Campus de São Carlos

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A ANÁLISE DE
CENÁRIOS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA E
DEMANDA HÍDRICA

Rodrigo Freire de Macedo

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mario Mendingo

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA A ANÁLISE DE CENÁRIOS DE DISPONIBILIDADE E OFERTA HÍDRICA.

Rodrigo Freire de Macêdo.

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100052288

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mario Mendonço

São Carlos

2005

Class.	TESE-EESC ✓
Cutt.	3369
Inclui	1 CD-ROM
Tombo	T231/05
Sysno	1461147

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M119p Macêdo, Rodrigo Freire de
Proposta metodológica para a análise de cenários de
disponibilidade e oferta hídrica / Rodrigo Freire de
Macêdo. -- São Carlos, 2005.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Mario Mendingo.

1. Cenários. 2. Disponibilidade hídrica. 3. Demanda
hídrica. 4. Modelagem matemática. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO FREIRE DE MACÊDO**

Dissertação defendida e julgada em 04-08-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **EDUARDO MARIO MENDIONDO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Profª. Associada **LUISA FERNANDA RIBEIRO REIS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO**
(Universidade Federal do Ceará/UFC)

Aprovado

Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e professor E. Mario Mendiando, pela orientação deste trabalho, amizade e inúmeras conversas que me inspiraram ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e amigos Rodrigo de Melo Porto, Luisa Fernanda Ribeiro Reis e Jurandyr Polvinneli pelos ensinamentos, discussões teóricas e práticas, apoio, incentivo e interesse na análise deste trabalho.

Para todas as pessoas que fizeram e ainda fazem parte do Núcleo Integrado de Bacias Hidrográficas (NIBH/EESC/USP) em especial os pesquisadores Alfredo Akira Onhuma Júnior, Paulino de Almeida Neto, Juliana Pontes, Cristiane Ribeiro, Heloisa Ceccato Mendes e Saulo Aires.

Ao amigo Nelsio Kenhiti Terashima pelo apoio, preocupação, incentivo e discussões acerca dos temas da área de recursos hídricos que fomentaram ainda mais o meu interesse.

Aos amigos da CRA que me apoiaram no cumprimento deste trabalho, em especial José Manuel Mondelo, Frank Roovers, Sandra Rocha, Andrés Lorenzo, Olga Corona Zicman, José Luis Pitta e Carlson Cabral.

Ao Doutorando Celso Olivete Júnior pela ajuda na programação dos modelos matemáticos.

*"A natureza é exatamente simples, se conseguirmos encará-la de modo apropriado.
Essa crença tem-me auxiliado, durante toda a minha vida, a não perder as esperanças,
quando surgem grandes dificuldades de investigação".*

Albert Einstein.

*"Não existe nenhum caminho lógico para a descoberta das leis do Universo - o único
caminho é o da intuição".*

Albert Einstein.

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais Rômulo de Macêdo Vieira e Maria Ilnar Freire Bezerra, à minha madrastra Sidma Marques, meus irmãos Rafael Freire de Macêdo e Florence Mello de Macêdo, para meus avós paternos Francisco Cândido de Macêdo (in memorium) e Jurila Macêdo Vieira (in memorium), para meus avós maternos Antônio Freire Bezerra e Nadir Freire Bezerra (in memorium), às minhas tias Rosilda de Macêdo Vieira e Rosa Maria de Macêdo Vieira e aos demais familiares e amigos que me apoiaram na conquista de novos horizontes e que sem eles, certamente eu não teria alcançado esse novo estágio da vida.

Ratifico a dedicação com muita honra ao meu pai Rômulo de Macêdo Vieira, o maior colaborador e incentivador desta conquista. E finalmente, para todas as pessoas que se empenham na conquista de um mundo melhor, mais humano, justo, próspero e igual para todos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SIGLAS.....	x
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Conjuntura Sócio-Econômica e os Recursos Hídricos.....	5
3.1.1 O Estado de São Paulo.....	5
3.1.1.1 <i>Os Recursos Hídricos e sua Gestão</i>	5
3.1.1.2 <i>O Regime de Chuvas</i>	6
3.1.1.3 <i>Características Sócio-Econômicas</i>	7
3.1.2 A UGRHI do Tietê-Jacaré.....	8
3.1.2.1 <i>A Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré</i>	8
3.1.2.2 <i>Características Climática</i>	11
3.1.2.3 <i>Disponibilidade Hídrica</i>	12
3.1.2.4 <i>Características Sócio-Econômicas</i>	14
3.1.2.5 <i>Demandas Hídricas Atuais</i>	15
3.2 Cenários de Referência.....	19
3.2.1 O Cenário A1.....	20
3.2.2 O Cenário A2.....	22
3.2.3 O Cenário B1.....	25
3.2.4 O Cenário B2.....	27
3.2.5 Observações sobre as Incertezas dos Cenários.	27
3.3 Clima.	29
3.3.1 Mudanças Climáticas.....	29

3.3.2	O Programa IMAGE 2.2.....	31
3.3.2.1	<i>O Modelo UDCM.....</i>	32
3.4	Séries Hidrológicas Temporais.....	32
3.4.1	Componentes e Propriedades.....	33
3.4.2	Incertezas.....	36
3.4.3	Geração de Séries Sintéticas.....	37
3.4.3.1	<i>Modelos Estocásticos.....</i>	37
3.4.3.2	<i>O Modelo ARMA e as Séries de Precipitações.....</i>	38
3.5	Modelos Hidrológicos.....	38
3.5.1	Estrutura de Modelos Hidrológicos.....	39
3.5.2	Calibragem, Verificação e Confirmação.....	40
3.5.3	Erros e Incertezas.....	41
3.6	Usos da Água.....	43
3.6.1	Usos Múltiplos da Água.....	43
3.6.2	Usos Consuntivos.....	43
3.6.3	Usos Não Consuntivos.....	46
4	METODOLOGIA.....	49
4.1	Cenários Tendencial e Alternativo.....	52
4.2	Cenários Climáticos.....	52
4.2.1	Precipitações.....	54
4.2.1.1	<i>Estudos Prospectivos.....</i>	54
4.2.1.2	<i>Geração das Séries Sintéticas.....</i>	62
4.2.1.3	<i>Séries Sintéticas Segundo o Cenário CCT.....</i>	69
4.2.1.4	<i>Séries Sintéticas Segundo o Cenário CCA.....</i>	70
4.2.1.5	<i>Validação da Metodologia Adotada.....</i>	70
4.2.2	Disponibilidade Hídrica Superficial.....	72
4.2.2.1	<i>Estudos Prospectivos.....</i>	72
4.2.2.2	<i>O Programa HEC-HMS.....</i>	72
4.2.2.3	<i>Estruturação do Modelo Hidrológico.....</i>	73

4.2.2.4	<i>Calibragem e Verificação</i>	82
4.2.2.5	<i>Cenários de Disponibilidade Hídrica Superficial</i>	83
4.3	Cenários Sócio-Econômicos	85
4.3.1	Cenário Sócio-Econômico Tendencial (CSET).....	85
4.3.2	Cenário Sócio-Econômico Alternativo (CSEA).....	87
4.3.3	Demandas Hídricas.....	88
4.3.3.1	<i>Abastecimento Público</i>	89
4.3.3.2	<i>Diluição de Efluentes Domésticos</i>	91
4.3.3.3	<i>Agricultura Irrigada</i>	99
4.3.3.4	<i>Pecuária</i>	101
4.3.3.5	<i>Indústria e Diluição de Efluentes</i>	102
4.4	Cenários de Balanços Hídricos	104
5	RESULTADOS E DISCUSÕES	105
5.1	Séries Sintéticas de Precipitações	106
5.1.1	Análises das Séries Históricas.....	112
5.1.2	Séries Sintéticas Geradas para o Cenário CCT.....	117
5.1.3	Séries Sintéticas Geradas para o Cenário CCA.....	120
5.1.4	Validação da Metodologia.....	123
5.1.5	Síntese dos Resultados.....	133
5.2	Disponibilidade Hídrica Superficial	133
5.2.1	Calibração.....	133
5.2.2	Validação.....	135
5.2.3	Disponibilidade Hídrica Superficial no Período de Calibração.....	138
5.3	Projeções das Demandas Setoriais por Água	139
5.3.1	Abastecimento Público e Diluição de Efluentes.....	140
5.3.2	Agricultura Irrigada.....	146
5.3.3	Pecuária.....	152
5.3.4	Indústria e Diluição de Efluentes.....	154
5.3.5	Demanda Global.....	158

5.4	Projeções de Balanços Hídricos.....	163
5.4.1	Cenário A.....	163
5.4.2	Cenário B.....	167
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	172
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	177
8	ANEXOS.....(inseridos no CD em anexo)	
8.1	ANEXOS A – Pluviometria e Hidrometeorologia.	
8.1.1	Anexo A1 – Relação de Postos Pluviométricos e Fluviométricos.	
8.1.2	Anexo A2 – Registros Históricos de Precipitações.	
8.1.3	Anexo A3 – Cenários de Precipitação.	
8.1.4	Anexo A4 – Dados do Modelo Climático UDCM.	
8.2	ANEXOS B – Demandas Hídricas.	
8.2.1	Anexo BA – Abastecimento Público e Diluição de Efluentes.	
8.2.2	Anexo BB – Agricultura.	
8.2.3	Anexo BC – Pecuária.	
8.2.4	Anexo BD – Indústria.	
8.3	ANEXOS C – Modelagem Hidrológica.	
8.3.1	Anexo C1 – Dados Históricos de Chuva e Vazão para Calibração.	
8.3.2	Anexo C2 – HEC-HMS 2.1 – Dados de Entrada e Resultados.	
8.3.3	Anexo C3 – Parâmetros Hidrológicos e Meteorológicos.	
8.4	ANEXOS D – Balanços Hídricos.	

LISTA DE FIGURAS.

Figura 3.1: Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo.....	6
Figura 3.2: Rede de Drenagem e sub-bacias que compõe a UGRHI do Tietê-Jacaré. (Fonte: CBH-TJ, 2000).....	9
Figura 3.3: Municípios da UGRHI do Tietê-Jacaré e suas relações em área de ocorrência nas 9 sub-bacias que compõe a Bacia do Tietê-Jacaré. (Fonte: CBH-TJ, 2000).....	10
Figura 3.4 – Cenários de Referência segundo os eixos de orientação.....	20
Figura 3.5 – Gráfico de Evolução da População Mundial segundo Cenário A1. (Fonte: IMAGE 2.2).....	23
Figura 3.6 – Gráfico de Evolução do PIB Per Capita Mundial segundo Cenário A1. (Fonte: IMAGE 2.2).....	23
Figura 3.7 – Evolução da Produção de Diferentes Matrizes Energéticas segundo o Sub-Cenário de Referência A1F. (Fonte: IMAGE 2.2).....	24
Figura 3.8 – Evolução da Temperatura Média Global segundo o Sub-Cenário de Referência A1F. (Fonte: IMAGE 2.2).....	24
Figura 3.9 – Mudanças na Taxa de Temperatura Média Global segundo o Sub-Cenário de Referência A1F. (Fonte: IMAGE 2.2).....	25
Figura 3.10 – Heterogeneidade das mudanças nos regimes de precipitações, segundo a narrativa do sub-cenário A1F, em todo o planeta para os anos de 2050 e 2100. (Fonte: IMAGE 2.2).....	26
Figura 3.11 – Estrutura do Programa IMAGE 2.2.....	33
Figura 3.12 – Componentes das séries hidrológicas temporais.....	35
Figura 3.13 – Estrutura de modelo hídrico hipotético.....	40
Figura 4.1: Estrutura de Relações de Métodos.....	51
Figura 4.2: Períodos de tempo simulados para os cenários Tendencial e Alternativo....	53
Figura 4.3: Evolução histórica da precipitação média mensal, e dos respectivos desvios absolutos em torno da média, representados pelas envoltórias de máximos e mínimos, sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.....	56
Figura 4.4: Função Harmônica de Fourier ajustada à seqüência de valores médios mensais de precipitação, correspondente a 120 meses de registros, sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.....	57

Figura 4.5: Esquema ilustrativo do método da regressão linear simples.....	58
Figura 4.6: Autocorrelograma Serial para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	63
Figura 4.7: Autocorrelograma Parcial para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	63
Figura 4.8: Histograma de frequências da série histórica de precipitações médias diárias sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	66
Figura 4.9: Histograma de frequências da série histórica normalizada de precipitações médias diárias sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	67
Figura 4.10: Fluxograma dos passos para a geração das séries sintéticas.....	71
Figura 4.11 – Fluxograma de modelagem de sistemas hidrológicos com o programa HEC-HMS.....	73
Figura 4.12 – Esquema ilustrativo das simulações do HEC-HMS.....	74
Figura 4.13 – Esquema ilustrativo do Modelo SMA.....	77
Figura 4.14 – Esquema ilustrativo da desagregação da precipitação sintética média diária.....	84
Figura 4.15: Curva de evolução dos níveis de oxigênio dissolvido, ao longo de um curso d'água, segundo o modelo de STREETER-PHELPS.....	93
Figura 4.16: Esquema ilustrativo do Curso d'água fictício.....	94
Figura 4.17: Esquema ilustrativo da evolução da vazão indisponível para outros usos, devido a diluição de efluentes domésticos, ao longo do Curso d'água fictício.....	97
Figura 5.1: Aumento da temperatura média, sobre Brasil, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050.....	107
Figura 5.2: Aumento da temperatura média, sobre a região da bacia do Tietê-Jacaré, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (Fonte: Adaptado de UDCM).....	107
Figura 5.3: Curva ajustada da relação empírica entre precipitação mensal e umidade relativa média mensal.....	109
Figura 5.4: Variações das precipitações médias diárias, por mês, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, com relação aos valores médios registrados em 2000.....	111
Figura 5.5: Diminuição da precipitação média diária, sobre o Brasil, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (Fonte: Adaptado de IMAGE 2.2).....	112
Figura 5.6: Sazonalidade do Regime Histórico de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	114
Figura 5.7: Série histórica de precipitações médias mensais, sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período histórico de janeiro de 1995 a dezembro de 2004.....	115

Figura 5.8: Histograma de frequências das precipitações médias mensais históricas da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	116
Figura 5.9: Histograma de frequências das precipitações médias mensais históricas normalizadas pelo método de BOX-COX, da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	117
Figura 5.10: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2014, segundo a narrativa do cenário CCT.....	119
Figura 5.11: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2029, segundo a narrativa do cenário CCT.....	119
Figura 5.12: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2045 a dezembro de 2054, segundo a narrativa do cenário CCT.....	120
Figura 5.13: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2014, segundo a narrativa do cenário CCA.....	122
Figura 5.14: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2029, segundo a narrativa do cenário CCA.....	122
Figura 5.15: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2045 a dezembro de 2054, segundo a narrativa do cenário CCA.....	123
Figura 5.16: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período futuro de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCT.....	124
Figura 5.17: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período futuro de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCT.....	124
Figura 5.18: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período futuro de 2049 a 2051, segundo a narrativa do cenário CCT.....	125
Figura 5.19: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período futuro de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCA.....	125

