixo nordeste-sudoeste, tendo chegado a cerca de 21% o grau de antropização da bacia. Porém, áreas com maior fragilidade física encontram-se relativamente bem preservadas com densa cobertura florestal atenuando um pouco a problemática.

Em virtude das áreas com maior comprometimento da cobertura vegetal da bacia localizar-se exatamente onde estão presentes as principais sub-bacias da bacia principal cria-se um panorama de risco a manutenção da integridade hidráulica e hidrológica da bacia, podendo comprometer futuramente a disponibilidade hídrica regional, de forma que ações de restauração florestal e ordenamento territorial tornam-se imprescindíveis para a mitigação da problemática em questão.

Com base no conhecimento sobre a dinâmica de ocupação da bacia principal e sub-bacias, e no padrão das variáveis físicas e climáticas na região pode-se concluir que somente as variáveis hidrológicas não são suficientes para explicar o comportamento hidrológico da unidade, mas sim a sinergia entre todos os componentes ambientais estudados, de forma que analogamente os critérios de vazão de referência para outorga ( $Q_{95}$ ), assim como a vazão remanescente (vazão ecológica) devem ser revistos, de forma a incorporar estes elementos nos critérios de análise e decisão para emissão da outorga para captação, otimizando assim a gestão das águas no Estado do Pará.

Também é importante ressaltar que em virtude dos processos naturais (ciclos biogeoquímicos e suas complexas relações entre os ambientes terrestres e aquáticos) e antrópicos (mudança no uso ocupação da terra, lançamentos de efluentes domésticos e industriais nos mananciais superficiais, etc...) modificarem

além da disponibilidade hídrica quantitativa a qualitativa das bacias hidrográficas é conveniente que sejam realizados estudos posteriores para avaliar como as águas da bacia do rio Itacaiunas têm sido afetadas quanto à sua composição química à luz destes fatores, temporal e espacialmente.

Assim como, é igualmente relevante que sejam realizados estudos posteriores mais abrangentes do clima regional, de forma a evidenciar se as mudanças na paisagem, em curso na bacia, tem gerado tendências a modificação dos padrões climáticos regionais, que podem futuramente modificar profundamente o comportamento hidrológico da bacia, caso não sejam tomadas medidas de contenção ao desflorestamento da unidade fisiográfica em questão.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório estatístico da rede hidrometeorológica básica nacional**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em 20 de Abril. 2009a.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Ottobacias trecho por trecho**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/portalsnirh/Downloads/tabid/77/Default.aspx>>. Acesso em 21 de Julho. 2009b.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Sistema de informações hidrológicas hidroweb**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em 21 de Abril. 2009c.

AGRA, S. G. et al. Metodologias de regionalização de vazões: estudo comparativo na bacia do rio Carrero-RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15. 2003, Curitiba. **Anais....** Curitiba: ABRH, 2003. p. 1-20.

ALCÂNTARA, E. H.; AMORIM, A. de J. Análise morfométrica de uma bacia hidrográfica costeira: um estudo de caso. **Caminhos de Geografia**. v. 7, n. 14, p. 70-74. fev. 2005.

ALMEIDA, A. Q. de et al. Análise multivariada de fatores climáticos no Estado do Espírito Santo, Parte II: definição de sítios ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. 2007, Natal. **Anais....** Natal: INPE, 2009. p. 23-29.

ANDERSON, L. O.; ROJAS, E. H. M.; SHIMABUKURO, Y. E. Avanço da soja sobre os ecossistemas Cerrado e Floresta no Estado do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. 2003, Belo Horizonte. **Anais....** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 19-25.

ANDRADE-JÚNIOR, A. S de et al. Classificação climática e regionalização do semi-árido do Estado do Piauí sob cenários pluviométricos distintos. **Revista Ciência Agronômica**. v. 36, n. 2, p. 143-151, mai/ago. 2005.

ANDRÉ, R. G. B. et al. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no estado do Rio de Janeiro, utilizando valores mensais. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 23, n. 4, p. 501-509. 2008.

AYRES, M. et al. **Bioestat 3.0**: aplicações estatísticas nas áreas biológicas e médicas. Belém: Sociedade Mamirauá. Brasília CNPq. 2003. 290 p.

BAENA, L. G. N. et al. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. **Eng. Agríc.** v. 24, n. 3, p. 612-624. set/dez. 2004.

BARBOSA, I. M. B. R. **Contribuição aos estudos de regionalização de vazões a partir do conhecimento do meio físico - estudo de caso**: Bacia do Rio São Francisco. 2002. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 2002.

BARBOSA, S. E. da S et al. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínima de sete dias para a bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 10, n. 1., p. 64-71, jan/mar. 2005.

BARBOSA, F. L. R. et al. Delimitação de otobacias a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do Verde Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. 2007, Florianópolis. **Anais....** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3271-3278.

BARROS, M. de L. C.; BARP, A. R. B. Modelo numérico: análise de viabilidade de aproveitamentos múltiplos em bacias hidrográficas. **Traq.**, Belém, v. 5, n. 10, p. 21-26, dez. 2002.

BOLFE, E. L. et al. Avaliação de classificação digital de povoamentos florestais em imagens de satélite através de índice de acurácia. **R. Árvore.** v. 28, n. 1, p. 85-90. 2004.

BORGES, M. E. S. et al. Emprego do processamento digital dos parâmetros morfométricos no mapeamento geomorfológico da bacia do Rio Preto. **Espaço & Geografia.** v. 10, n. 2, p. 401-429. 2007.

BRAVO, J. M. et al. Regionalização de curvas de intensidade, duração e frequência de precipitação: aplicação ao Distrito Federal. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICO DO SUL-SUDESTE, 2. 2008, Rio de Janeiro. **Anais....** Rio de Janeiro: ABRH, 2008. p. 1-17.

BRUSA, L. C. **Aprimoramento estatístico da regionalização de vazões máximas e médias**: aplicação a bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 2004. 341 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2004.

CANEPARO, S. C. Análise da dinâmica espacial da ocupação antrópica em Paranaguá/PR (1952-1996), através do uso de sistemas de informações geográficas. **R. RA'EGA**. n. 4, p. 111-130. 2000.

CARDOSO, C. A. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **R. Árvore**. v. 30, n. 2, p. 241-248. 2006a.

CARDOSO, C. A. et al. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**. v. 30, n. 2, p. 249-256. 2006b.

CARNEIRO, M. S. crítica social e responsabilização empresarial: análise das estratégias para a legitimação da produção siderúrgica na Amazônia Oriental. **Caderno CRH**. v. 21, n. 53, p. 323-336, mai-ago. 2008.

CATELANI, C. de S.; BATISTA, G. T.; PEREIRA, W. F. Adequação do uso da terra em função da legislação ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. 2003, Belo Horizonte. **Anais....** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 559-566.

CHAVES, H. M. L. et al. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informação geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 7, n. 3, p. 43-51, jul/set. 2002.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2ª ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1980. 188 p.

COELHO, A. L. N. Modelagem hidrológica da bacia do rio Doce (MG/ES) com base em imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). **Caminhos de Geografia**. v. 8, n. 22, p. 116-131. set. 2007.

COELHO, M. C. N.; RIO, G. A. P. do; MIRANDA, E. de A. Trajetórias históricas das duas mineradoras da Amazônia: CVRD e CAEMI/ANTUNES. **Regiões e Cidades**. v. 1, n. 1, p. 30-69, out. 2008

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 2008. p. 14.

CÓRDOVA, R. N.; PINHEIRO, A.; PINHEIRO, I. G. Regionalização da curva de permanência como base para o gerenciamento da bacia do Itajaí. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27. 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2000. p. 1-7.

COSTA, T. C. e C. da et al. Vulnerabilidade ambiental em sub-bacias hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro por meio de integração temática da perda de solo (USLE), variáveis morfométricas e o uso/cobertura da terra. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 2493-2500.

CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia do Brasil**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 392 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Programa Brasil em Relevo**. CNPM. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>>. Acesso em 17 de Agosto. 2009.

EUCLYDES, H. P.; RIBEIRO, C. A. S. Uso de geoprocessamento como ferramenta auxiliar na regionalização hidrológica na bacia do Alto rio Purus, Estado do Amazonas. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO CENTRO-OESTE, 2. 2002, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2002.

EUCLYDES, H. P. (Org). **Atlas das Águas de Minas: uma ferramenta para o planejamento e gestão dos recursos hídricos**. 2ª ed. Belo Horizonte: Governo do Estado de Minas Gerais, 2005. 78 p.

EUCLYDES, H. P. et al. Regionalização hidrológica na região hidrográfica Capixaba, compreendida entre os limites da bacia do rio Doce e do rio Itabapoana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTRO-OESTE, 1. 2007, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABRH, 2007. p. 1-19.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, III., 2004, Manaus. **Anais...** Manaus: SBPC, 2004. p. 1-2.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazonica**. v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FECHINE, J. A. L.; GALVÍNCIO, J. D. Agrupamento da precipitação mensal da bacia hidrográfica do rio Brígida-PE, através da multivariada. **Revista Brasileira de Geografia**. v. 01, n. 01, p. 39-46. mai/ago. 2008a.

FECHINE, J. A. L.; GALVÍNCIO, J. D.; Análise das precipitações mensais da bacia hidrográfica do rio Brígida no semi-árido pernambucano, usando o método de Wards. **Boletim Goiano de Geografia**. v. 28, n. 2, p. 75-88. ju/dez. 2008b.

FERNANDES, W. dos S. **Metodologia unificada para análise de frequência de vazões máximas anuais a partir da agregação da informação hidrometeorológica regionalizada**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

FERRAZ, F. F. de B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informação geográfica: um estudo de caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**. v. 14, p. 45-56. nov. 1999.

FERREIRA, M. C.; MORETI, E. Um indicador de degradação de bacias hidrográficas obtido a partir de modelos digitais de terreno e dados orbitais em ambiente de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. 1998, Santos. **Anais....** Santos: INPE, 1998. p. 549-560.

FIGUEIREDO, A. P.; OLIVEIRA, L. F. C.; FRANCO, A. P. B. Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil. **Revista Água & Ambiente – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 3, n. 2, p. 62-67, 2008.

FREITAS FILHO, L. da S. **Prospecção de água subterrânea no município de Novo Repartimento-PA aplicando métodos elétricos e eletromagnéticos**. 2006. 51 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

FURLAN, D. N. **Variabilidade temporal e espacial das chuvas e do balanço hídrico no estado de Rondônia: caracterização e análise de tendência**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

GOMIG, K.; LINDNER, E. A.; KOBIYAMA, M. Áreas de influência das estações pluviométricas na bacia do rio Peixe/SC pelo método de polígonos de Thiessen utilizando imagem de satélite e sig. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. 2007, Florianópolis. **Anais....** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3373-3380.

HOTT, M. C.; FURTADO, A. L. S.; RIBEIRO, C. A. A. S. Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas – SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. 2007, Florianópolis. **Anais....** Florianópolis: INPE, 2007. p. 3381-3388.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Biblioteca de imagens Landsat**. Disponível em: <<http://www.inpe.gov.br>>. Acesso em 09 de Janeiro. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em 21 de Fevereiro. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Temas vetoriais**. Disponível em: <<http://siscom.ibama.gov.br/shapes/>>. Acesso em 08 de Março. 2010.

KELLER FILHO, T.; ASSAD, E. D.; LIMA, P. R. S. de R. Regiões pluviometricamente homogêneas no Brasil. **Pesq. Agrop. Bras.** v. 40, n. 4, p. 311-322. abr. 2005.

LEMOS, A. F. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

LINHARES, C. de A. **Influência do desflorestamento na dinâmica da resposta hidrológica na bacia do rio Ji-Paraná/RO**. 2006. 217 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

LOBÃO, J. S. B.; VALE, R. de M. C. Microbacias na região do parque estadual de Morro do Chapéu (PEMC): um modelo em SIG para análise ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. 2007, Florianópolis. **Anais....** Florianópolis: INPE, 2007. p. 2769-2776.

LORENA, R. B. **Evolução do uso da terra em porção da Amazônia Ocidental (Acre), com uso de técnicas de detecção de mudanças**. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

LUCHIARI, A. Identificação da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de produtos de sensoriamento remoto e de um sistema de informação geográfica. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 14, p. 47-58. 2001.

LYRA, G. B. et al. Regiões homogêneas e funções de distribuição de probabilidade de precipitação pluvial no estado de Táchira, Venezuela. **Pesq. Agropec. bras.** v. 41, n. 2, p. 205-215. fev. 2006.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 27, p. 727-733. 2003.

MARACAJÁ, J. R. de A. **Previsão regionalizada de vazão sazonal utilizando redes neurais artificiais**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Campina Grande/Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2005.

MARTIN, T. N. et al. Homogeneidade espaço-temporal e modelos de distribuição para a precipitação pluvial no estado de São Paulo. **Revista Ceres** v. 55, n. 5, p. 476-481. 2008a.

MARTIN, T. N. et al. Regiões homogêneas e tamanho de amostra para atributos do clima no Estado de São Paulo, Brasil. **Ciência Rural**. v. 38, n. 3, p. 690-697. mai/jun. 2008b.

MELO-JÚNIOR, J. C. F. de et al. Determinação de regiões homogêneas quanto à distribuição de frequências de chuvas no leste do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, n. 2, p. 408-416. 2006.

MILANEZ, B.; PORTO, M. F. de S. A ferro e fogo: impactos da siderurgia para o ambiente e a sociedade após a reestruturação dos anos 1990. In: ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS, IV., 2008, Brasília. **Anais....** Brasília: ANPPAS, 2008. p. 1-20.

MONCERATT, A. E.; PINTO, S. dos A. F. Caracterização e adequação do uso da terra utilizando técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. 1996, Salvador. **Anais....** Salvador: INPE, 1996. p. 207-209.

MONTEIRO, M. de A. Mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. **Novos Cadernos NAEA**. v. 8, n. 1, p. 141-187, jun. 2005.

MORA, V. B. **Morfometria da bacia hidrográfica do rio Bobo, Estado de Nariño, Colômbia**. 2008. 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista/Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2008.

MOREIRA, M. C. **Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

MOURA, R. S. et al. Caracterização fisiográfica da microbacia do córrego Água da Bomba no município de Regente Feijó-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 16. 2006, Goiânia. **Anais....** Goiânia. 2006. p. 1-7.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NASCIMENTO, M. C. do et al. Delimitação automática de áreas de preservação (APP) e identificação de conflito de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Alegre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. 2005, Goiânia. **Anais....** Goiânia: INPE, 2005. p. 2289-2296.

NASCIMENTO, M. C. do et al. Mapeamento dos fragmentos de vegetação florestal nativa da bacia hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo, a partir de imagens do satélite IKONOS II. **R. Árvore**. v. 30, n. 3, p. 389-398. 2006.

NOVAES, L. F. de. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Pacatatu**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NOVO, E. M. L. de M. (Ed.). **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Blucher, 2008. 363 p.

NUNES, B. de A. et al. **Manual técnico de Geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Ambientais, 1994. 113 p.

OBREGON, E.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUN, J. A. Regionalização de vazões com base em séries extendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 4, n. 1, p. 57-75. jan/mar. 1999.

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da bacia do rio Grande**. 2008. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ORTIZ, J. L.; FREITAS, M. I. C. de. Mapeamento do uso da terra, vegetação e impactos ambientais por meio de sensoriamento remoto e geoprocessamento. **Geociências**. v. 24, n. 1, p. 91-104. 2005.

PAULO, R. G. F. de. **Ferramentas para a determinação de vazões ecológicas em trechos de vazão reduzida: destaque para aplicação do método do perímetro molhado no caso de Capim Branco I**. 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

PEREIRA, N. R.; SCHUBACK, P. D.; CARVALHO-JÚNIOR, W. O uso de técnicas de geoprocessamento na detecção de áreas de incompatibilidade de uso, com base na aptidão agrícola das terras e o uso atual-Estudo aplicado no município de Engenheiro Paulo Afonso de Frontin- RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. 1998, Santos. **Anais....** Santos: INPE, 1998. p. 59-69.

PERTEL, M. et al. Utilização de métodos hidrológicos para avaliação de vazões residuais na bacia hidrográfica do rio Itapemirim. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24. 2007, Belo Horizonte. **Anais....** Belo Horizonte: ABES, 2007. p. 1-14.