Figura 5.20: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período futuro de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCA.....	126
Figura 5.21: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período futuro de 2049 a 2051, segundo a narrativa do cenário CCA.	126
Figura 5.22: Histograma de freqüências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCT.....	128
Figura 5.23: Histograma de freqüências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCT.....	128
Figura 5.24: Histograma de freqüências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de 2049 a 2050, segundo a narrativa do cenário CCT.....	129
Figura 5.25: Histograma de freqüências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCA.....	129
Figura 5.26: Histograma de freqüências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCA.....	130
Figura 5.27: Histograma de freqüências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de 2049 a 2051, segundo a narrativa do cenário CCA.....	130
Figura 5.28: Autocorrelação dos resíduos da série sintética gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, segundo a narrativa do cenário CCT.....	132
Figura 5.29: Autocorrelação dos resíduos da série sintética gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, segundo a narrativa do cenário CCA.....	132
Figura 5.30: Gráfico comparativo entre os hidrogramas observados e simulados, na fase de calibragem, no posto 5D-028 do DAEE localizado na bacia do Alto Jacaré-Guaçú.....	135
Figura 5.31: Gráfico de concordância dos valores simulados com os valores observados de vazão no processo de calibração dos parâmetros do Alto Jacaré-Guaçú. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1).....	137

Figura 5.32: Gráfico comparativo entre os hidrogramas observados e simulados, na fase de verificação, no posto 5D-028 do DAEE localizado na bacia do Alto Jacaré-Guaçú. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1).....	137
Figura 5.33: Hidrograma no exultório da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú no período de calibração. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1).....	139
Figura 5.34: Evoluções Populacionais da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú e Linhas de Tendência.....	141
Figura 5.35: Projeções de crescimento populacional para os anos horizonte segundo a narrativa do cenário CSET.....	142
Figura 5.36: Projeções de demanda bruta por água para abastecimento público segundo a narrativa do cenário CSET.....	143
Figura 5.37: Evolução das vazões indisponíveis nos corpos fluviais receptores, em decorrência da diluição de cargas poluidoras provenientes de esgotos domésticos, segundo narrativa do cenário CSET.....	144
Figura 5.38: Projeções de crescimento populacional, para os anos horizonte, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	145
Figura 5.39: Projeções de demanda bruta por água para abastecimento humano segundo a narrativa do cenário CSEA.....	147
Figura 5.40: Evolução das vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição de cargas poluidoras provenientes de esgotos domésticos, segundo narrativa do cenário CSEA.....	147
Figura 5.41: Projeção de evolução das áreas irrigadas nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré segundo a narrativa do cenário CSET.....	149
Figura 5.42: Projeção de evolução das demandas por água pela agricultura irrigada, nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.....	149
Figura 5.43: Sazonalidade da projeção de evolução das demandas por água pela agricultura irrigada, no conjunto das nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.....	150
Figura 5.44: Projeção de evolução das áreas irrigadas nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré segundo a narrativa do cenário CSEA.....	151
Figura 5.45: Projeção de evolução das demandas por água pela agricultura irrigada, nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	152
Figura 5.46: Projeções de demanda por água, para a pecuária, segundo a narrativa do cenário CSET.....	153

Figura 5.47: Projeções de demanda por água, para a pecuária, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	155
Figura 5.48: Projeções de demanda por água, para o abastecimento da produção industrial, segundo a narrativa do cenário CSET.....	156
Figura 5.49: Projeções de demanda por água, para a diluição de efluentes industriais, segundo a narrativa do cenário CSET.....	157
Figura 5.50: Projeções de demanda por água, para o abastecimento da produção industrial, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	158
Figura 5.51: Projeções de demanda por água, para a diluição de efluentes industriais, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	159
Figura 5.52: Evolução das demandas setoriais por água, na UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.....	160
Figura 5.53: Evolução das demandas setoriais por água, na UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSEA.	161
Figura 5.54: Gráfico comparativo da evolução das demandas Consuntivas e Não-Consuntivas para os cenários CSET e CSEA.....	161
Figura 5.55: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2011, segundo a narrativa do cenário A.....	164
Figura 5.56: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2024 a dezembro de 2026, segundo a narrativa do cenário A.....	164
Figura 5.57: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2049 a dezembro de 2051, segundo a narrativa do cenário A.....	165
Figura 5.58: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2011, segundo a narrativa do cenário B.....	169
Figura 5.59: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2024 a dezembro de 2026, segundo a narrativa do cenário B.....	169
Figura 5.60: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2049 a dezembro de 2051, segundo a narrativa do cenário B.....	170

LISTA DE TABELAS.

Tabela 3.1: Nomes e Áreas das Sub-Bacias da UGRHI do Tietê-Jacaré.....	9
Tabela 3.2: Precipitações Médias Históricas nas sub-bacias do Tietê-Jacaré.....	12
Tabela 3.3: Disponibilidade Hídrica Superficial por sub-bacia.....	13
Tabela 3.4: Vazão, por aquífero, dos poços cadastrados na UGRHI do Tietê-Jacaré.....	13
Tabela 3.5: Demandas totais cadastradas por tipo de manancial.....	15
Tabela 3.6: Demandas industriais cadastradas na UGRHI do Tietê-Jacaré.....	16
Tabela 3.7: Demandas estimadas e cadastradas para a irrigação por sub-bacia.....	17
Tabela 3.8: Lançamentos e captações superficiais cadastrados na UGRHI do Tietê-Jacaré.....	19
Tabela 4.1: Períodos de tempo analisados nos estudos prospectivos das séries históricas.....	55
Tabela 4.2: Variáveis sócio-econômicas e parâmetros tecnológicos analisados por setor usuário da água.....	86
Tabela 4.3: Taxas de consumo per capita das principais espécies de rebanhos.....	102
Tabela 4.4: Composição dos Cenários I, II, III e IV.....	104
Tabela 5.1: Valores médios mensais de temperatura para o ano de 2000 e projeções de temperatura para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050.....	108
Tabela 5.2: Relação de valores e variações absolutas, das tensões saturantes de vapor d'água e umidades relativas médias mensais, para o ano base de 2000 e os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050.....	110
Tabela 5.3: Variações absolutas das precipitações médias mensais e diárias para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, com relação aos valores registrados em 2000.....	109
Tabela 5.4: Comparação entre as variações absolutas das precipitações médias diárias calculadas pela metodologia da Dissertação e das projeções das simulações do modelo UDCM.....	112
Tabela 5.5: Períodos históricos analisados, em cada sub-bacia, e respectivas precipitações médias diárias, mensais e anuais.....	113
Tabela 5.6: Variação das precipitações médias mensais, das sub-bacias do Tietê-Jacaré, apuradas nos períodos históricos analisados.....	114
Tabela 5.7: Coeficientes de Assimetria e Curtose das Séries Históricas de Precipitações Médias Mensais.....	116

Tabela 5.8: Coeficientes de Assimetria e Curtose das Séries Históricas de Precipitações Médias Mensais Normalizadas pelo modelo de BOX-COX.....	117
Tabela 5.9: Precipitações médias anuais, sobre as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, apuradas nos períodos históricos e simulados.....	118
Tabela 5.10: Precipitações médias anuais e diárias, e respectivas variações com relação aos registros em 2000, para os períodos simulados sobre as sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CCA.....	121
Tabela 5.11: Comparação entre os coeficientes de assimetria e curtose das séries sintéticas de precipitação, geradas segundo as narrativas dos cenários CCA e CCT, e os coeficientes de assimetria e curtose das séries históricas de precipitação que serviram de matriz para a geração das séries sintéticas.....	131
Tabela 5.12: Comparação entre os resultados obtidos, para a evolução das precipitação média anual sobre a totalidade da UGRHI do Tietê-Jacaré, para os cenários CCT e CCA.....	134
Tabela 5.13: Comparação de parâmetros inerentes aos hidrogramas observados e simulados das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados.....	136
Tabela 5.14: Comparação de parâmetros inerentes aos hidrogramas observados e simulados, das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados, para o período de verificação.....	138
Tabela 5.15: Vazões mínimas e volumes escoados, nos exultórios das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados, nos respectivos períodos de calibração.....	140
Tabela 5.16: Demandas projetadas por água para abastecimento público em m ³ /s, para os anos horizontes propostos, nas sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.....	142
Tabela 5.17: Projeções de lançamento de cargas poluidoras domésticas e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição de cargas poluidoras domésticas, segundo narrativa do cenário CSET.....	144
Tabela 5.18: Variações absolutas das populações urbanas e rurais, para a região do Tietê-Jacaré, segundo narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000).....	145
Tabela 5.19: Demandas projetadas por água para abastecimento humano em m ³ /s, para os anos horizontes propostos, nas sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	146

Tabela 5.20: Projeções de lançamento de cargas poluidoras domésticas e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição de cargas poluidoras, segundo a narrativa do cenário CSEA.....	148
Tabela 5.21: Projeções de evolução de áreas irrigadas e demandas médias anuais por água segundo narrativa do cenário CSET.....	148
Tabela 5.22: Projeções de evolução das áreas irrigadas segundo a narrativa do cenário CSEA e sobre os registros do ano base de 1996.....	151
Tabela 5.23: Projeções de evolução de áreas irrigadas e demandas médias anuais por água segundo narrativa do cenário CSEA.....	151
Tabela 5.24: Projeções de evolução das populações dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos segundo a narrativa do cenário CSET.....	153
Tabela 5.25: Projeções de evolução das populações animais segundo a narrativa do cenário A1F (IPCC,2000).....	153
Tabela 5.26: Projeções de evolução das populações dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos segundo a narrativa do cenário CSEA.....	154
Tabela 5.27: Projeções de lançamento de cargas poluidoras de rejeitos industriais e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição das cargas poluidoras, segundo narrativa do cenário CSET.....	156
Tabela 5.28: Projeção das taxas médias de evolução da produção industrial, no continente Sul-Americano, segundo a narrativa do cenário de referência A1F (IPCC, 2000).....	157
Tabela 5.29: Projeções de lançamento de cargas poluidoras orgânicas de rejeitos industriais e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição das cargas poluidoras, segundo narrativa do cenário CSEA.....	158
Tabela 5.30: Evolução das demandas setoriais por água, na UGRHI do Tietê Jacaré, segundo as narrativas dos cenários CSEA e CSET.....	160
Tabela 5.31: Parâmetros característicos da relação entre oferta e disponibilidade hídricas na análise de situação crítica, para as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário A.....	166
Tabela 5.32: Parâmetros característicos da relação entre oferta e disponibilidade hídricas na análise de situação crítica, para as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário B.....	168

LISTA DE SIGLAS.

ANA – Agência Nacional de Águas.
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
AR - Modelo Estocástico Linear Auto-Regressivo.
ARIMA - Modelo Estocástico Linear Auto-Regressivo e Média Móvel Integrado.
ARMA – Modelo Estocástico Linear Auto-Regressivo e Média Móvel.
CBH-TJ – Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré.
CCA – Cenário Climático Alternativo.
CCT – Cenário Climático Tendencial.
CERH – Conselho Estadual dos Recursos Hídricos.
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente.
CROPWAT – A Computer Program for Irrigation Planning and Management.
CSEA – Cenário Sócio Econômico Alternativo.
CSET – Cenário Sócio Econômico Tendencial.
DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio.
DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica.
DQO – Demanda Química de Oxigênio.
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
FAO - Food and Agricultural Organization.
FEHIDRO – Fundo Estadual de Recursos Hídricos.
GCM – General Circulation Model.
HEC – Hydrological Engineering Center.
HMS – Hydrologic Modeling System.
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IDH – Índice de Desenvolvimento Humano.
IPM – Índice de Participação dos Municípios na Arrecadação do ICMS.
IMAGE - Integrated Model to Assess the Global Environment.
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change.
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.
MAR - Modelo Estocástico Linear de Média Móvel.
MMA- Ministério do Meio Ambiente.

MDSA – Modelo de Demanda Setorial por Água.

OD – Oxigênio Dissolvido.

OMC – Organização Mundial do Comércio.

OMS – Organização Mundial da Saúde.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico.

ONU – Organização das Nações Unidas.

PIB – Produto Interno Bruto.

PNB – Produto Nacional Bruto.

PWRMS – Peak-weighted root mean square error.

SEADE – Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados.

SIGRH – Sistema Integrado de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.

SMA – Soil Moisture Accounting Units Model.

SRES – Special Report on Emission Scenarios.

SRH/MMA – Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente.

UDCM – Upwelling Diffusion Climate Model.

UGRHI – Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos.

USACE – United States Army Corps of Engineers.

USGS – United States Geological Survey.

RESUMO.

Este trabalho de Dissertação objetiva uma proposta metodológica para a análise da relação entre cenários futuros de disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica, levando-se em consideração a evolução dos fatores intervenientes à oferta hídrica superficial e à demanda hídrica, segundo a narrativa de cenários tendenciais de propagação dos padrões históricos de evolução destes fatores e a narrativa de cenários alternativos. Esta análise é feita através de um balanço hídrico entre disponibilidade hídrica e demanda hídrica. Esta proposta metodológica é aplicada sobre a região de abrangência da UGRHI do Tietê-Jacaré, e esta aplicação objetiva contribuir para a elaboração do Plano de Bacia da UGRHI em questão.

Os fatores intervenientes à oferta hídrica superficial dizem respeito às variáveis meteorológicas, que influem diretamente no regime de precipitações, e aos padrões estatísticos históricos de evolução das precipitações. Os fatores intervenientes à demanda hídrica dizem respeito às variáveis sócio-econômicas e parâmetros tecnológicos de eficiência dos usos múltiplos dos recursos hídricos.

Ambos os cenários, tendenciais e alternativos, narram a evolução destes fatores intervenientes à disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica nas dimensões climática e sócio-econômica.

Na dimensão climática são propostos dois cenários de evolução dos fatores intervenientes à disponibilidade hídrica: o Cenário Climático Tendencial (CCT) e o Cenário Climático Alternativo.

O cenário CCT é uma propagação futura dos padrões estatísticos históricos de evolução dos regimes de precipitações. Para este cenário são geradas séries sintéticas de precipitação, sobre a região ora em estudo, a partir da aplicação de um modelo estocástico linear. O cenário CCA leva em consideração os efeitos regionais das projeções de mudanças climáticas do cenário A1F (IPCC, 2000) para a região ora em estudo. Para este cenário são inferidos os efeitos da projeção de aumento da temperatura, sobre as séries geradas, através de relações empíricas regionais e conceituais de algumas variáveis meteorológicas que influem sobre o comportamento do regime de precipitações.