PINTO, S. dos A. F.; GARCIA, G. J. Experiência de aplicação de geotecnologias e modelos na análise de bacias hidrográficas. **Revista do Departamento de Geografia**. v. 17, p. 30-37. 2005.

PINTO, L. V. A. et al. Caracterização física da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG e uso conflitante da terra em suas áreas de preservação permanente. **Cerne**. v. 11, n. 1, p. 49-60. jan/mar. 2005.

PINTO, J. A. de O. **Avaliação de métodos para a regionalização de curvas de permanência de vazões para a bacia do rio das Velhas**. 2006. 219 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PIROLI, E. L. et al. Análise do uso da terra na microbacia do Arroio do Meio-Santa Maria-RS, por sistema de informações geográficas e imagem de satélite. **Ciência Rural**. v. 32, n. 3, p. 407-413. 2002.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP). **R. Bras. Ci. Solo**. v. 28. p. 297-305. 2004.

PORTO, M. M.; ANDRADE, E. M. de; COSTA, R. N. T. Identificação de bacias hidrográficas com características físicas similares no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**. v. 35, n. 1, p. 17-25. jan/jun. 2004.

PRUSKI, F. F. et al. Precipitação média mensal anual e vazão específica média de longa duração, na bacia do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 8, n. 2/3, p. 247-253. 2004.

RENNÓ, C. D. **Construção de um Sistema de Análise e Simulação Hidrológica: Aplicação a Bacias Hidrográficas**. 2004. 146 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. O desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **R. Árvore**. v. 29, n. 2, p. 203-212. 2005.

RIBEIRO, C. B. de M.; MARQUES, F. de A.; SILVA, D. D. da. Estimativa e regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do rio Doce. **Engenharia na Agricultura**.v. 13, n. 2, p. 103-117. abr/jun. 2005

ROCHA, E. J. P. da (Org). **Zoneamento Climático**: relatório preliminar. Belém: 2009. 31 p.

RODRIGUES, J. B. T.; ZIMBACK, C. R. L.; PIROLI, E. L. Utilização de sistema de informação geográfica na avaliação do uso da terra em Botucatu (SP). **R. Bras. Ci. Solo**. v. 25, p. 675-681. 2001.

RODRIGUEZ, R. del G. **Proposta conceitual para regionalização de vazões**. 2008. 195 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

SANSIGOLO, C. A.; PEREIRA, C. S.; SILVA, I. R. da. Relações entre as precipitações regionais no sul do Brasil e as temperaturas da superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 19, n. 1, p. 5-11. 2004.

SANTOS, A. M. dos; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. de. Homogeneização da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio Goiânia-PE, com método de análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 1, n. 1, p. 14-27. mai/ago. 2008.

SANTOS, V. J. C. **Avaliação da rede de monitoramento hidrológico e sua contribuição para a gestão de recursos hídricos no Estado do Pará**. 2008. 37 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) - Universidade Federal do Pará, 2008a.

SANTOS, D. M. **Análise e modelagem hidrometeorológica na bacia do rio Tocantins em Marabá –PA**. 2008. 118 f Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008b.

SANTOS, P. R. A. dos. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 58, n. 01. p. 101 – 107. 2006.

SAUNDERS, C. A. B.; NASCIMENTO, E. A. do. Roteiro para o cálculo de disponibilidade hídrica das baixadas litorâneas fluminenses. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2008, Florianópolis. **Anais....** Florianópolis, 2008.

SILVA, F. M.; LERMEN, V. K.; NERY, J. T. Variabilidade interanual da precipitação na bacia do rio Iguçu. **Acta Scientiarum**. v. 23, n. 6. p. 1439-1444. 2001.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2004. 140 p.

SILVA, A. M. da. et al. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006.

SILVA, D. L. da; CUNHA, C. M. L. da. Análise morfométrica da bacia do córrego do lajeado (SP). **Caminhos de Geografia**. v. 9, n. 26, p. 153-172. jun. 2008.

SILVA, E. S.; TRINCA, L. A.; NERY, J. T. Áreas espacialmente homogêneas de níveis de precipitação nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. **Revista Energia na Agricultura**. v. 24, n. 3, p. 34-59. 2009.

SILVA-JÚNIOR, O. B. da et al. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 8, n. 1, p. 21-37, jan/mar. 2003.

SULSOFT. **Guia do Envi em Português**. Disponível em: <<http://www.envi.com.br>>. Acesso em 20 de Fevereiro. 2010.

TEODORO, V. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**. n. 20, p. 137-157. 2007.

TEOTIA, H. S. et al. Classificação da cobertura vegetal e capacidade de uso da terra na região do Cariri Velho (Paraíba), através de sensoriamento remoto e geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. 2003, Belo Horizonte. **Anais...** BELO HORIZONTE: INPE, 2003. p. 1969-1976.

TONELLO, K. C. et al. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhanes-MG. **R. Árvore**. v. 30, n. 5, p. 849-857. 2006.

TUCCI, C. E. M. (Org). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2004. 952 p.

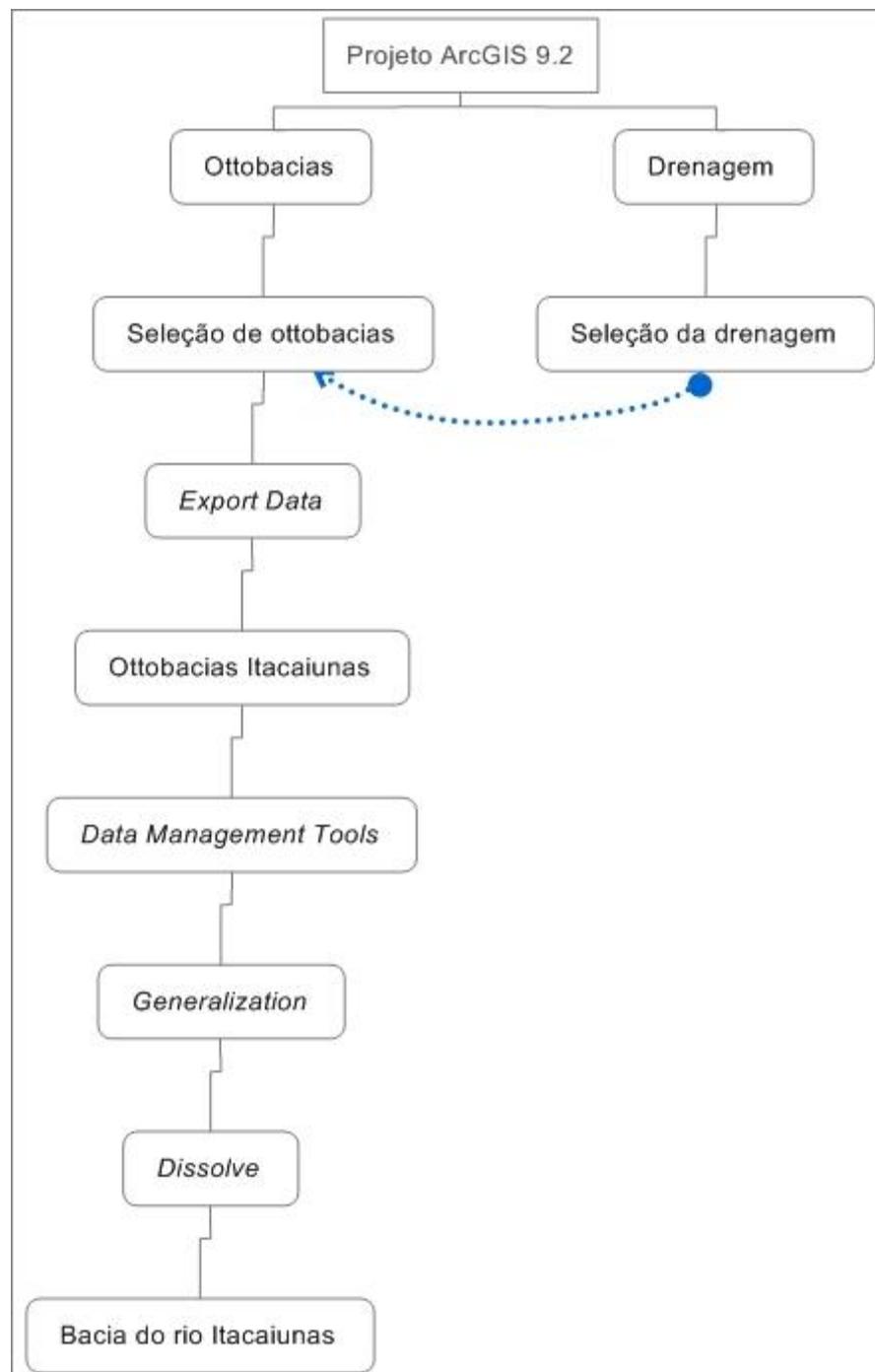
VALVERDE, A. E. L. et al. Análise regional de chuvas intensas para a bacia do rio Doce. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 8, n. 4, p. 157-168. out/dez. 2003.

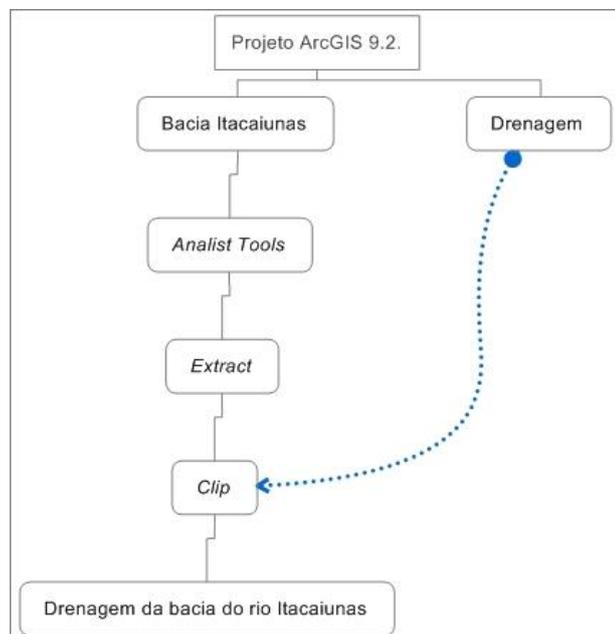
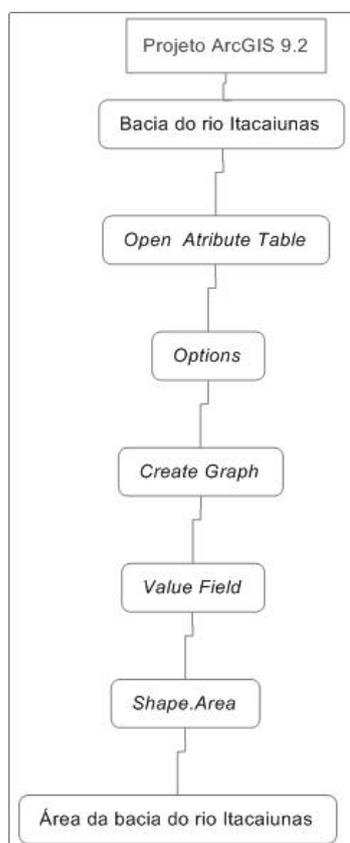
VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. da (Org). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará**. Belém: CPRM, 2008. 328 p.

VELOSO, H. P. et al. (Org). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 92 p.

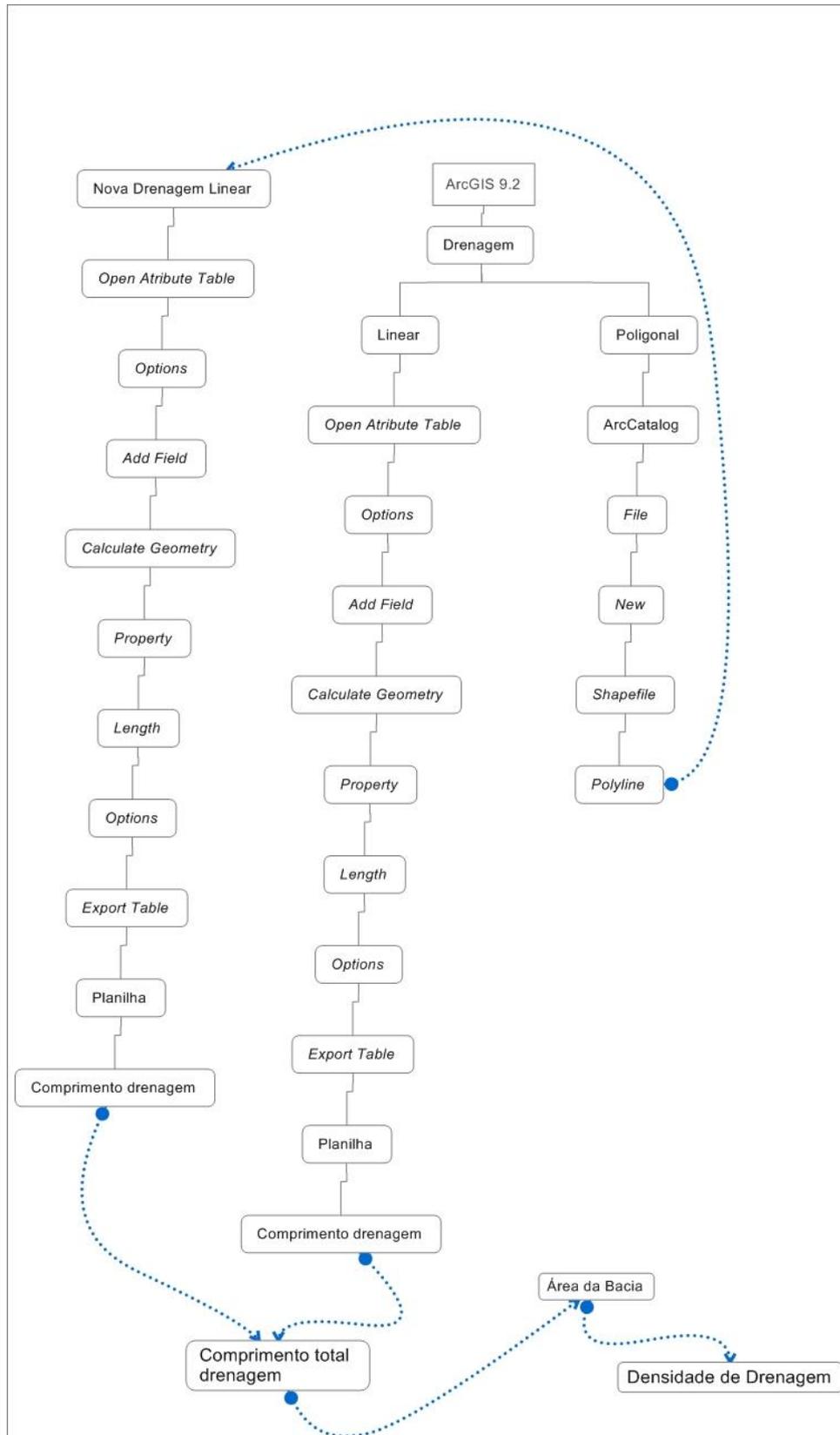
VERSIANI, B. R.; CARNEIRO, R. de M. F. Identificação de regiões homogêneas na análise regional de precipitações e de vazões máximas na bacia do rio São Francisco (MG). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 6, n. 3, p. 67-80. jul/set. 2001.