Para a estimativa da disponibilidade hídrica superficial, segundo os dois cenários climáticos supracitados, foi usado o modelo HEC-HMS 2.1 (USACE) de modelagem e simulação de processos de chuva-vazão.

Na dimensão sócio-econômica são propostos dois cenários de evolução dos fatores intervenientes à demanda hídrica: o Cenário Sócio-Econômico Tendencial (CSET) e o Cenário Sócio-Econômico Alternativo (CSEA).

O cenário CSET é uma propagação futura dos padrões estatísticos históricos de evolução dos fatores sócio-econômicos e parâmetros tecnológicos intervenientes à demanda hídrica. O cenário CSEA leva em consideração os efeitos regionais das projeções de mudanças sócio-econômicas do cenário A1F (IPCC, 2000) para a região ora em estudo.

Como ferramenta computacional para a estimativa de evolução dos fatores intervenientes à demanda hídrica foi desenvolvido, pelo autor desta Dissertação, o modelo MDSA (Modelo de Demanda Setorial por Recursos Hídricos) baseado na metodologia do modelo NoWUM (Nordeste Water Use Model) (GAISER, T. et al., 2003).

O resultado principal deste trabalho de Dissertação foi obtido quando da comparação entre os cenários de disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica.

Para todos os cenários comparativos foi constatada a evolução para uma situação crítica da relação entre disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica, principalmente nos períodos de estiagem de chuvas, ou períodos de recessão dos escoamentos superficiais.

A ocorrência futura da situação crítica, ou escassez hídrica, varia de acordo com a maior ou menor pressão sobre os recursos hídricos, de acordo com os cenários sócio-econômicos, e de acordo com uma disponibilidade maior ou menor de chuvas sobre a região ora em estudo, de acordo com os cenários climáticos.

Embora se possa esperar e seja evidente, de forma intuitiva, a ocorrência da escassez hídrica, a proposta, deste trabalho de Dissertação, é a elaboração de uma metodologia, ou conjunto de métodos, para a estimativa quantitativa das variáveis de oferta e disponibilidade e demanda hídrica em todas as dimensões espacial e temporal.

Palavras-Chave: cenários, disponibilidade hídrica, demanda hídrica, modelagem matemática.

ABSTRACT.

This work aims a methodological proposal for the analysis of future scenarios of surface water availability and water demand, being taken into consideration the evolution of the intervening factors of surface water availability and water demand, according to the narrative of trend scenarios of propagation of the historical standards, and the narrative of alternative scenarios. This methodological proposal is applied on the region of the UGRHI of Tietê-Jacaré, and this objective application is to contribute for the elaboration of the Watershed Plan of the UGRHI.

The intervening factors to superficial water availability concern to the meteorological variables that influence directly in the precipitation regimen and to the historical statistical standards of evolution of precipitations. The intervening factors to the water demand concern to the socioeconomic variables and technological parameters of efficiency of the multiple uses of the water resources.

Both scenarios, trend and alternative, tell the evolution of these intervening factors into the superficial water availability and water demand in the climatic and socioeconomic dimensions.

In the climatic dimension two scenarios of evolution of the intervening factors to the water availability are considered: the Climatic Tendency Scenario (CCT) and the Climatic Alternative Scenario (CCA).

The Scenario CCT is a future propagation of the historical statistical standards of evolution of regimes of precipitations. For this scenario synthetic precipitation series are generated, on the region in study, from the application of a linear stochastic model.

The Scenario CCA takes in consideration the regional effect of the projections of climatic changes of scenario A1F (IPCC, 2000) for the region in study. For this scenario the effect of the projection of increase of the temperature are inferred, on the generated series, through regional and conceptual empirical relations of some meteorological variables that influence on the behavior of the precipitation behavior.

For the estimate of the superficial water availability, according to two above-mentioned climatic scenarios, the model HEC-HMS 2,1 (USACE) of modeling and simulation of hydrological processes was used.

In the socioeconomic dimension two scenarios of evolution of the intervening factors to the water demand are considered: the Tendency Socioeconomic Scenario (CSET) and Alternative Socioeconomic Scenario (CSEA).

Scenario CSET is a future propagation of the historical statistical standards of evolution of the socioeconomic factors and intervening technological parameters to the water demand. Scenario CSEA takes in consideration the regional effect of the projections of socioeconomic changes of scenario A1F (IPCC, 2000) for the region in study.

As a computational tool for the estimate of the evolution of the intervening factors to the water demand it was developed the MDSA model (Model of Sectorial Demand for Water Resources) based in the methodology of the NoWUM model (Northeast Water Use Model) (GAISER, T. et al.).

The main result of this work was gotten when of the comparison between the scenarios of superficial water availability and water demand.

For all the comparative scenarios were evidenced the evolution for a critical situation of the relation between superficial water availability and water demand, mainly in the periods of no rains, or periods of contraction of the superficial drainings.

The future occurrence of the critical situation, or water scarcity, varies in accordance to the greater or minor pressure on the water resources, in accordance with the socioeconomic scenarios, and in accordance with a bigger or lesser availability of rains on the region in study, in accordance with the climatic scenarios.

Although if it can wait and either evident the occurrence of the water scarcity, the proposal, of this work, is the elaboration of a methodology, or set of methods, for the quantitative estimate of the variable of availability and water demand in all the space and temporal dimensions.

Key-Words: scenarios, water availability, water demand, mathematic modeling.

1. INTRODUÇÃO.

A água no mundo inteiro já é entendida como um bem finito e de valoração econômica, pois já se compreende que sua escassez é certa pela explosão de consumo para todos os usos em projeção para o futuro.

Esse paradigma deve ser base para uma estratégia que resulte num plano regional de recursos hídricos capaz de anunciar agora o volume de água necessário para suprir os usos humanos e animal, para a agricultura, para a indústria e outros mais num prazo eminente. Fixados esses volumes, ter-se-ia uma meta objetiva de formação de água a partir de diversas alternativas, mapeadas de acordo com as especificidades locais, como a construção de reservatórios, exploração de aquífero.

Não menos importante, a gestão da demanda hídrica deve ser efetuada em conjunto com a gestão da oferta hídrica através do controle sobre o consumo e aumento da eficiência no uso dos recursos hídricos através da conscientização de seu valor intrínseco e de seu valor econômico.

Os projetos de engenharia, planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, que objetivam suprir a demanda hídrica, ou equilibrar o balanço hídrico, dos mais diversos setores usuários, geralmente são efetuados de forma pró-ativa às perspectivas de evolução dos fatores intervenientes à demanda hídrica. Obras que visam à garantia da disponibilidade hídrica, por exemplo, são geralmente dimensionadas para perspectivas quantitativas de consumo de populações e atividades econômicas num horizonte de tempo de 25 anos.

No entanto, num mundo em processo de globalização, um número cada vez maior de fatores externos influencia os padrões regionais de desenvolvimento econômico, social, cultural e político-institucional que, diretamente ou indiretamente, intervêm sobre os recursos hídricos. Portanto, a partir desta explanação, a incerteza quanto à estimativa da demanda deve aumentar ao passo da dinâmica de um mundo em processo de globalização.

Além dos fatores supracitados, perspectivas de variações climáticas cada vez mais bruscas deverão afetar a disponibilidade hídrica, nas dimensões espacial e temporal, fomentando ainda mais as incertezas da análise da relação futura entre oferta e demanda hídricas.

Segundo Araújo et. Al (2004) as mudanças globais e suas consequências são desafios aos gestores e pesquisadores dos Recursos Hídricos, especialmente em regiões que se configuram num ambiente de conflito por água.

É nessa conjuntura de possibilidades de cenários de disponibilidade e oferta hídricas, influenciadas por fatores externos aos regionais, em que se situa a região contida pela Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI) do Tietê-Jacaré, uma vez que esta região apresenta uma atividade econômica voltada para os mercados interno e externo.

Este trabalho de pesquisa buscou elaborar uma metodologia de análise quantitativa da relação futura entre a disponibilidade hídrica e a demanda hídrica segundo projeções das narrativas de cenários sócio-econômicos e cenários climáticos.

As estimativas de disponibilidade hídrica futura foram efetuadas segundo os impactos futuros das projeções de mudanças climáticas feitas pelo IPCC (“Intergovernmental Panel On Climate Change”) e propagação do padrão histórico recente de fatores intervenientes ao regime de precipitações. Estas estimativas foram realizadas através da geração de séries sintéticas de precipitação, orientadas segundo a tendência e sazonalidade das narrativas dos cenários climáticos, e modelagem e simulação dos processos de escoamento superficial nas bacias componentes UGRHI do Tietê-Jacaré.

As estimativas das demandas hídricas setoriais futuras, foram efetuadas segundo os impactos futuros das projeções de crescimento econômico e evolução social feitas pelo IPCC (2000) e projeções do comportamento histórico recente. Estas estimativas foram realizadas através do modelo MDSA (Modelo de Demanda Setorial por Recursos Hídricos), elaborado pelo autor desta Dissertação, cuja evolução dos parâmetros e variáveis seguiram a evolução dos cenários sócio-econômicos adotados.

2. OBJETIVOS.

O objetivo geral desta Dissertação é propor uma metodologia de análise quantitativa da relação entre a disponibilidade e a demanda por recursos hídricos, nas nove sub-bacias que compõem a UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo a combinação das narrativas de dois cenários futuros de mudanças sócio-econômicas e dois cenários futuros de mudanças climáticas.

Os objetivos específicos desta Dissertação são:

- Modelar e simular séries sintéticas futuras de precipitação, para as nove sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo as narrativas dos cenários futuros de mudanças climáticas.
- Modelar e simular a disponibilidade de recursos hídricos superficiais, nas nove sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo as narrativas dos cenários futuros de mudanças climáticas.
- Modelar e simular a demanda por recursos hídricos, nas nove sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo as narrativas dos cenários futuros de mudanças sócio-econômicas.
- Simular balanços entre disponibilidade e demanda por recursos hídricos, e avaliar eventuais cenários de escassez nas nove sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo a combinação dos cenários futuros de mudanças sócio-econômicas e dos cenários futuros de mudanças climáticas.

An aerial photograph of a river winding through a dense, green forest. The river is dark and meandering, creating a stark contrast with the surrounding lush vegetation. The forest appears to be a mix of different tree species, with varying shades of green. The river starts from the top left and flows towards the bottom right, with several smaller tributaries joining it.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1. CONJUNTURA SÓCIO-ECONÔMICA E OS RECURSOS HÍDRICOS.

3.1.1. O ESTADO DE SÃO PAULO.

3.1.1.1. Os Recursos Hídricos e sua Gestão.

Face à necessidade de se descentralizar a gestão dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo, foi elaborado em 1990, e posto gradativamente em prática, o Plano Estadual de Recursos Hídricos, quando foi proposta a divisão do Estado em 21 unidades de gerenciamento. Posteriormente, essa proposta de divisão hidrográfica foi reavaliada e foram sugeridas algumas alterações, culminando com a indicação de 22 unidades de gerenciamento, que constaram dos subseqüentes Planos Estaduais de Recursos Hídricos de 1994/95 e 1996/99, e que constitui a atual divisão hidrográfica do Estado. A figura 3.1 mostra as unidades de gerenciamento classificadas de acordo com a sua vocação econômica.

Segundo dados do CERH (1999), o território do estado de São Paulo, com área de 248.809 km², está contido no conjunto de bacias hidrográficas interestaduais do Paraná, Atlântico Sul-Leste e Atlântico Sudeste, que somam uma área de drenagem de 731.791 km². A vazão média de longo período, estimada para o conjunto destas bacias interestaduais, é de 9.818 m³/s, enquanto que a parcela destas, correspondente ao território do Estado de São Paulo, é de 3.120 m³/s. Deste total, a bacia do rio Paraná, que contém 85,52% do território paulista, contribui com 68,11% do escoamento total. A bacia do rio Paraíba do Sul, que contém 5,85% da área, contribui com 6,95% do escoamento, ficando para as bacias da vertente marítima o restante de 8,63% da área e 24,94% do escoamento.

A precipitação média anual no estado de São Paulo é de 1.376mm (10.850 m³/s), o escoamento total anual é de 100 bilhões de m³ (3.120 m³/s), e as perdas por evapotranspiração, calculadas pela diferença entre a precipitação e a vazão, são de 981mm (7.730 m³/s) (CERH, 1999). Como resultado desse balanço hídrico básico, somente 29% da precipitação torna-se efetiva na produção de escoamentos.

Teoricamente, o máximo potencial possível de ser explorável é a vazão média de longo período produzida pelo total de escoamentos. No entanto, por razões de ordem técnica e econômica, esse potencial se reduz a 70% da vazão média de longo período.

Figura 3.1 – Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos no Estado de São Paulo. (Fonte: CERH,1999)

Segundo dados do CERH (1999), a vazão mínima mensal estimada para o estado, com 10 anos de período de retorno, é de $1.087 \text{ m}^3/\text{s}$, cerca de 35% do escoamento total. A vazão mínima de 7 dias consecutivos, com 10 anos de período de retorno, é de $892 \text{ m}^3/\text{s}$, ou seja, 29% do escoamento total e 82% da vazão mínima mensal, com 10 anos de período de retorno. A vazão para 95% de permanência do tempo é de $1.258 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente 40% do escoamento total. A vazão de referência, que leva em conta a regularização assegurada por reservatórios, mais as contribuições mínimas das áreas das bacias não controladas, é estimada em $2.020 \text{ m}^3/\text{s}$, no estado, o que corresponde a 65% do escoamento total no estado.

3.1.1.2. O Regime de Chuvas.

O Estado de São Paulo, ao longo do ano, tem diferentes características climáticas em função de avanços e recuos de massas de ar sobre o território. As massas polares induzem períodos de pluviosidade mais elevada, enquanto períodos mais secos ocorrem em função da atuação das massas intertropicais.

No Estado de São Paulo a distribuição das chuvas é função do domínio das massas tropicais, continental e marítima, e polares, com correntes de sul e leste; à

disposição do relevo e à proximidade ou não do mar. Devido a essas características, conforme MONTEIRO (1973) e SANT'ANNA NETO (1995), cerca de 70 a 80% das chuvas no Estado de São Paulo são originadas dos sistemas extra tropicais, através da Frente Polar Atlântica.

O Estado de São Paulo recebe grande quantidade de chuvas, com índices anuais que variam de 1.100 a 2.000 mm (MONTEIRO, 1973). As chuvas concentram-se, de maneira geral, de outubro a março, com diferenciações quanto ao trimestre mais chuvoso. O período de menor pluviosidade ocorre de abril a setembro, com o trimestre mais seco distribuído entre junho e agosto. Isto ocorre porque a Massa Polar Atlântica (dominante) favorece a dissipação das frentes para o nordeste do país. As precipitações no Estado de São Paulo diminuem do litoral para o Interior, não prevalecendo essa constatação para aquelas áreas com relevo mais elevado.