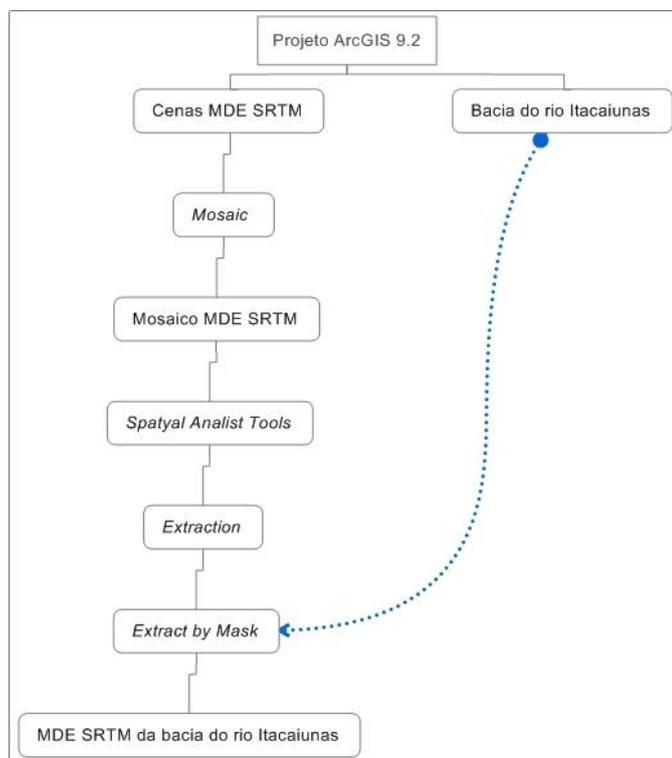
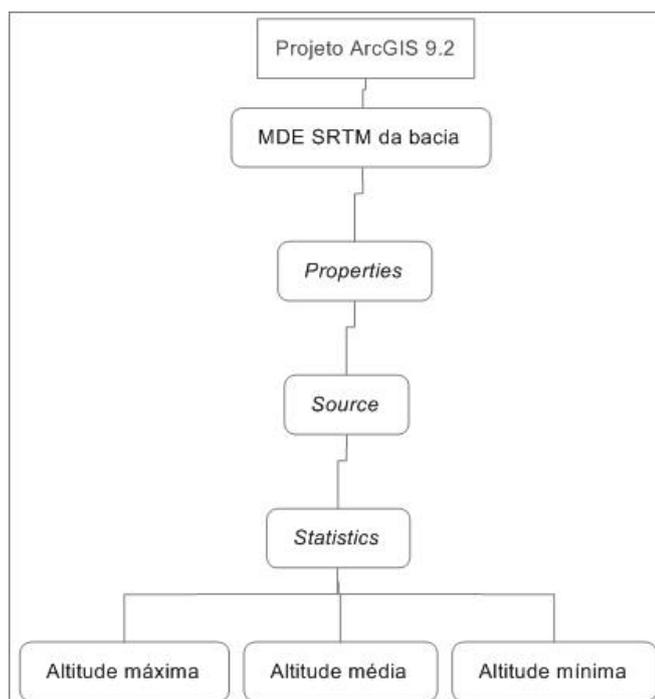
VON SPERLING, M. **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/ Universidade Federal de Minas Gerais: 2007. 588 p.

**ANEXO A – PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DA BACIA**

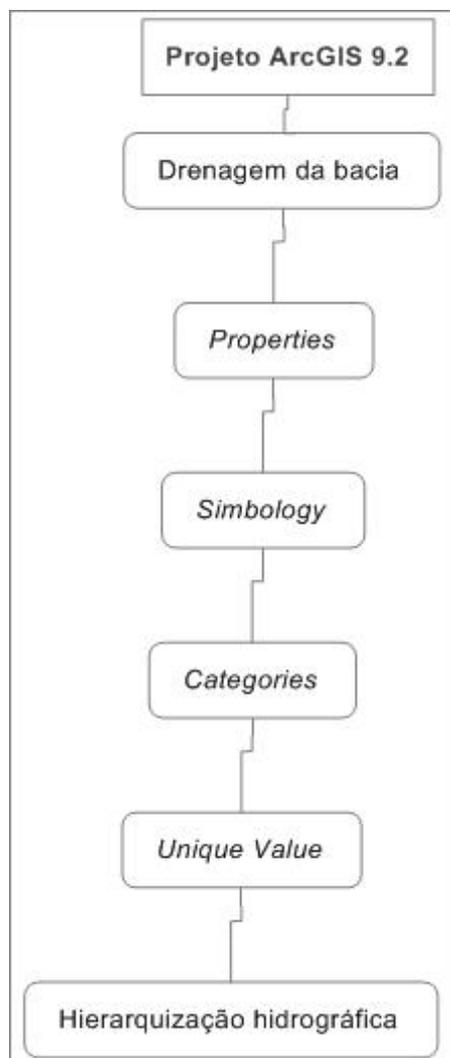
**ANEXO B – PROCEDIMENTOS PARA EXTRAÇÃO DA DRENAGEM****ANEXO C – PROCEDIMENTOS PARA CÁLCULO DA ÁREA DA BACIA**

## ANEXO D – PROCEDIMENTOS PARA A DEFINIÇÃO DA DENSIDADE DE DRENAGEM DA BACIA

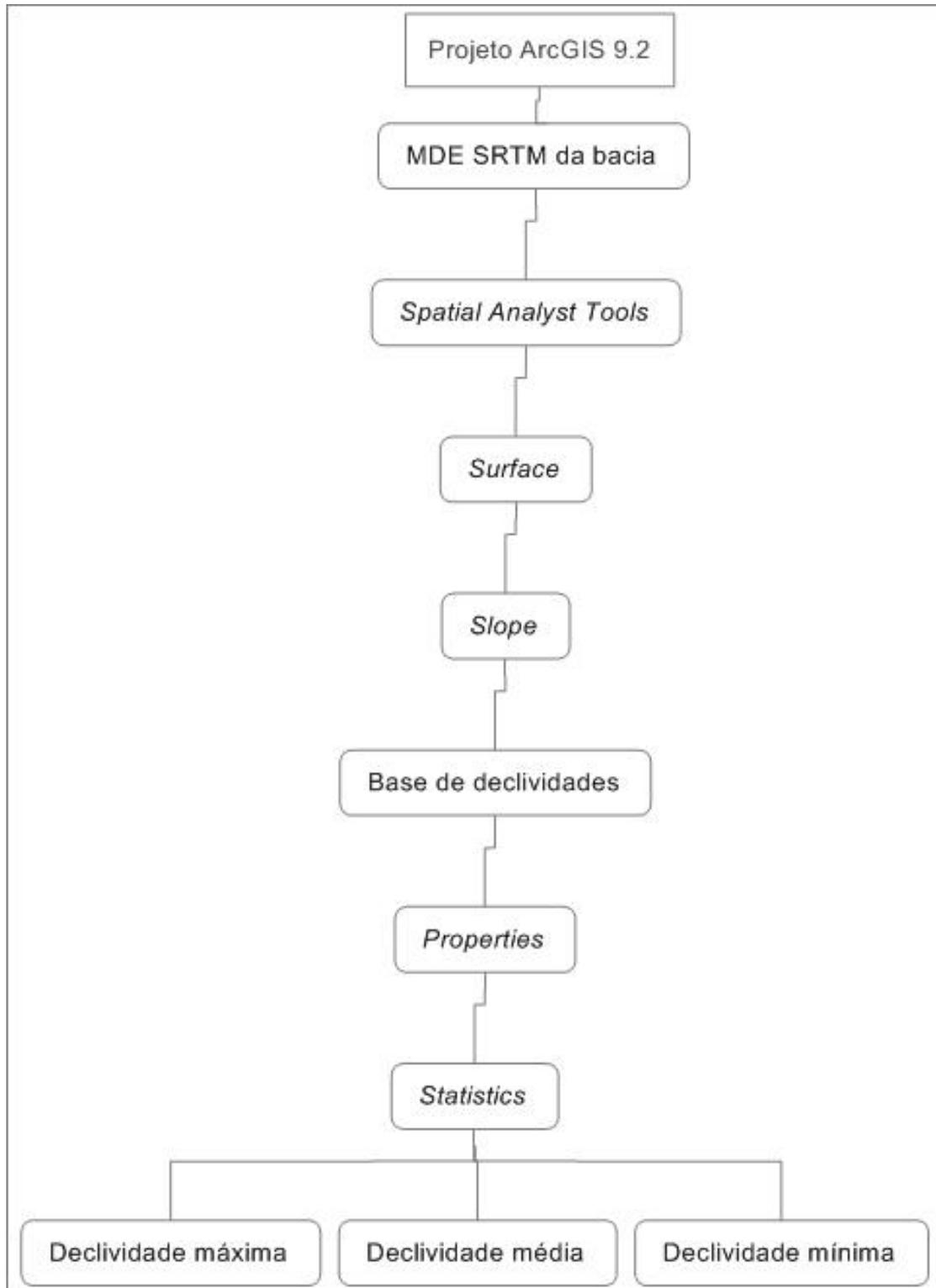


**ANEXO E – PROCEDIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DO MDE DA BACIA****ANEXO F – PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DAS ALTITUDES DA BACIA**

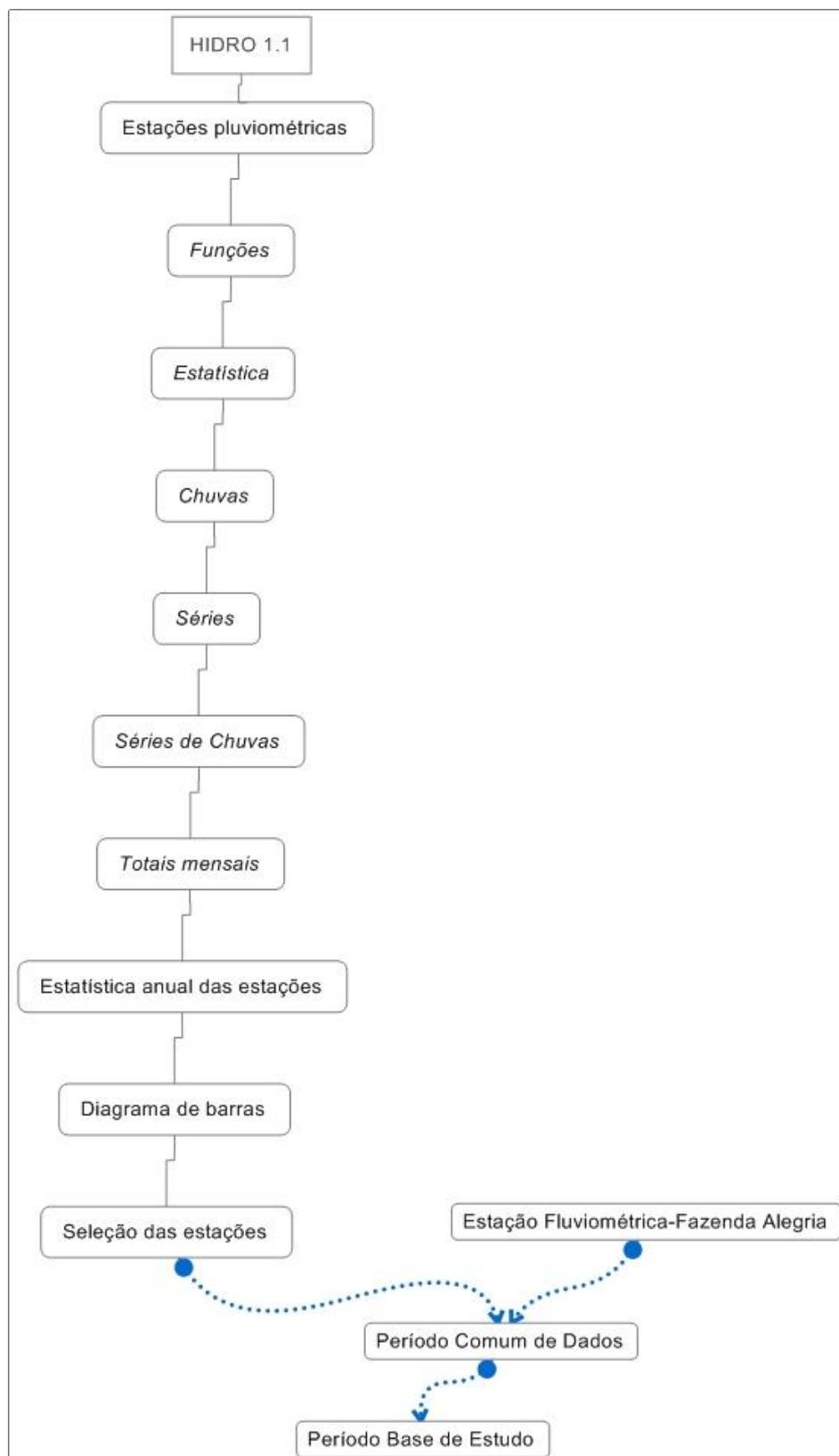
## ANEXO G – PROCEDIMENTOS PARA A HIERARQUIZAÇÃO HIDROGRÁFICA DA BACIA



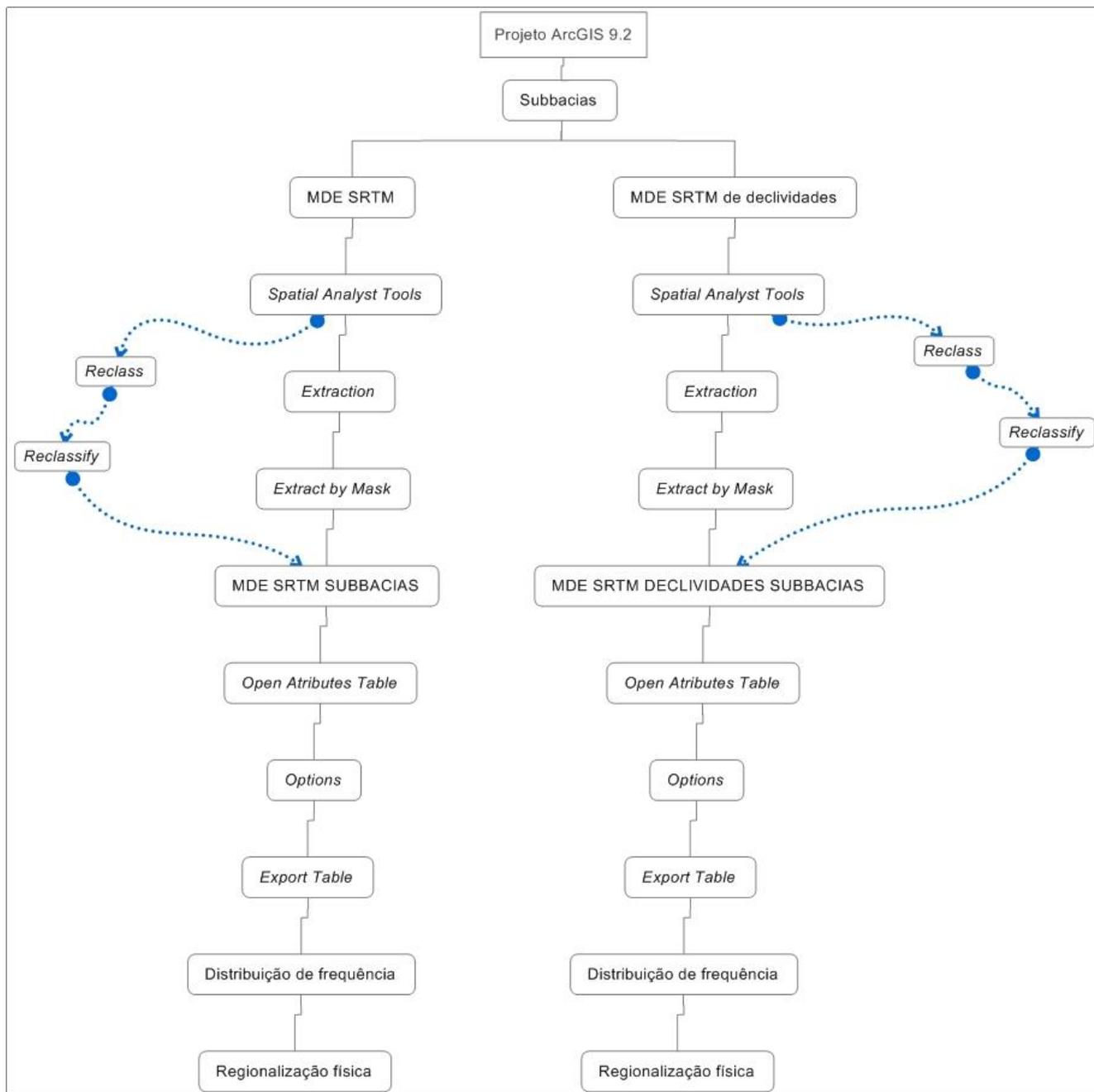
## ANEXO H – PROCEDIMENTOS PARA O CÁLCULO DAS DECLIVIDADES DA BACIA



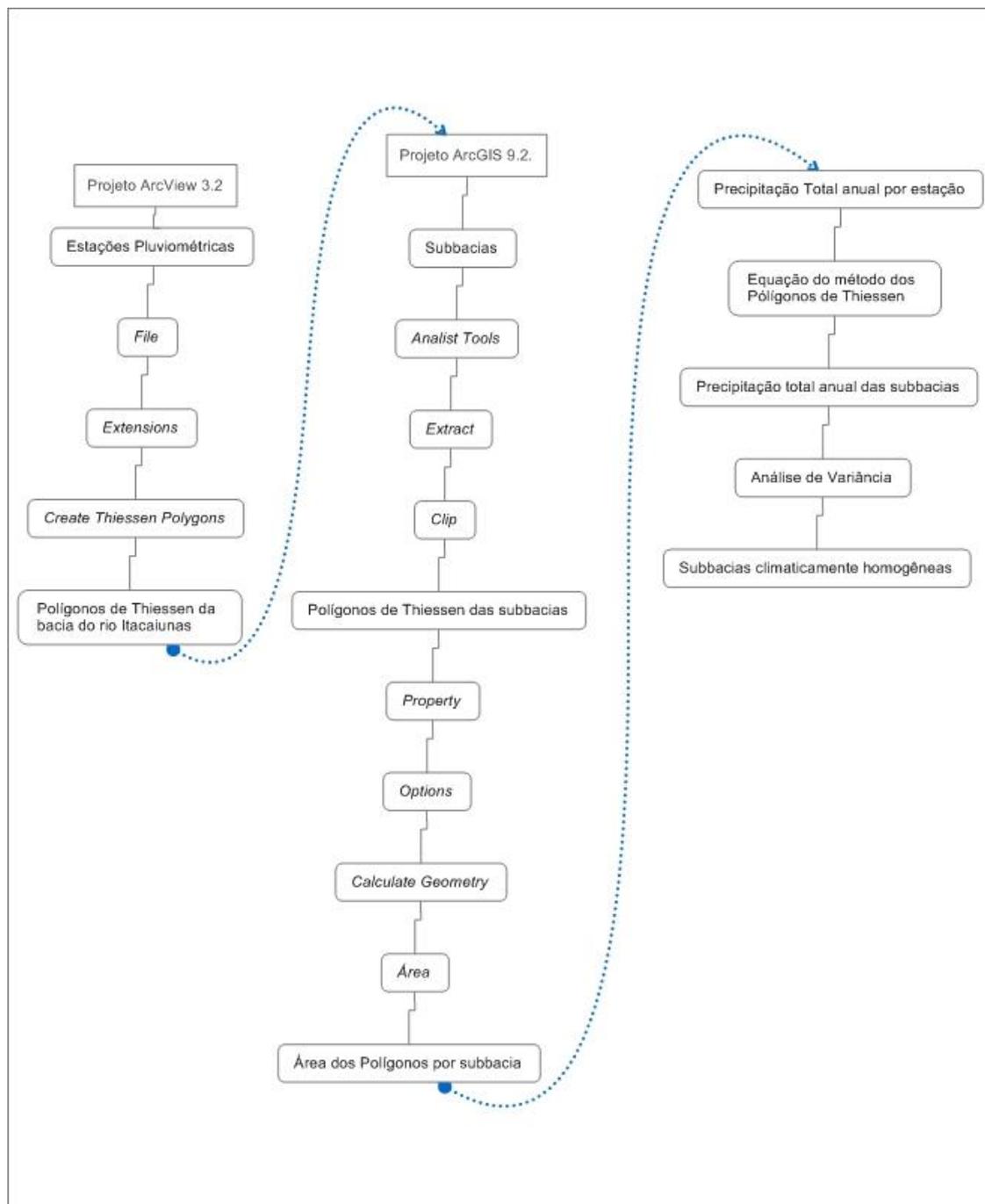
## ANEXO I - PROCEDIMENTOS PARA SELEÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DEFINIÇÃO DO PERÍODO BASE DE ESTUDO