3.1.1.2. Características Sócio-Econômicas.

Nas últimas décadas o Estado de São Paulo apresentou um acentuado crescimento econômico com relação às outras unidades da federação. Atualmente possui inúmeras atividades nos setores primário, secundário e terciário da economia desde a produção de commodities aos serviços de telecomunicação digital. Este desenvolvimento econômico recente, associado às políticas industriais e governamentais de expansão econômica e interiorização do setor industrial, provocou a migração populacional para o interior do estado e a re-configuração demográfica. Atualmente, algumas cidades do interior apresentam elevadas taxas de crescimento populacional e de densidade demográfica.

O crescimento acelerado das últimas décadas acarretou diversos problemas, inclusive relativos à infra-estrutura urbana como saneamento, habitação, saúde, educação e outros ligados ao meio físico, como erosão, inundação, poluição das águas etc., muitas vezes decorrentes da falta de uma política de ordenamento do território municipal. Como cerca de 90% da população vive em áreas urbanas (IBGE, 2000), é fundamental a elaboração de leis e instrumentos de planejamento que tenham por finalidade ordenar e controlar adequadamente a ocupação dos solos urbanos.

Nas últimas três décadas, segundo dados do IBGE (2000), houve diminuição das taxas de crescimento e de mortalidade e desaceleração do ritmo de migração para o

estado. Como resultado, houve uma sensível redução da taxa de crescimento populacional de 3,5% para 1,58% no período. Segundo dados do CERH (1999), com exceção das UGRHI's Aguapeí e Mantiqueira, houve aumento populacional em todos os municípios das atuais unidades de gerenciamento de recursos hídricos. Em 1996 a população do estado foi estimada pelo censo do IBGE em 34 milhões de habitantes. Na região leste do Estado, nas UGRHI's industrializadas do Alto Tietê, Baixada Santista, Paraíba do Sul, Piracicaba/Capivari/Jundiaí e Tietê/Sorocaba, concentram-se 72% da população do Estado, totalizando 24.610.457 habitantes. Nessas unidades de gerenciamento a densidade populacional em 1996 era de 497,8 hab./km², superando em muito a média estadual de 137,07 hab./km². Nesta análise destaca-se a UGRHI do Alto Tietê com uma população total de 16.444.565 habitantes e densidade demográfica de 2.392 hab./km².

3.1.2. A UGRHI DO TIETÊ-JACARÉ.

3.1.2.1. A Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré.

A lei n.º 9.034/94 institui a UGRHI 13 como sendo a unidade de gerenciamento dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré. Esta UGRHI localiza-se na porção central do estado, e faz parte da Diretoria Regional do DAEE da Bacia do Baixo Tietê. A figura 3.1 apresenta a localização da UGRHI do Tietê-Jacaré em relação às demais UGRHI's definidas para o estado. Segundo o CBH-TJ (2000), a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré possui uma área de drenagem de 11.786,6 Km² e perímetro de aproximadamente 570 Km. Esta UGRHI é definida pelas Bacias Hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira e seus respectivos tributários, além de porções de áreas drenadas diretamente para o Rio Tietê, no trecho situado entre as Usinas Hidrelétricas de Ibitinga, a jusante, e de Barra Bonita a montante.

- ***Sub-Bacias e Municípios.***

No âmbito dos trabalhos de elaboração do relatório de diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré, esta foi dividida em 9 sub-bacias,

Tabela 3.1: Nomes e Áreas das sub-bacias que compõe a UGRHI do Tietê-Jacaré.

Nome da Sub-Bacia	Área (Km ²)	% da UGRHI
Rio Tietê / Rio Claro	2.267,28	19,2
Rio Tietê / Rio Lençóis	2.085,79	17,7
Rio Bauru	614,74	5,2
Baixo Jacaré-Guaçu	1.708,34	14,5
Médio Jacaré-Guaçu	1.065,67	9,0
Alto Jacaré-Guaçu	1.112,91	9,5
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1.051,65	8,9
Alto Jacaré-Pepira	1.411,08	12,0
Rio Jaú	467,16	4,0
TOTAIS	11.784,62	100,0

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

Figura 3.2: Rede de Drenagem e sub-bacias que compõe a UGRHI do Tietê-Jacaré. (Fonte: CBH-TJ, 2000)

designadas com os respectivos nomes de seus cursos d'água principais. A tabela 3.1 apresenta os nomes das sub-bacias, as respectivas áreas de drenagem em Km² e percentuais relativos à área total da UGRHI do Tietê-Jacaré. A figura 3.2 mostra a rede de drenagem e os limites das 9 sub-bacias que compõe a UGRHI do Tietê-Jacaré.

Figura 3.3: Municípios da UGRHI do Tietê-Jacaré e suas relações em área de ocorrência nas 9 sub-bacias que compõe a Bacia do Tietê-Jacaré. (Fonte: CBH-TJ, 2000)

A Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré possui 34 municípios com sede na sua área de abrangência. Destes, 16 estão totalmente inseridos na UGRHI do Tietê-Jacaré e 18 possuem seus territórios em UGRHI's adjacentes. A UGRHI do Tietê-Jacaré ainda engloba parte dos territórios dos municípios de Analândia, Matão e São Pedro, com sede administrativa fora dos limites da UGRHI do Tietê-Jacaré. Dos 34 municípios com sede na UGRHI, os municípios de Bauru, Araraquara, São Carlos, Jaú, Lençóis Paulista, Agudos e Barra Bonita destacam-se por abrigar 70% da população regional e responderem pela geração de 77% da produção total de bens e serviços da região. A figura 3.3 apresenta a distribuição dos municípios nas 9 sub-bacias da área da UGRHI do Tietê-Jacaré.

3.1.2.2. Características Climáticas.

De acordo com SETZER (1966) existe na Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré dois tipos climáticos: o tipo *Cwa* e o tipo *Cwb*. O clima do tipo *Cwa* é quente e úmido, com inverno seco. Apresenta no mês mais seco, totais de chuvas inferiores a 30 mm; temperaturas médias superiores a 22^o C no mês mais quente, e temperaturas menores que 18^o C, no mês mais frio. O clima do tipo *Cwb* é temperado úmido com estação seca. Os totais de chuvas no mês mais seco são menores que 30 mm; a temperatura média no mês mais quente é inferior a 22^o C e, no mês mais frio, é menor que 18^o C.

Segundo MONTEIRO (1973) o Estado de São Paulo tem nove unidades climáticas principais. A UGRHI do Tietê-Jacaré corresponde, em sua maior parte, à unidade V, denominada Serra de São Carlos, que é caracterizada por clima tropical com períodos secos e úmidos, e está sob maior atuação das massas equatoriais e tropicais.

A variabilidade espacial das chuvas sobre o estado de São Paulo, no período de 1971-1993, foi identificada em três grandes conjuntos segundo classificação de SANT'ANNA NETO (1995). O primeiro com chuvas médias anuais superiores a 2.000 mm; o segundo com médias anuais entre 1.500 e 2.000 mm; e o terceiro com chuvas anuais entre 1.100 e 1.500 mm. A UGRHI do Tietê-Jacaré está inserida no segundo conjunto.

Na UGRHI do Tietê-Jacaré, como na maior parte do Estado, o período mais chuvoso ocorre de outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso de dezembro a fevereiro. O período mais seco vai de abril a setembro, com o trimestre mais seco entre junho e agosto.

Quanto às temperaturas, estas são condicionadas pela altitude e latitude de cada lugar. Na UGRHI do Tietê-Jacaré, as temperaturas médias anuais variam de 21 a 23 °C; as médias máximas em janeiro situam-se entre 29 a 32 °C; e a média das mínimas em julho de 11 a 13 °C (IPT, 1987). Na porção da Serra de São Carlos, as temperaturas são mais baixas, ficando entre 1 e 2 °C abaixo da média da UGRHI, tanto para os valores de máximas como para os de mínimas.

3.1.2.3. Disponibilidade Hídrica.

- **Precipitações Médias Históricas.**

No âmbito da elaboração dos estudos do diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré pelo CBH-TJ (2000), foram calculadas as precipitações médias históricas, para as nove sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, pelo método da média aritmética. Os resultados encontram-se na tabela 3.2.

- **Disponibilidade Hídrica Superficial.**

A tabela 3.3 mostra os resultados dos estudos, elaborados pelo CBH-TJ (2000), de avaliação dos parâmetros indicativos da disponibilidade hídrica superficial nas nove

Tabela 3.2: Precipitações Médias Históricas nas sub-bacias do Tietê-Jacaré.

Sub-Bacia	Área (km ²)	Precipitação Média Anual Histórica (mm)
Rios Tietê / Claro	2.267,28	1.332
Rios Tietê / Lençóis	2.085,79	1.284
Rio Bauru	614,74	1.220
Baixo Jacaré-Guaçú	1.708,34	1.340
Médio Jacaré-Guaçú	1.065,67	1.395
Alto Jacaré-Guaçú	1.112,91	1.289
Baixo Médio Jacaré-Pepira	1.051,65	1.401
Alto Jacaré-Pepira	1.411,08	1.257
Rio Jaú	467,16	1.283
TOTAL	11.784,62	1.332

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

Tabela 3.3: Disponibilidade Hídrica Superficial por sub-bacia.

Sub-Bacia	Área de Drenagem (km²)	Vazão Média (m³/s)	Q_{7,10} (m³/s)
Rios Tietê / Claro	2.267,28	18,41	7,6
Rios Tietê / Lençóis	2.085,79	16,84	7
Rio Bauru	614,74	4,99	2,06
Baixo Jacaré-Guaçú	1.708,34	13,87	5,7
Médio Jacaré-Guaçú	1.065,67	9,17	3,8
Alto Jacaré-Guaçú	1.112,91	10,12	4,2
Baixo Médio Jacaré-Pepira	1.051,65	8,54	3,5
Alto Jacaré-Pepira	1.411,08	12,15	5
Rio Jaú	467,16	3,79	1,56
TOTAL	11.784,62	97,78	40,42

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

sub-bacias do Tietê-Jacaré. Neste estudo foram usados registros históricos até o ano de 1997. Estes estudos foram elaborados com o uso da carta de isoietas médias anuais de 1982 adotando-se, como precipitação média, o valor de 1.300,00 mm/ano.

- **Disponibilidade Hídrica Subterrânea.**

A disponibilidade hídrica subterrânea na bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré se deve à presença de quatro unidades aquíferas em partes livres e confinadas. As quatro unidades aquíferas são o Aquífero Cenozóico, Aquífero Bauru, Aquífero Serra Geral e Aquífero Guarani. As denominações destes aquíferos provêm dos estudos do DAEE (1976) para as águas subterrâneas da região. O CBH-TJ (2000) realizou análises de produtividade dos aquíferos através do levantamento de dados da vazão específica dos poços cadastrados. A tabela 3.4 mostra estes resultados.

Tabela 3.4: Vazão, por aquífero, dos poços cadastrados na UGRHI do Tietê-Jacaré.

Aquífero	Número de Poços	Vazão Mínima (m³/h)	Vazão Máxima (m³/h)	Vazão Média (m³/h)
Cenozóico	5	1,5	3,3	2,6
Bauru	72	1,3	135,0	16,8
Bauru/Serra Geral	21	2,25	340,8	27,6
Serra Geral	61	1,0	145,0	19,7
Geral/Botucatu	76	4,0	230,0	47,9
Botucatu Livre	58	1,3	377,0	75,7
Botucatu Conf.	42	6,5	352,0	153,9
Não definido	222	1,5	300,0	38,1

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

3.1.2.4. Características Sócio-Econômicas.

- **Demografia.**

Segundo dados do CBH-TJ (2000), em 1996, uma população de 1.233.037 habitava o território da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. Deste montante, 92% habitavam as zonas urbanas. Entre 1970 e 1980 a população da região cresceu em 30,5%, entre 1980 e 1990 32,1% e, na década subsequente, 19,0%. Para o período de 2000 a 2010, o SEADE (1998) estima um crescimento de 17,1% para a população urbana. A fração da população da região, que reside na zona urbana, que em 1980 era de aproximadamente 85%, deverá chegar a 96%, em 2010, segundo as mesmas projeções do SEADE (1998).

Segundo dados da fundação SEADE (1998) em 1996, o conjunto de municípios da região, com população inferior a 20.000 habitantes, detinha 13% da população total. Os municípios com população entre 20.000 e 50.000 habitantes, detinham 22% da população total. Os municípios de Araraquara, Bauru, São Carlos e Jaú, os mais importantes da região, detinham cerca de 60% da população da UGRHI do Tietê-Jacaré.

Neste contexto, destacam-se os municípios de Araraquara e São Carlos que apresentam características sócio-econômicas de aglomeração urbana devido à educação de nível superior, aos vários setores industriais e à diversidade do setor de serviços.

- **Economia.**

A região compreendida pela bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré apresenta uma economia bastante diversificada. Nesta destacam-se o complexo sucro-alcooleiro e o plantio e processamento de cítricos. A atividade sucro-alcooleira é formada pela produção do açúcar e do álcool com base na mesma matéria-prima, a cana-de-açúcar. Este complexo estende-se por quase toda a área da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. O cultivo de citrus, em especial a laranja, concentra-se nas imediações de São Carlos e Araraquara.

Segundo dados da Secretaria de Fazenda do Estado de São Paulo (1999), dos 34 municípios com sede dentro da área da abrangência da UGRHI do Tietê-Jacaré, os municípios de Bauru, Araraquara, São Carlos, Jaú, Lençóis Paulista, Agudos e Barra Bonita, destacam-se pelo seu alto índice de participação municipal IPM com relação aos

Tabela 3.5: Demandas totais cadastradas por tipo de manancial.

Manancial	Produção Mensal (m³)	Demandas Cadastradas (m³/s)	Porcentagem (%)
Superficial	5.165.707	2,257	39,8
Subterrâneo	7.813.457	3,087	60,2
TOTAL	12.979.164	5,344	100,0

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

outros municípios da região, evidenciando uma atividade econômica maior com relação aos outros municípios da região.

3.1.2.5. Demandas Hídricas Atuais.

- **Uso Público.**

No contexto desta análise, o uso público da água compreende o consumo das residências, instituições públicas e comerciais conectadas ou não ao sistema público de distribuição de água, e o lançamento de esgotos. Dos 34 municípios com sede na UGRHI do Tietê-Jacaré, 18 municípios são abastecidos por mananciais de superfície, dos quais apenas Borebi, Itaju e Torrinha são abastecidas exclusivamente por mananciais de superfície. O abastecimento exclusivamente por água subterrânea é realizado em 16 municípios. A tabela 3.5 resume as demandas totais cadastradas, por tipo de manancial, dos conjuntos de municípios com sede na UGRHI do Tietê-Jacaré.

O CBH-TJ (2000) identificou 30 pontos de captação, em mananciais de superfície, para o abastecimento público para uma demanda total cadastrada, calculada pela soma da vazão em cada ponto de captação, de 2,257 m³/s. Em relação à água subterrânea, foram identificados 195 poços em operação para o abastecimento público, totalizando a demanda de água em 3,087 m³/s.