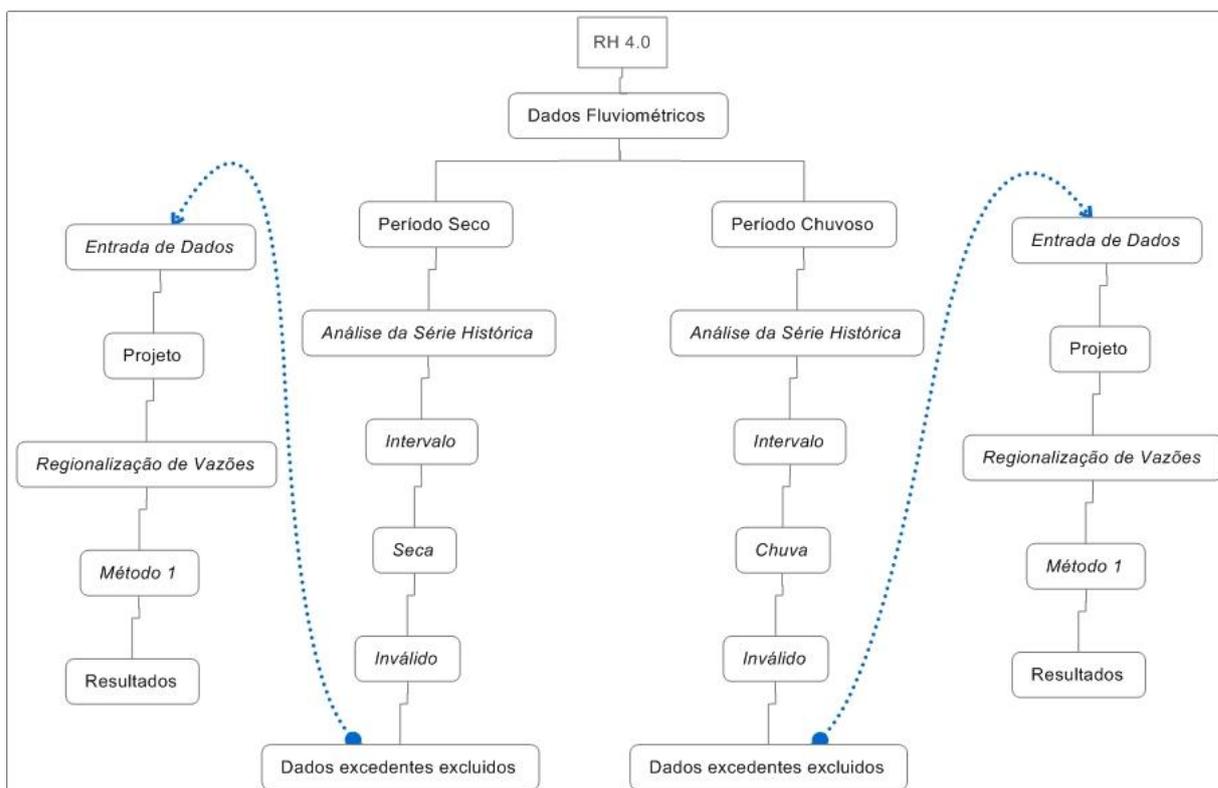
## ANEXO J – PROCEDIMENTOS PARA REGIONALIZAÇÃO FÍSICA DAS SUBBACIAS



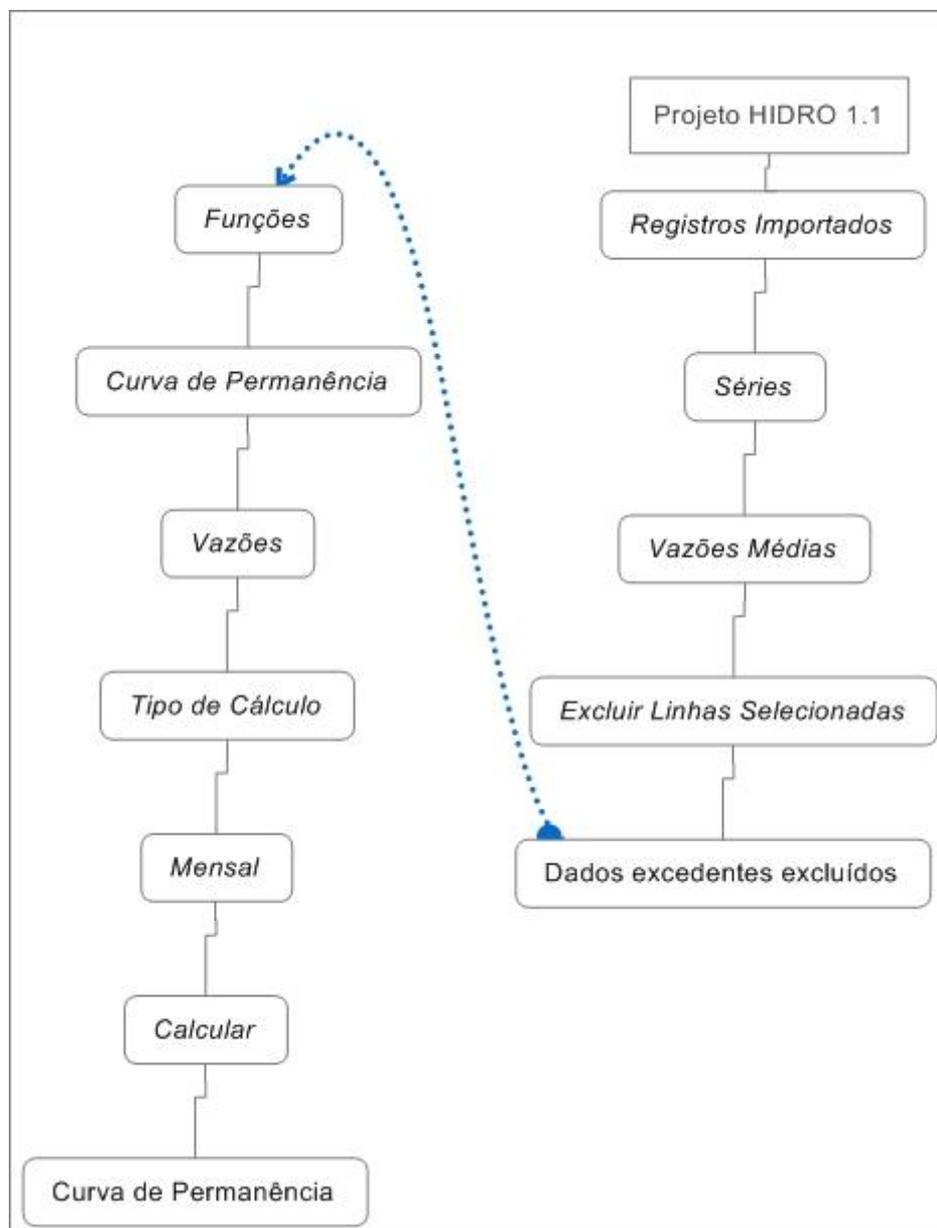
## ANEXO L – PROCEDIMENTOS PARA REGIONALIZAÇÃO CLIMÁTICA DAS SUBBACIAS



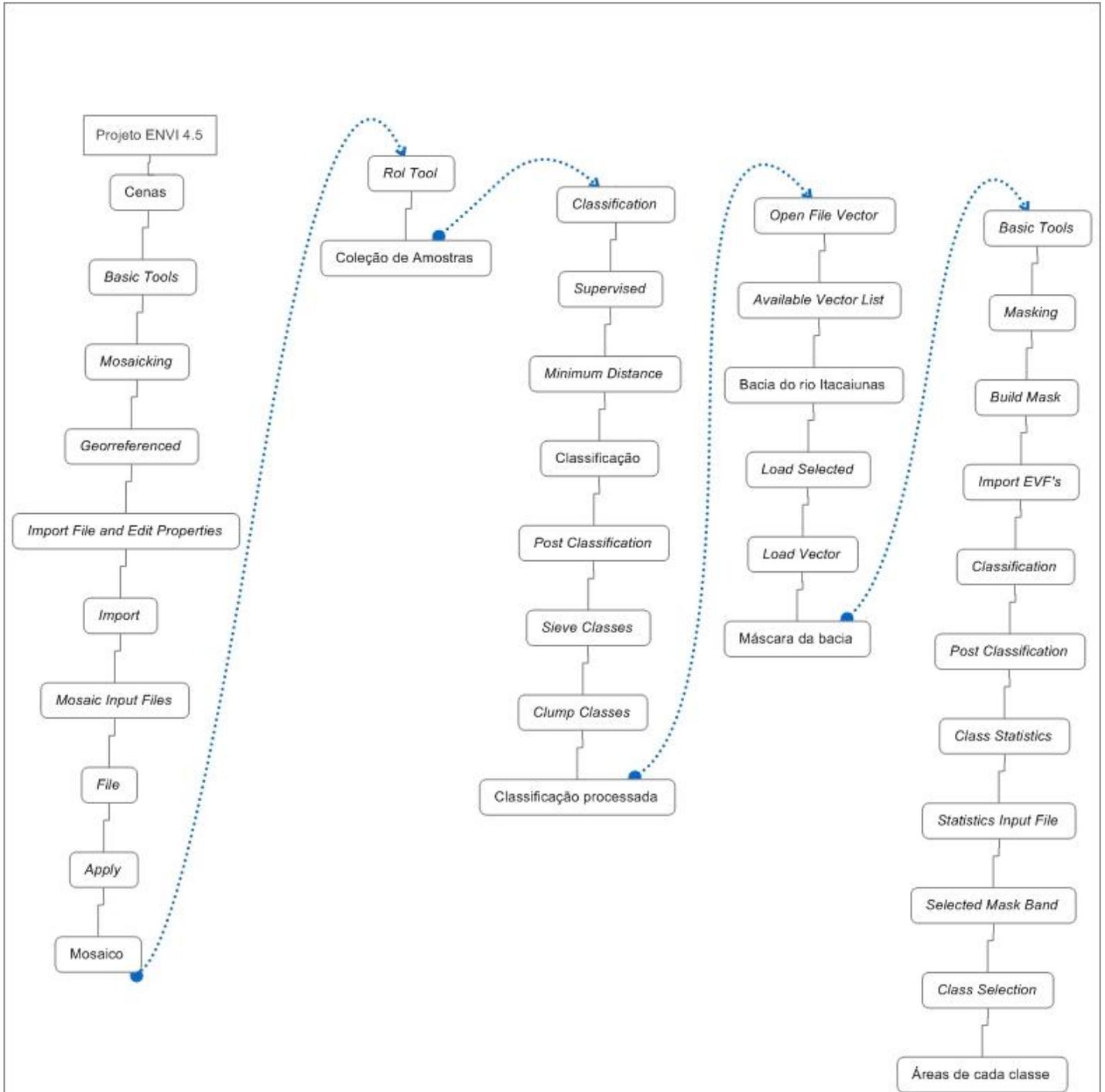
**ANEXO M – PROCEDIMENTOS PARA O AJUSTE DE MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO TEÓRICA DE PROBABILIDADES AOS DADOS HIDROLÓGICOS E OBTENÇÃO DAS VAZÕES MÁXIMA, MÉDIA E MÍNIMA REGIONAIS**



## ANEXO N – PROCEDIMENTOS PARA A OBTENÇÃO DA CURVA DE PERMANÊNCIA REGIONAL



## ANEXO O – PROCEDIMENTOS PARA A CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DO USO DA TERRA NA BACIA



**ANEXO P – CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “SERRA CARAJÁS – N5”**

<b>SERRA CARAJÁS N5</b>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
224.55	315.58	280.21	198.43	113.88	24.52	30.83	29.20	58.06	90.48	177.42	224.33

**ANEXO Q - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “KM 60”**

<b>KM 60</b>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
205.26	283.67	335.60	226.29	126.78	33.81	12.49	16.23	35.38	86.63	128.34	215.37

**ANEXO R - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA SURUBIM”**

<b>FAZENDA SURUBIM</b>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
250.13	231.98	261.22	210.86	118.76	32.98	9.15	21.25	50.16	131.58	160.84	179.18

**ANEXO S - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA SANTA ELISA”**

<b>FAZENDA SANTA ELISA</b>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
189.58	251.78	265.19	182.41	76.48	22.34	3.12	18.73	48.77	119.87	172.03	181.79

**ANEXO T - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA SANTA CAIÇARA”**

<b>FAZENDA CAIÇARA</b>											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
212.71	248.18	239.09	214.18	70.68	13.05	12.75	26.32	117.43	117.63	192.32	167.19

**ANEXO U - CLIMATOLOGIA DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA “FAZENDA ELDORADO”**

<b>ELDORADO</b>											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
233.71	336.63	323.86	252.89	136.65	36.87	4.53	17.51	31.67	92.52	145.34	186.80