Com relação ao lançamento de esgotos domésticos, todos os municípios da UGRHI possuem rede de coleta de esgotos, com pelo menos um ponto de lançamento. Segundo o CBH-TJ (2000) os lançamentos em operação totalizam 132 pontos, com vazão total cadastrada de 1,553 m³/s. Observa-se que a vazão total apresentada refere-se aos valores cadastrados no banco de dados de lançamentos públicos do DAEE, compreendendo apenas 40 pontos (30%) do total identificado. As vazões lançadas nos demais municípios foram estimadas multiplicando-se a população atendida pela rede de esgoto pelo consumo de água *per capita* e pelo fator de correlação de 0,8. Para os

Tabela 3.6: Demandas industriais cadastradas na UGRHI do Tietê-Jacaré.

Tipo de Uso	Número de Pontos	Vazão (m³/s)
Captação superficial	36	6,813
Captação subterrânea	54	0,326
Lançamento de esgotos	18	4,851
TOTAL	108	11,990

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

municípios que não dispunham do consumo *per capita* foi adotado o valor médio calculado na UGRHI de 230,9 L/habitante/dia. A vazão total estimada para os lançamentos resultou em 2,42 m³/s. Com relação às residências e instituições públicas e comerciais não conectadas à rede pública de abastecimento, o CBH-TJ (2000) não identificou nenhuma captação em manancial de superfície. Em relação ao uso das águas subterrâneas, foram identificados 195 poços resultando numa demanda total de 3,087 m³/s.

- **Uso Industrial.**

O CBH-TJ (2000) identificou, para o uso exclusivamente industrial, 36 captações superficiais, 18 pontos de lançamento de esgotos e 54 poços na região em estudo (ver tabela 3.6).

- **Uso na Irrigação.**

A média anual de chuvas, de 1.355 mm/ano, sobre a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, é, em quantidade, satisfatória para garantir a produção agrícola da região. No entanto, como as precipitações não se distribuem uniformemente ao longo do ano, em determinados períodos ocorrem déficits hídricos, principalmente para as culturas anuais, que devem ser compensados pela irrigação. A região é caracterizada pela ocorrência de déficit hídrico, nos meses de maio a setembro, para a maioria das culturas cultivadas o ano inteiro e, durante a primavera e verão, ocorrem os chamados veranicos (período de dias sem chuvas em meses mais chuvosos). É esta configuração do regime de chuvas na região que caracteriza o uso da irrigação.

Segundo dados do DAEE (1990), em 1990 a irrigação utilizava mais de 25% da água consumida no estado de São Paulo. O mesmo órgão prevê que, em 2010, este consumo possa chegar a 50%. A tabela 3.7 apresenta a distribuição das áreas cultivadas,

Tabela 3.7: Demandas estimadas e cadastradas para a irrigação por sub-bacia.

Sub-Bacias	Demanda Outorgada (m³/s)	Demanda Estimada (m³/s)
Rios Tietê / Claro	0	1,31
Rios Tietê / Lençóis	0,105	4,87
Rio Bauru	0	0,13
Baixo Jacaré-Guaçú	0	0,40
Médio Jacaré-Guaçú	0,0004	0,81
Alto Jacaré-Guaçú	0,0017	0,79
Baixo Médio Jacaré-Pepira	0,0042	0,58
Alto Jacaré-Pepira	0	0,23
Rio Jaú	0	0,18
TOTAL	0,1113	9,30

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

com ou sem irrigação, para as sub-bacias do Tietê-Jacaré, obtidas do censo agropecuário do IBGE (1995-1996a).

O CBH-TJ (2000) estimou o consumo intensivo médio anual de água pela Irrigação, na região, em 0,327 litros/s.ha. Com estes dados, obteve-se uma demanda total média de 9,30 m³/s de água para a produção agrícola irrigada. A tabela 3.7 apresenta as estimativas do CBH-TJ (2000) de demanda para o setor da irrigação na região e a demanda cadastrada pelo DAEE.

- **Usos não Consuntivos.**

USINAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA.

Na região compreendida pela bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré situam-se três usinas hidrelétricas, todas ao longo do Rio Tietê (CBH-TJ, 2000).

Segundo dados do ONS (2002) a Usina Hidrelétrica de Barra Bonita localiza-se no limite sudeste da UGRHI, entre os municípios de Barra Bonita e Igaraçu do Tietê, com reservatório ocupando uma área de 310 km². A Usina Hidrelétrica Álvaro de Souza Lima, conhecida como Bariri, localiza-se entre os municípios de Bariri e Boracéia, na porção centro-oeste da UGRHI, compreendendo cerca de 63 km² de área inundada. A Usina Hidrelétrica de Ibitinga localiza-se na porção noroeste da UGRHI, entre os municípios de Ibitinga e Jacanga, com reservatório de cerca de 114 km².

NAVEGAÇÃO.

A Hidrovia Tietê-Paraná soma 76 milhões de hectares, cerca de 9% do território brasileiro, incorporando quatro dos cinco maiores estados agrícolas do país. É uma importante via de acesso e fluxo de mercadorias. No trecho da hidrovia, dentro da área da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, existe cinco portos, um terminal turístico, um terminal intermodal e um estaleiro e terminal (CBH-TJ, 2000).

AQUICULTURA.

Segundo dados do DAEE (1990), na região da UGRHI do Tietê-Jacaré, existem 38 pontos de captação superficial registrados para uso em aquicultura, com demanda total de 0,26 m³/s. No entanto, segundo PINO et al. (1997), a UGRHI do Tietê-Jacaré apresenta 201 propriedades rurais que possuem tanques de piscicultura e sete que possuem tanques de ranicultura verificando-se, portanto, que a quantidade de captações cadastradas no DAEE representa apenas 18% do total obtido no Projeto LUPA (PINO et al., 1997).

• Demanda Global

Este item compõe o quadro geral de demandas globais na UGRHI do Tietê-Jacaré. As demandas totais aqui apresentadas referem-se às captações dentro dos limites da UGRHI do Tietê-Jacaré. A tabela 3.8 apresenta as captações e lançamentos, cadastrados, nos mananciais de superfície.

Com relação às águas subterrâneas, o CBH-TJ (2000) obteve dados de 361 poços tubulares em funcionamento na UGRHI. As demandas das águas subterrâneas foram calculadas descartando-se os poços desativados, paralisados ou sem informações quanto ao estado atual, e adotado o tempo de funcionamento de 20 horas por dia para os poços em que não foi possível obter esta informação. Os poços considerados em funcionamento totalizaram 70% do total de 516 poços cadastrados dentro dos limites da UGRHI. A tabela 3.9 apresenta a quantidade de poços cadastrados e as respectivas vazões.

Tabela 3.8: Lançamentos e captações superficiais cadastrados na UGRHI do Tietê-Jacaré.

Uso	Pontos de Captação		Pontos de Lançamentos	
	Quantidade	Vazão (m ³ /s)	Quantidade	Vazão (m ³ /s)
Público	27	1,619	130	2,412
Industrial	29	5,968	14	4,201
Irrigação	10	0,111	-	-
Não definido	1	0,001	2	0,001
TOTAL	67	7,699	146	6,614

(Fonte: CBH-TJ, 2000)

3.2. CENÁRIOS DE REFERÊNCIA.

Estudos que têm como referência as mudanças climáticas requerem imagens futuras de como o sistema global poderá evoluir. O futuro da emissão de gases poluentes, por exemplo, é resultado da evolução das complexas interações entre crescimento demográfico, econômico, evolução tecnológica, mudanças sócio-culturais e político-institucionais.

Cenários são possíveis imagens de como o futuro pode vir a se configurar e são ferramentas apropriadas na análise de como os fatores intervenientes podem influenciar nas emissões futuras de gases poluentes.

O IPCC (2001) publicou um conjunto de novos cenários de referência no Relatório Especial sobre Cenários de Emissões Atmosféricas (*“Special Report on Emissions Scenarios”* - SRES). Estes cenários são baseados numa extensa revisão literária, no desenvolvimento de narrativas e na quantificação destas narrativas usando a integração de seis diferentes tipos de modelos de crescimento populacional, modelo de crescimento econômico, modelo de uso e ocupação do solo, modelo de dispersão de gases, modelo de emissão de gases poluentes e modelo de mudanças climáticas, para diferentes países.

Estas narrativas foram construídas segundo dois eixos: o grau de globalização versus regionalização, e o grau de orientação social em valores sociais e ambientais versus o de orientação a valores materiais e econômicos. A partir destes eixos quatro cenários de referência foram construídos, os cenários A1, A2, B1 e B2. A figura 3.4 ilustra a explanação deste parágrafo. As narrativas destes cenários de referência descrevem desenvolvimentos nas dimensões social, econômica, tecnológica, ambiental e político-institucional, e seus respectivos impactos sobre a configuração climática.

Figura 3.4 – Cenários de Referência segundo os eixos de orientação. (Fonte: IPCC, 2000)

3.2.1. O CENÁRIO DE REFERÊNCIA A1.

A narrativa do cenário A1 (IPCC, 2000) descreve um rápido crescimento da economia mundial, uma diminuição nas taxas de crescimento populacional e uma rápida introdução de novas e mais eficientes tecnologias. Neste cenário de globalização há um crescimento contínuo do mercado internacional, do fluxo de informações e transferências de novas tecnologias, entre distintas regiões, tendo como consequência uma substancial redução nas diferenças de renda entre estas regiões.

Segundo o IPCC (2000) o cenário A1 se desenvolve ainda em três subgrupos segundo três direções de mudanças tecnológicas no sistema mundial de produção de energia e configuração da matriz energética. Estes subgrupos do cenário de referência A1 são: o cenário A1F onde há uma intensificação no uso de combustíveis fósseis; o cenário A1T onde há uma diminuição gradativa do uso de combustíveis fósseis; e o cenário A1B onde há um uso homogêneo de todos os tipos de fonte energética.

Governos democráticos e economias capitalistas parecem ser, para estes cenários, a única via econômico-institucional.

Os elementos-chave para a concretização do cenário de referência A1 são:

- A aquisição progressiva de bens materiais como vetor estimulador das atividades sociais e governamentais.
- O desenvolvimento tecnológico como grande propulsor do crescimento econômico.

- O papel dos governos fica restrito a administrar e determinar as regras do grande jogo macro-econômico.
- Comunicação e o fluxo de mercadorias no comércio mundial são os vetores para a formação de uma cultura globalizada.
- Globalização, queda de barreiras comerciais e privatizações tenderão a se intensificar.

Os efeitos sócio-econômicos esperados pela concretização do cenário de referência A1 são:

- Um alto crescimento econômico em países industrializados e menos industrializados e a convergência para os mesmos padrões sócio-econômicos, graças ao desaparecimento de barreiras comerciais, aumento no fluxo internacional de capitais e transferências de tecnologias. A distribuição de renda, entre as regiões, irá se uniformizar daqui a duas ou três gerações. A figura 3.6 ilustra a evolução do Produto Interno Bruto Per Capita, segundo esta narrativa, até o ano de 2100.
- Uma correlação entre maior renda per capita, controle mais efetivo da natalidade e melhoria e difusão dos serviços de saúde causarão uma diminuição da taxa de fertilidade, um aumento da expectativa de vida e do índice de desenvolvimento humano (IDH), e conseqüente diminuição populacional de estimados 9 bilhões em 2050, para 7 bilhões em 2100. A figura 3.5 ilustra a evolução Populacional, segundo esta narrativa, até o ano de 2100.
- Aumento do percentual da população total em áreas urbanas. Segundo esta narrativa 82% da população mundial viverá em áreas urbanas em 2100.
- A produção agropecuária irá crescer consideravelmente aumentando o estresse hídrico em várias regiões do mundo. No entanto, acompanhando a perspectiva de decaimento populacional, a produção agropecuária tende a declinar a partir de 2060.

Os efeitos esperados no setor energético, pela concretização dos sub-cenários de referência A1F, A1T e A1B são:

- Na narrativa do cenário A1F, há um crescimento no uso das fontes primárias de energia, em especial o gás natural e outros combustíveis fósseis, devido, principalmente, ao consumismo. O consumo de energia hidroelétrica ficará estável por falta de alternativas de exploração do potencial hidroelétrico. No

entanto, com o esperado declínio da população, a partir de meados do século corrente, a queda no consumo deste tipo de energia está projetada para o início do ano 2080. A figura 3.7 ilustra a evolução da produção de diferentes matrizes energéticas, até 2100, segundo a narrativa deste sub-cenário.

- Na narrativa do cenário A1T, há um aumento no uso das fontes primárias de energia acompanhada por uma substituição gradativa da matriz energética mais poluente pela menos impactante ao clima. Neste cenário o uso de fontes alternativas menos poluentes é estimulado.
- A Narrativa do Cenário A1B é um meio termo entre as narrativas dos cenários A1F e A1T. Neste cenário, haverá um uso homogêneo de todos os tipos de matriz energética.

Segundo simulações do modelo climático UDCM, tomando como referência as narrativas dos cenários A1B, A1F e A1T, os efeitos médios esperados no clima terrestre são:

- Para os cenários A1B, A1F e A1T, esperam-se um aumento de 3,5 °C, 3,75 °C e 3,2 °C, respectivamente, para a temperatura média global até o ano de 2100, tomando como base a temperatura em 2000. No entanto, por causa da perspectiva de decréscimo populacional a partir de meados do século corrente, espera-se uma diminuição da taxa de crescimento da temperatura. As figuras 3.8 e 3.9 mostram, respectivamente, o crescimento da temperatura e as mudanças na taxa de variação da temperatura até 2100, para o sub-cenário de referência A1.
- Para os regimes de precipitações, o aquecimento global provocará mudanças regionais distintas com diminuição de até 0,7 mm/dia em algumas regiões do globo e aumento de 1,0 mm/dia em outras regiões. A figura 3.10 ilustra a heterogeneidade das mudanças nos regimes de precipitações, segundo a narrativa do sub-cenário A1F, em todo o planeta para os anos de 2050 e 2100.

3.2.2. O CENÁRIO DE REFERÊNCIA A2.

A narrativa do cenário A2 (IPCC, 2000) descreve um ambiente sócio-econômico bastante heterogêneo. Neste cenário as variáveis que compõem um cenário de globalização crescem a taxas progressivamente menores e chegam a se reverter, para os processos de regionalização, em algumas nações. As ações sócio-econômicas

Figura 3.5 – Gráfico de Evolução da População Mundial segundo Cenário A1. (Fonte: IMAGE 2.2)

Figura 3.6 – Gráfico de Evolução do PIB Per Capita Mundial segundo Cenário A1. (Fonte: IMAGE 2.2)

Figura 3.7 – Evolução da Produção de Diferentes Matrizes Energéticas segundo o Sub-Cenário de Referência A1F. (Fonte: IMAGE 2.2)

Figura 3.8 – Evolução da Temperatura Média Global segundo o Sub-Cenário de Referência A1F. (Fonte: IMAGE 2.2)

Figura 3.9 – Mudanças na Taxa de Temperatura Média Global segundo o Sub-Cenário de Referência A1F. (Fonte: IMAGE 2.2)

governamentais são focadas na identidade cultural e economias regionais culminando para um mundo pluralista. Este pluralismo sócio-econômico levará a conflitos de interesse mais acentuados entre as nações e haverá uma tendência ao aumento das discrepâncias econômicas e tecnológicas entre as nações mais ricas e mais pobres.

3.2.3. O CENÁRIO DE REFERÊNCIA B1.

A narrativa do cenário B1 IPCC (2000) descreve um mundo com baixo crescimento populacional, em todos os países, pobres e ricos. Este cenário projeta rápidas mudanças na configuração econômica global devido à difusão do setor de serviços e informação, implicando numa redução dos setores econômicos voltados à produção exclusiva de bens de consumo, e redução do uso intensivo de recursos naturais devido à aplicação de novas tecnologias que aumentem a eficiência dos processos de produção e extração. A ênfase deste cenário é a de uma solução global para a sustentabilidade econômica, social e ambiental.

Figura 3.10 – Heterogeneidade das mudanças nos regimes de precipitações, segundo a narrativa do sub-cenário A1F, em todo o planeta para os anos de 2050 e 2100. (Fonte: IMAGE 2.2)

3.2.4. O CENÁRIO DE REFERÊNCIA B2.

Este é o cenário “verde” dos quatro cenários formulados pelo IPCC (2000). Nos níveis regional e local, as populações buscam seus próprios meios de subsistência e há uma homogeneização espacial das atividades econômicas. Em algumas regiões isto se dá na forma de assentamentos descentralizados, as chamadas bio-regiões, em outras regiões as sociedades optam pelos processos tradicionais de produção mas de forma amplamente extensiva, ou seja, com um número menor de usinas de geração de energia elétrica, devido à difusão da tecnologia das células de hidrogênio, e redução do número de parques industriais. Haverá um aumento das atividades artesanais e do setor terciário da economia. Em termos globais, essas ações levarão a um mundo amplamente regionalizado, sem muitos intercâmbios tecnológicos e culturais, devido à busca das sustentabilidades regionais a partir das configurações locais de disponibilidade de recursos naturais. Neste ambiente, o desenvolvimento tecnológico e econômico será bastante atenuado.

3.2.5. OBSERVAÇÕES SOBRE AS INCERTEZAS DE CENÁRIOS.

- **Incerteza dos Cenários Sócio-Econômicos.**

Mesmo admitindo-se que a conjuntura sócio-econômica global vá evoluir segundo a tendência histórica ou segundo a narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000), as incertezas são muitas quanto à evolução das variáveis sócio-econômicas segundo os impactos regionais, provocados pelas projeções de mudanças globais, por vários fatores.

O principal fator é o papel dos governos em suas respectivas estruturas sócio-econômicas, uma vez que este papel depende muito de ideologias políticas, sociais, institucionais e econômicas. Sendo o governo o agente tributário, este tem o poder de concentrar ou redistribuir renda, podendo os recursos monetários recolhidos, pela atividade tributária, serem usados, ou não, para fins sociais, investimentos em infraestrutura ou subsídios a determinadas atividades econômicas. A orientação na aplicação destes recursos tem uma parcela significativamente subjetiva baseada em ideologias políticas, sociais e econômicas. A parcela objetiva da gestão estratégica, também, tem muitos componentes de incertezas por causa da complexa conjuntura social, econômica, política e institucional. Portanto, sendo o governo o grande ordenador do jogo macro-

econômico, as atividades produtivas, e as respectivas pressões sobre os recursos naturais, dependem muito da gestão governamental.

A gestão do orçamento público também tem forte influência sobre a estrutura macro-econômica. O excessivo endividamento dos governos, provocando grandes restrições orçamentárias, pode levar, por exemplo, a reduções significativas dos investimentos em infra-estrutura e provocar limitações às atividades produtivas. O desequilíbrio das contas públicas leva a processos inflacionários que geram desestabilização dos preços, incertezas para os investimentos dos meios de produção e favorecimentos às atividades do mercado especulativo.

Os grandes debates macro-econômicos como a gestão monetarista ou desenvolvimentista, controle da inflação e condicionamentos ao crescimento econômico, dependência externa e poupança interna, controle de capital e política industrial são outros fortes fomentadores de incertezas da conjectura de cenários sócio-econômicos. Outros fatores, como fontes de financiamento interna e externa, poupança interna, política de superávit fiscal, avanços tecnológicos, investimentos em capital humano e abertura comercial, também contribuem para incrementar as incertezas quanto à conjectura de cenários sócio-econômicos.

Todos os fatores supracitados têm influência significativa sobre os meios de produção, organizações sociais, políticas, institucionais, econômicas e culturais, e por consequência sobre todos os fatores intervenientes ao uso dos recursos hídricos.

- **Incerteza dos Cenários Climáticos.**

Embora se conheçam os aspectos qualitativos dos processos climáticos, a conjectura de cenários de mudanças climáticas tem um componente de incertezas e subjetividades muito grande por vários fatores. Um dos principais fatores é a abordagem probabilística que se faz a vários fenômenos naturais, quando se associa leis teóricas de probabilidade para descrevê-los. Esta abordagem é necessária uma vez que a abordagem analítica, de uma forma geral, é impraticável por falta de recursos computacionais para a simulação das variáveis naturais de interesse.

3.3. CLIMA.

O estado da atmosfera em um determinado momento é definido de tempo. Este estado pode ser avaliado segundo algumas variáveis como umidade relativa do ar, temperatura e pressão. O tempo muda com o passar das horas e dos dias em decorrência dos fenômenos cíclicos naturais de curta duração como os movimentos de rotação e translação da terra. Como o tempo é influenciado por fenômenos cíclicos naturais, além de outros fenômenos naturais, este tende a se repetir periodicamente.

O clima é definido como sendo a repetição anual de tempos atmosféricos, em uma determinada região, ou seja, o clima é a sucessão de tipos atmosféricos, que tendem a repetir-se com regularidade em ciclos anuais, e que caracterizam uma determinada região. O clima tende a ser regular em períodos de tempo muito grandes porém, em períodos de tempo geológicos, o clima também muda de forma natural segundo fenômenos naturais cíclicos de longa duração.

3.3.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

As mudanças climáticas têm como causas os fenômenos cíclicos da natureza e as perturbações provocadas pelas atividades antrópicas, estas últimas causando um aumento na frequência em que estas mudanças ocorrem.

Com o advento da revolução industrial, em meados do século XVIII, os níveis de emissão de dióxido de carbono (CO_2) aumentaram abruptamente em decorrência da queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural. Atualmente, as fontes de energia fóssil representam 80% do consumo mundial. Também o recente desflorestamento contribuiu para um aumento de 30% na concentração de dióxido de carbono na atmosfera (GAISER et al., 2003).

Além do CO_2 , houve também grande aumento da concentração de outros gases na atmosfera, como CH_4 , N_2O , CFC, HFC, PFC e SF_6 . Estes gases também absorvem parte das radiações infravermelhas que a terra irradia para o espaço, provocando uma retenção de calor. Tal fenômeno, chamado de “efeito estufa”, foi responsável por um aumento de cerca de $0,5\text{ }^\circ\text{C}$, no último século, das temperaturas médias da atmosfera terrestre (IMAGE, 2001).

Também contribuem, para as alterações climáticas, os fenômenos naturais do El Niño e La Niña. O primeiro, que é a interação entre a atmosfera e o oceano, associado a

alterações dos padrões normais da temperatura da superfície do mar, assume dimensão planetária, à medida que provoca desarranjos de toda ordem em vários climas da Terra. Há indícios de que este fenômeno tem relação com o “efeito estufa”, como indicam os modelos climáticos de circulação global, os GCM’s. Já o La Niña se caracteriza por ser o oposto do El Niño e pode também ser chamado de episódio frio, pois traz o aumento de chuvas em várias regiões da Terra.

Uma maior quantidade de energia armazenada na atmosfera, em razão do aquecimento global, implica numa intensificação do ciclo hidrológico, acarretando profundas assimetrias espaciais e temporais da precipitação nas diferentes regiões do globo, com isso as distribuições sazonais das precipitações vêm sofrendo algumas alterações, implicando na ocorrência de inundações mais acentuadas em algumas regiões e secas em outras (GAISER et al., 2003).

Vários modelos climáticos indicam um aumento na intensidade da precipitação, sugerindo a possibilidade de eventos de chuvas mais extremos. Estes modelos, denominados de GCM (“*General Circulation Models*”) projetam um aquecimento significativo, para o século corrente, de 1,4 a 5,8 graus Celsius para o período entre 1990 e 2100. Eles supõem um aumento contínuo das concentrações de gases na atmosfera causadores do efeito estufa devido ao uso intensivo e contínuo de combustível fóssil (IPCC, 2001).

Segundo GAISER et al. (2003) o entendimento das mudanças globais e seus impactos necessitam da análise das variáveis mais relevantes do sistema climático e suas formas de interação. Ao se usar narrativas de cenários, os efeitos globais podem ser descritos com a simulação de complexos modelos matemáticos, permitindo a visualização do comportamento médio global das principais variáveis climáticas.

No entanto estes resultados são bastante generalistas e não são representativos das fortes diferenças regionais (WALKER, 1999). No nível regional, os efeitos das mudanças climáticas podem variar consideravelmente devido à localização geográfica, variabilidade climática, disposição dos recursos naturais e condições sócio-econômicas.

Segundo GAISER et al. (2003) as mudanças climáticas globais irão, em particular, afetar as regiões semi-áridas, especialmente aquelas regiões em que, atualmente, o montante precipitável é baixo e sua distribuição é irregular.

3.3.2. O PROGRAMA IMAGE 2.2.

O programa IMAGE 2.2 (2001) (*“Integrated Model to Assess the Global Environment”*) integra vários modelos de fatores intervenientes às mudanças climáticas. O programa se propõe a contribuir para o entendimento das mudanças climáticas causadas por ações antrópicas e assessorar os gestores ambientais quantificando a importância relativa dos principais processos e interações do sistema sociedade-biosfera-clima. Para cumprir com os objetivos a que o programa se propõe, o IMAGE 2.2 proporciona uma perspectiva dinâmica e de longo período das consequências sistêmicas das mudanças globais e uma base quantitativa para a análise da relativa eficiência de várias opções de políticas ambientais num contexto de mudança climática global. Os modelos componentes do programa IMAGE 2.2 são:

- Phoenix: modelo de simulação do crescimento populacional.
- WorldScan: modelo de simulação de variáveis macro-econômicas.
- TVM: modelo de simulação da configuração da cobertura vegetal.
- AEM: modelo de simulação da economia agrícola.
- LCM: modelo de simulação da configuração do uso e ocupação do solo.
- LUEM: modelo de simulação das emissões de gases poluentes segundo o uso e ocupação do solo.
- TIMER: modelo de simulação do suprimento e demanda sobre a matriz energética.
- TCM: modelo de simulação da concentração de gases poluentes sobre a superfície terrestre.
- OCM: modelo de simulação da concentração de gases poluentes sobre os oceanos.
- UDCM: modelo de simulação das mudanças climáticas.

Todos os modelos supracitados, com exceção do UDCM, processam dados de entrada de fatores intervenientes às mudanças climáticas. O modelo UDCM computa as mudanças climáticas, em termos de variáveis meteorológicas, com base nos dados processados pelos modelos supracitados. A figura 3.11 ilustra a estrutura do programa IMAGE 2.2.

3.3.2.1. O Modelo UDCM.

O modelo UDCM (*“Upwelling Diffusion Climate Model”*) é um modelo climático do tipo GCM e que converte a emissão de diferentes gases poluentes na atmosfera em forças irradiadoras de calor, dando como resultado as mudanças, ao longo do tempo, na temperatura média da superfície terrestre e dos oceanos. O UDCM é um dos modelos climáticos mais usados para a predição de mudanças climáticas segundo as narrativas dos cenários de referência do IPCC (2001).

O UDCM é um modelo de difusão e balanço energético. Este é composto de cinco módulos: um atmosférico, dois terrestres e dois oceânicos, representando os parâmetros dos hemisférios norte e sul da terra. Neste modelo admite-se que nenhuma parcela de energia, do fluxo energético, é absorvida pela superfície terrestre. O balanço energético do sistema climático é descrito abaixo:

$$\Delta Q = \lambda \cdot \Delta T + \Delta F \quad (1)$$

Na qual:

ΔQ = *força radiativa de calor (Joule/ano.m²)*

ΔF = *fluxo líquido de calor dentro do oceano (Joule/ano.m²)*

λ = *coeficiente de retorno (Joule/ano.m².K)*

ΔT = *variação da temperatura (K).*

ΔQ e ΔF são valores médios sobre toda a superfície global. O termo $\lambda \cdot \Delta T$ representa a mudança na taxa de perda de calor no espaço, do fluxo de energia, do sistema climático. O coeficiente de retorno λ representa o inverso dos parâmetros de sensibilidade climática. O parâmetro de sensibilidade climática é definido como sendo a resposta da temperatura média global ao estímulo das forças radiativas de calor.

3.4. SÉRIES HIDROLÓGICAS TEMPORAIS.

Segundo KOTTEGODA (1980) um conjunto de observações, que meça a variação no tempo de algum aspecto de um determinado fenômeno, como a vazão de um rio ou nível de água num reservatório, é definido como uma série temporal. Os valores da série temporal, em cada instante de tempo, são chamados de estado. Ambos estado e tempo podem ser especificados em unidades discretas ou contínuas.

Figura 3.11 – Estrutura do Programa IMAGE 2.2.

3.4.1. COMPONENTES E PROPRIEDADES.

As variáveis de uma série hidrológica temporal possuem, geralmente, um componente determinístico e um aleatório. O componente determinístico de uma variável é aquele cuja as causas físicas são conhecidas, ou seja, as leis físicas que regem o comportamento da variável em análise são conhecidas. O componente aleatório é aquele que não se conhece, pelo menos de forma quantitativa, os processos físicos que regem o comportamento daquela variável, atribuindo-se, neste caso, uma lei teórica de probabilidades.

Uma série temporal de eventos aonde a variável em análise tem um componente aleatório é definida como sendo uma série aleatória ou estocástica. Logo, um processo estocástico é uma coleção de séries de variáveis aleatórias regidas por uma lei probabilística qualquer.

Segundo MACMAHON (1986) as séries hidrológicas temporais podem ser definidas como sendo a composição de vários componentes determinísticos e estocásticos. KOTTEGODA (1980) adotou quatro componentes: tendência (*T*), periodicidade ou sazonalidade (*P*), auto-correlação (*C*) e aleatoriedade (*A*). A figura 3.12 ilustra as propriedades de cada um dos componentes principais das séries hidrológicas temporais.

Segundo KOTTEGODA (1980) os componentes determinísticos das séries temporais podem ser classificados, segundo seu comportamento, em periódicos e não-periódicos. O componente determinístico não-periódico mais comum é a tendência, que pode ser definida como um movimento de longa duração. A tendência orienta o comportamento médio da evolução temporal de uma determinada variável, ao aumento ou diminuição gradativa dos valores desta variável. A constatação de tendência numa série temporal pode ser devida a vários fatores, geralmente fatores externos, como, por exemplo, mudanças climáticas de longa duração que podem provocar uma tendência ao aumento das precipitações, ou uma gradativa impermeabilização de uma bacia urbana que pode levar a vazões de escoamentos superficiais cada vez maiores. A tendência pode ser avaliada através de métodos como a regressão linear simples, que infere um polinômio de grau 1 representativo do comportamento médio da sequência analisada, ou através do método da média móvel, que infere uma curva representativa do comportamento médio da sequência analisada.

O componente determinístico periódico, ou cíclico, diz respeito a um movimento oscilatório, em torno de uma orientação média, ou tendência, que é repetitivo em intervalos de tempo fixos. Este componente oscilatório é causado por fenômenos naturais cíclicos de média e curta duração como os movimentos de translação e rotação da terra. A periodicidade pode ser avaliada através do método das funções harmônicas de Fourier que infere uma curva, determinada de harmônico, representativa da sazonalidade da série temporal em análise.

Figura 3.12 – Componentes das séries hidrológicas temporais.

Ainda segundo KOTTEGODA (1980) os componentes estocásticos são constituídos por oscilações irregulares, em torno de uma orientação média, e por efeitos aleatórios que não podem ser estritamente quantificados por leis físicas e que requerem conceitos probabilísticos. A auto-correlação e a aleatoriedade são dois dos componentes estocásticos das séries temporais.

A auto-correlação, ou persistência, é um conceito que diz respeito à dependência sequencial de uma série temporal natural. Por exemplo, numa série temporal de eventos de intensidades de precipitação, existe uma probabilidade maior de que eventos de baixa intensidade de precipitação sejam seguidos por eventos de baixa intensidade, e uma probabilidade menor de que eventos de baixa intensidade sejam seguidos por eventos de alta intensidade. A auto-correlação, ou persistência, de uma série temporal, pode ser medida através do grau de dependência linear entre eventos de uma mesma série através do conceito estatístico de auto-covariância.

A aleatoriedade é representativa de todos os aspectos das séries temporais que não podem ser quantificados, embora se conheça, de forma apenas qualitativa, a maioria dos processos físicos responsáveis pelo comportamento das variáveis hidrológicas em análise. A aleatoriedade é então tratada por leis probabilísticas que são inferidas pelo ajuste da melhor distribuição teórica de probabilidades à sequência observada.

Um outro conceito importante das séries temporais é o da estacionariedade. A estacionariedade diz respeito à permanência, das propriedades estatísticas de uma determinada série temporal, ao longo do tempo. Ou seja, a série tende a ser estacionária quando períodos de tempo desta mesma série tendem a ter propriedades estatísticas iguais.

3.4.2 INCERTEZAS.

De uma forma geral, o tratamento das variáveis hidrológicas se dá através de metodologias analíticas e estatísticas. O tratamento analítico das variáveis hidrológicas se dá quando, por hipótese, o número de incertezas é pequeno e quando há um grande número de variáveis físicas irrelevantes à análise do fenômeno em estudo. Estas hipóteses têm um caráter relativo uma vez que elas são função da precisão dos resultados, de uma determinada análise, que se quer inferir e da disponibilidade do ferramental computacional e matemático.

Para a análise de variáveis hidrológicas, que são função de um grande número de outras variáveis e função da complexa conjuntura de relações de causa e efeito entre elas, a metodologia analítica é, geralmente, impraticável. Portanto, embora se conheça, qualitativamente, os processos naturais que regem os comportamentos das variáveis hidrológicas, é mais prática a adoção de leis probabilísticas, para estas variáveis, do que a adoção de leis analíticas. A adoção de leis probabilísticas, para o regimento dos processos naturais, leva em conta, então, o caráter estocástico destes processos exigindo o uso de ferramentas de análise estatística e inferência probabilística.

Além da complexidade dos sistemas naturais, que regem o comportamento das variáveis hidrológicas, também a heterogeneidade de escalas, temporal e espacial, entre as variáveis que se correlacionam nos processo de causa e efeito, contribui significativamente às incertezas das análises dos fenômenos hidrológicos.

Em síntese, a percepção é de que a magnitude das incertezas, na análise das variáveis hidrológicas, não é somente função da complexidade dos fenômenos naturais mas também do tipo de abordagem que o analista dos sistemas hidrológicos faz. Portanto, a modelagem de sistemas hidrológicos deve ser precedida, por parte do analista, por uma boa análise dos fenômenos naturais intervenientes aos comportamentos das variáveis hidrológicas em estudo.

3.4.3 GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS.

A seqüência de dados usada em projeto, planejamento e estudos operacionais de sistemas hídricos, pode estar restrita apenas aos registros históricos. No entanto, uma séria desvantagem pode resultar desta aplicação uma vez que uma particular seqüência de observações não ocorre de maneira idêntica num período futuro por causa das propriedades aleatórias das séries temporais hidrológicas. Em outras palavras, ocorre que uma série histórica é apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico; ou seja, pode-se imaginar que a natureza sorteou a série histórica, segundo algum conjunto de leis probabilísticas. Um novo sorteio redundaria numa outra série, diferente da histórica, mas igualmente provável. (KELMAN, 1977).

Portanto, a geração de séries sintéticas é uma ferramenta a ser utilizada para o enriquecimento da análise e dimensionamento hidrológicos, quando da constatação que a mesma é verossímil quanto às características estatísticas da série observada.

3.4.3.1 Modelos Estocásticos.

O papel dos modelos estocásticos é o de gerar séries verossímeis à série histórica. Estes modelos procuram se aproximar deste comportamento estocástico, inerente à série observada (KOTTEGODA, 1980). Portanto, as séries sintéticas são alternativas de ocorrência, à série histórica, com as mesmas propriedades estatísticas apuradas nas séries históricas (KELMAN, 1982). As séries sintéticas servem, principalmente, para avaliar o comportamento do sistema hidrológico em estudo para diferentes seqüências de eventos que tenham as mesmas características estatísticas das séries históricas observadas, características estatísticas estas que são inerentes da configuração dos fatores intervenientes à seqüência de eventos de uma determinada variável hidrológica.

Segundo KOTTEGODA (1980) os modelos estocásticos lineares podem ser classificados em auto-regressivos (AR), de média móvel (MAR), os modelos auto-regressivos e de média móvel de Box & Jenkins (ARMA) e os modelos auto-regressivos e de média móvel integrados (ARIMA).

3.4.3.2. O Modelo ARMA e as Séries de Precipitações.

Analisando o caráter de persistência do processo de chuva é possível, através da teoria de séries temporais, realizar previsões futuras para o fenômeno. Este tipo de previsão de chuva não é tão preciso quanto à previsão meteorológica, mas na falta desta última adota-se uma estimativa estocástica (OBEYSEKERA, 1987).

A adoção de modelos ARMA (auto-regressivos de médias móveis) de baixa ordem para previsão de chuva, foi motivada por estudos realizados por OBEYSEKERA et al (1987). Os autores investigaram a modelagem da chuva, baseada em modelos do tipo físicos e que mostraram que a estrutura de correlação de um processo de chuva diária é equivalente à estrutura de correlação dos modelos ARMA de baixa ordem. Apresenta-se a seguir a equação do modelo ARMA(p,q), com "p" termos auto-regressivos e "q" termos de médias móveis:

$$Z_t = \left(\sum_{j=1}^p \phi_j \times Z_{t-j} \right) + a_t - \left(\sum_{j=1}^q \theta_j \times a_{t-j} \right) \quad (2)$$

Na qual:

Z_t : desvio em relação à média do processo.

θ e ϕ : parâmetros auto-regressivos e de médias móveis respectivamente.

a_t : ruído branco ou número aleatório.

t : tempo em dias.

3.5. MODELOS HIDROLÓGICOS.

Segundo TUCCI (1998) uma vasta gama de estudos e projetos em engenharia de recursos hídricos necessita, para o encaminhamento das soluções a serem adotadas, do conhecimento de hidrogramas de projeto, ou de hidrogramas que representem uma resposta, de um determinado sistema hídrico, a um determinado evento de precipitação. Estes podem ser originados de um processo de transformação chuva-vazão na superfície de bacias hidrográficas, da propagação de vazões em cursos de água, de derivações inseridas nos mesmos ou da propagação em reservatório.

A análise de sistemas hídricos pode ser feita através de modelos hídricos. Segundo BABOVIC (1998) um modelo hídrico é uma simplificação, ou abstração,

representativa do sistema hídrico real. A modelagem de sistemas hídricos é importante para que se possa estudar e conhecer, através de processos de simulação, o comportamento deste sistema em, por exemplo, escoamentos superficiais em resposta aos estímulos provocados por processos de precipitação.

A modelagem de sistemas hídricos envolve certas etapas que devem ser seguidas para que as simulações, realizadas com a ferramenta que é o modelo hídrico, possam ser as mais representativas o possível dos processos destes sistemas hídricos. As etapas para a modelagem de um sistema são: estruturação do modelo, calibragem, verificação, confirmação e a análise de erros e incertezas.

Segundo LEI (1996) a modelagem de sistemas hídricos é, em essência, um processo de aprendizado iterativo. O processo começa com a definição do problema e de um grupo de hipóteses. Num primeiro ciclo é testado um grupo de hipóteses baseadas no conhecimento primário do sistema. Este grupo de hipóteses é definido como sendo a estrutura do modelo que consiste num conjunto de leis, determinísticas e empíricas, e declarações de circunstâncias empíricas. A este modelo é então aplicado um estímulo e então observada a resposta a este estímulo. Esta resposta do modelo é então comparada como um dado observado, causado pelo mesmo estímulo, e então os parâmetros do modelo são calibrados.

3.5.1. ESTRUTURA DE MODELOS HIDROLÓGICOS.

A estrutura do modelo é composta por variáveis e parâmetros que descrevem os fatores intervenientes dos processos e eventos que se quer estudar num determinado sistema hídrico. Para a estruturação do modelo devem-se definir o sistema hídrico em questão, os atributos deste sistema, as variáveis de entrada, as variáveis de saída, as variáveis de estado e os parâmetros do sistema. A figura 3.13 ilustra a estrutura de um modelo hídrico hipotético.

O sistema hídrico em estudo é definido como sendo uma partição do ambiente em que este está inserido. Por exemplo, no âmbito dos estudos dos processos de escoamento superficial, no exultório de uma determinada bacia, o sistema hídrico é a própria bacia hidrográfica delimitada pelos seus divisores de águas. Os atributos do sistema são a descrição quantitativa dos objetos físicos deste sistema. Exemplos de atributos do sistema são: a área de uma bacia hidrográfica, conformação topográfica e configuração do uso e ocupação do solo.

Figura 3.13 – Estrutura de modelo hídrico hipotético.

As variáveis de entrada são os estímulos externos ao sistema e que provocam uma reação ou resposta deste sistema. Um exemplo de uma variável de entrada seria uma série de precipitações, representada por um hietograma, sobre uma bacia hidrográfica. As variáveis de saída são as respostas, do sistema, provocadas pelos estímulos das variáveis de entrada. As variáveis de saída são funções das variáveis de entrada, atributos, parâmetros e estado instantâneo do sistema. Um exemplo de variável de saída poderia ser o escoamento superficial no exutório de uma bacia.

As variáveis de estado são representativas do estado do sistema ao longo do tempo. Um exemplo de variável de estado poderia ser o nível d'água de um reservatório. As variáveis de estado são funções das variáveis de entrada e dos atributos e parâmetros do sistema. Os parâmetros de um sistema descrevem as relações quantitativas entre as variáveis de entrada e saída, e entre os atributos e variáveis de estado de um sistema. Exemplos de parâmetros do sistema poderiam ser: o coeficiente de escoamento superficial e a taxa de infiltração.

3.5.2. CALIBRAGEM, VERIFICAÇÃO E CONFIRMAÇÃO.

O processo de calibragem de um determinado modelo consiste no ajuste dos parâmetros deste sistema através de processos iterativos e/ou de otimização. Esta calibragem é feita a partir de dados observados das variáveis de entrada e saída de um determinado sistema. Um exemplo de calibragem é o ajuste dos parâmetros de tempo de

concentração e indicadores de taxas de impermeabilização do solo, de uma determinada bacia hidrográfica, a partir de dados observados de precipitação e dados observados de escoamento superficial, no exutório desta bacia, em resposta ao estímulo da precipitação. Se um único conjunto de parâmetros puder ser achado, para todos os eventos que se usou para calibrar estes modelos, o modelo é dito estar calibrado.

Numa fase posterior à calibragem são feitas simulações com o modelo, já com os parâmetros calibrados, para os eventos de verificação. Se a comparação entre a resposta simulada e a resposta observada do sistema for favorável, em termos de critérios pré-estabelecidos pelo modelador, o modelo é dito estar verificado.

A explanação dos dois primeiros parágrafos deste subitem é a prática tradicional na modelagem de sistemas hídricos. Segundo BABOVIC (1998) esta prática tem sido contestada por vários autores, uma vez que é aparentemente impossível a calibração e verificação dos modelos hídricos, haja visto a infinidade de possibilidades de sequência de dados de entrada a um sistema, de estados deste sistema e de respostas deste sistema a uma infinidade de combinações de dados de entrada e estados do sistema. No âmbito da explanação deste parágrafo, define-se a confirmação de um modelo como sendo a validação do uso do mesmo para um determinado intervalo de dados de entrada.

3.5.3. ERROS E INCERTEZAS.

É de se esperar que as respostas do modelo não coincidam com as respostas do sistema observado, isto por que há sempre erros na estrutura do modelo, nos parâmetros do modelo, nos atributos do sistema, nos dados das variáveis de entrada e saída, nos valores iniciais das variáveis de estado e nos processos de solução numérica.

Segundo BABOVIC (1998) o erro é definido como sendo a diferença entre o valor real e o valor modelado. O valor exato de um erro nunca é conhecido pois o valor real exato nunca é conhecido por definição. Também, o valor de um erro nunca se repetirá para várias simulações com um mesmo modelo e parâmetros. Esta propriedade sugere que um erro seja tratado como uma variável aleatória.

O valor exato de um erro não pode ser conhecido. Portanto, o melhor que se pode fazer é estimar os limites de ocorrência do erro dentro de um intervalo de confiança. A estimativa dos limites de um erro dentro de um intervalo de confiança é definida como incerteza, ou, incerteza é a descrição estatística do comportamento médio e variância do erro (BABOVIC, 1998).

A incerteza é inerente na modelagem de sistemas. As respostas de um modelo tendem a ser incertas. A aplicação de um modelo para fins práticos depende de critérios de aceitação, por parte do modelador, das incertezas inerentes ao mesmo.

- **Integração da Análise de Incertezas na Modelagem de Sistemas.**

A incerteza na resposta de um modelo não pode ser quantificada a partir de sua própria definição, uma vez que não se sabe os valores exatos de resposta do sistema. No entanto, esta incerteza pode ser avaliada como uma função de várias fontes de incertezas.

Segundo LEI (1996) sempre que uma coleção de dados observados, de um sistema, estiver disponível, estes devem ser usados para a confirmação do modelo. Dados observados para a confirmação de modelos podem consistir variáveis de entrada e saída, atributos do sistema e condições iniciais das variáveis de estado do sistema. O resultado de um processo de confirmação de um modelo não pode ser validado a menos que se assuma que as incertezas dos dados observados seja suficientemente pequena. O último passo para a confirmação do modelo é testar a hipótese de que as incertezas na estrutura do modelo são negligenciáveis. Sobre estas duas hipóteses, que as incertezas nos dados observados e na estrutura do modelo sejam negligenciáveis, a incerteza na resposta do modelo torna-se apenas função das incertezas dos parâmetros do modelo. Portanto, se for possível estimar as incertezas nos parâmetros do modelo, a incerteza da resposta do modelo pode ser calculada usando métodos de propagação de incertezas (LEI, 1996).

Baseado na resposta do modelo, pode-se testar as duas hipóteses do parágrafo anterior. Se os testes permitirem que se aceite a hipótese de que a estrutura do modelo é correta, pode-se dizer que o modelo está confirmado e que o conjunto de dados observado pode ser usado para calibrar os parâmetros do modelo, com o objetivo de se reduzir as incertezas dos parâmetros.

Segundo BABOVIC (1998) um modelo é dito estar confirmado, se for possível achar uma gama de valores de parâmetros de tal forma que as respostas observadas do sistema se enquadrem dentro de uma faixa de valores preditos pelas simulações do modelo.

3.6. USOS DA ÁGUA.

3.6.1. USOS MÚLTIPLOS DA ÁGUA.

O princípio dos usos múltiplos é aquele na qual os recursos hídricos devem situar-se equidistantemente acessível a todos os setores interessados em seu uso, dando-se o predomínio, em cada bacia ou região, ao uso que permitir a extração dos maiores níveis de benefícios sociais líquidos (CARRERA, 2003).

No Brasil a aplicação deste princípio vem desde o começo do século XX com o início do processo de industrialização. A mudança da matriz econômica, da agropecuária para a atividade industrial, atraiu investimentos da iniciativa privada para o setor de infra-estrutura e geração de energia hidroelétrica.

Nesta conjuntura, o setor de geração hidroelétrica veio a ocupar o papel de grande usuário da água no Brasil o que fez com que, a partir dos anos sessenta, outros setores usuários viessem a reclamar quanto à assimetria de prioridade, dada pelo governo, ao setor hidroelétrico, que acabava por condicionar todas as outras atividades sócio econômicas à disponibilidade hídrica espacial dos reservatórios de regularização.

Segundo CARRERA (2003) esta assimetria começou a ser corrigida com a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em dezembro de 1996, e da Agência Nacional de Águas – ANA, em julho de 2000, sendo esta última responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

3.6.2. USOS CONSUNTIVOS.

Segundo CARRERA (2003) usos consuntivo da água são aqueles que retiram a água de seus mananciais, através de captações ou derivações, e apenas parte dessa água retorna a suas fontes de origem. No uso consuntivo, a água efetivamente retirada torna-se indisponível no manancial. Exemplos de uso consuntivo são a irrigação, o abastecimento público a dessedentação de animais e o abastecimento industrial.

- **Abastecimento Humano.**

Define-se o abastecimento humano como sendo aquele necessário para atender as demandas das aglomerações populacionais no consumo doméstico, comercial,

público, entre outros, que integra a vida urbana destas aglomerações. A Lei Federal n.º 9433, de 8 de janeiro de 1997, em seu artigo 1.º, inciso III, estabelece que, em condições de escassez, a prioridade deve ser dada ao abastecimento humano e à dessedentação de animais.

As demandas por água, para o abastecimento humano, dependem da população abastecida e de seu consumo per-capita. A população a ser abastecida é estimada através de estudos demográficos. O consumo de água per-capita depende de uma série de características da comunidade a ser atendida como as características sócio-econômicas, naturais e tecnológicas.

As características sócio-econômicas dizem respeito aos hábitos da população, renda, ordenamento urbano e atividades econômicas. As características naturais dizem respeito à temperatura, umidade relativa do ar, regime de precipitações e evapotranspiração. As características tecnológicas dizem respeito aos dispositivos hidráulicos das edificações, estado da rede de distribuição, grau de reutilização da água, sistemas de administração, medição do consumo e cobrança pelos serviços de distribuição.

- **Lançamento e Diluição de Efluentes.**

Segundo CARRERA (2003) o lançamento e diluição de efluentes, tratados ou não, é também uma das múltiplas formas de se utilizarem os recursos hídricos de mananciais superficiais. As atividades sócio-econômicas que mais se beneficiam desse tipo de uso são o abastecimento humano e o abastecimento industrial.

Os efluentes descartados pelas edificações urbanas, que não as fábricas e laboratórios, apresentam um certo número de parâmetros poluentes como a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a demanda química de oxigênio (DQO), os materiais sólidos totais e certos compostos biodegradáveis agressivos provenientes de certos materiais de limpeza. Quanto aos poluentes industriais os que mais preocupam são os orgânicos, especialmente os sintéticos, e os metais pesados.

Embora os corpos d'água fluviais receptores das cargas poluentes tenham o poder de se auto-depurar, ou seja, de recuperar os níveis iniciais de oxigênio dissolvido deplecionado em decorrência do lançamento das cargas poluentes, o uso dos recursos hídricos para a diluição de efluentes pode ser considerado um uso consuntivo, uma vez que um determinado volume de água é alocado para a diluição deste efluente.

Observa-se que, segundo resolução n.º 20 do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, cada classe de corpo d'água só pode receptor efluentes descartados se os seus parâmetros característicos se situarem dentro do balizamento dado por esta resolução.

- **Dessedentação de Animais.**

Segundo CARRERA (2003) a dessedentação de animais passou a ser, a partir da lei n.º 9.433/97, um dos dois usos prioritários da água em situações de escassez, junto com o abastecimento humano.

A atividade pecuária exerce, hoje, altas demandas por água principalmente em projetos de criação intensiva, que têm tomado grande impulso nos dias atuais face ao grande aumento da produtividade. O aumento da atividade pecuária responde pela importância que passou a ter esse tipo de demanda no computo da repartição das vazões.

- **Abastecimento Industrial**

A água é um dos insumos mais importantes para atividade industrial. Isso é constatado na importância, da localização e disponibilidades qualitativa e quantitativa, que é dada a este insumo nos estudos de viabilidade econômica e de implantação de plantas industriais.

Segundo ALCAMO (2000) a água é insubstituível, na atividade industrial, para fins de absorção de calor, agente de limpeza, elementos de transmissão mecânica, elementos para a produção de vapor, como matéria-prima, como meio de transporte e processamento de materiais, como solvente e como veículo para o despejo de efluentes líquidos.

Da mesma maneira que os sistemas de abastecimento público, a indústria também lança suas águas servidas nos corpos fluviais receptores. Segundo CARRERA (2003) os efluentes industriais se oferecem em um grande espectro de variedades, podendo, inclusive, serem altamente perigosos.

- **Agricultura Irrigada.**

Considera-se água para a agricultura irrigada o volume desse recurso que não é suprido através de chuvas, necessário à aplicação artificial aos cultivos, de forma a aperfeiçoar o seu desenvolvimento biológico (CARRERA, 2003). A determinação desse volume depende de fatores diversos.

O desenvolvimento das culturas cultivadas está condicionado, essencialmente, pelo clima, natureza do solo e umidade disponível para o crescimento das plantas. A umidade requerida procede das chuvas ou, na falta destas, da atividade da irrigação. O volume de água a ser usado na irrigação depende, então, dos aspectos climáticos, das características do solo, dos tipos de processos de cultivos e da eficiência do sistema de irrigação no uso da água. Através da irrigação pode-se intensificar a produção agrícola, ao longo, uma vez que é possível desenvolvê-la até mesmo na contra-estação, ou seja, no período menos propício à atividade de cultivo de uma determinada cultura.

Segundo ALCAMO (2000) a atividade da irrigação é a maior consumidora de água entre os diversos tipos de usos. Na atividade da irrigação as demandas específicas variam bastante dependendo do método de irrigação empregado. Entre os parâmetros mais relevantes para se estimar o consumo de água pela irrigação estão os tipos de culturas irrigadas, a natureza do solo, o regime de precipitações e as taxas de evaporação locais.

3.6.3. USOS NÃO CONSUNTIVOS.

Ainda Segundo CARRERA (2003) usos não consuntivos são aqueles que utilizam a água em seus próprios mananciais sem haver necessidade de retirá-la ou, depois de captada, retorna integralmente a seus mananciais. Exemplos de uso não consuntivo são a aquicultura, navegação fluvial, diluição de efluentes e geração de energia elétrica. Embora a utilização de água para a geração de energia elétrica seja considerada como uso não consuntivo, os reservatórios de regularização de vazão, para a geração hidráulica de energia elétrica, provocam perdas significativas por evaporação nos espelhos d'água.

- **Geração de Energia Hidrelétrica.**

A utilização da água para a geração de energia hidroelétrica é considerada um dos usos não consuntivos desses recursos, mas o aproveitamento hidroelétrico e a operação de plantas termelétricas podem afetar, de forma significativa, o balanço hídrico de uma bacia hidrografia (CARRERA, 2003).

O potencial hidroelétrico a partir da combinação de dois fatores, um hidrológico e outro topográfico. A capacidade de geração de energia hidroelétrica tem um caráter aleatório, uma vez que as vazões afluentes à usina geradora têm um caráter estocástico. Portanto, a disponibilidade de energia elétrica também tem caráter aleatório, estando sujeita a riscos de déficit de oferta frente à demanda.

Para o aproveitamento hidroelétrico com menores riscos de ocorrência de déficit, é necessário o ajuste dos padrões de variabilidade das vazões afluentes através de reservatório de regularização. É importante considerar ainda a elevada evaporação nos espelhos d'água formados pela reservação.

- **Piscicultura e Aqüicultura.**

As atividades da piscicultura e aqüicultura fazem uso de tanques ou açudes, preenchidos com águas derivadas dos cursos d'água, sendo devolvida, em quase sua totalidade, a jusante do ponto de captação. Portanto, estas atividades são classificadas em não consuntivas quanto ao uso da água.

O crescimento populacional e a forte tendência à urbanização fazem com que a demanda se distancie cada vez mais da oferta gerada pela produção pesqueira. Isso faz das coleções de águas, representadas pelos açudes e represas, um importante elemento para a produção alimentos pesqueiros, razão porque a piscicultura e a aqüicultura são consideradas atividades importantes na política de recursos hídricos (CARRERA, 2003).

- **Navegação.**

Embora a navegação não constitua uso consuntivo da água, o seu estudo é importante para a gestão dos recursos hídricos, porque há a necessidade de se garantir um patamar de vazão para dar a necessária condição de navegabilidade ao curso d'água.

Ao se estabelecer as condições necessárias à navegabilidade, com vazões compatíveis com o calado das embarcações, podem-se impor restrições a outros usos consuntivos que tenham lugar no mesmo trecho do curso d'água em questão (CARRERA, 2003).

- **Demandas Ecológicas.**

O objetivo do estabelecimento da demanda ecológica é o de preservar o habitat natural da fauna e flora aquáticas, razão pela qual um patamar mínimo de vazão deve ser preservado para cumprir esta função. A demanda ecológica é classificada como sendo um dos usos não consuntivos da água. Ainda que não configure um uso econômico, a demanda por água para a preservação de ecossistemas constitui um fator importante para que esta permaneça na composição do cenário físico, onde cumpre um papel bem definido (CARRERA, 2003).

A photograph of a rural landscape. In the foreground, there is a dirt road or path. A utility pole stands in the middle ground. The background features rolling hills covered in dense vegetation. The sky is bright and overcast.

4. METODOLOGIA.

Uma que o objetivo geral desta Dissertação é o de propor uma metodologia de análise quantitativa da relação futura entre a disponibilidade e a demanda por recursos hídricos, segundo a combinação das narrativas de cenários futuros de mudanças sócio-econômicas e de mudanças climáticas, este capítulo inicia-se com uma breve explanação do conjunto de métodos, e a relação entre eles, para se chegar ao objetivo supra explanado. Esta metodologia é aplicada ao estudo de caso da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. Esta estrutura de relações de métodos adotados é ilustrada na figura 4.1.

Segundo a seqüência do trabalho de Dissertação, para a aplicação da metodologia no estudo de caso citado, primeiramente procedeu-se à geração de séries sintéticas futuras de precipitação através do uso de um modelo estocástico linear. Sobre estas séries sintéticas de precipitação, foram inferidos dois padrões de evolução dos regimes de precipitação: um padrão segundo a narrativa de um cenário climático tendencial futuro e outro segundo a narrativa de um cenário climático alternativo futuro. As definições desses dois tipos de cenários climáticos são feitas nos itens subseqüentes.

A etapa subseqüente envolveu a modelagem e simulação dos processos hidrológicos intervenientes à disponibilidade hídrica superficial. Para isto foi aplicado, sobre o modelo HEC-HMS 2.1, que modela e simulação processos de chuva-vazão, as séries sintéticas de precipitação geradas segundo as narrativas dos cenários climáticos supracitados. Com isso, obteve-se dois cenários distintos de disponibilidade hídrica superficial segundo as orientações dos cenários climáticos.

A terceira etapa envolveu a projeção futura da demanda por recursos hídricos segundo a narrativa de dois cenários sócio-econômicos de fatores intervenientes à demanda hídrica. Para a simulação das demandas, foi usado o modelo MDSA (Modelo de Demanda Setorial por Recursos Hídricos) desenvolvido pelo autor desta Dissertação.

Gerados os cenários de disponibilidade hídrica superficial, segundo as narrativas dos cenários climáticos, e os cenários de demanda hídrica, o objetivo final deste trabalho de Dissertação é alcançado quando da comparação das séries de evolução da disponibilidade hídrica e demanda hídrica.

Nesta comparação são analisadas tendências às situações de escassez hídrica em tanto nas dimensões espacial como temporal.

Figura 4.1: Períodos de tempo simulados para os cenários Tendencial e Alternativo.

4.1. CENÁRIOS TENDENCIAL E ALTERNATIVO.

Neste trabalho de Dissertação são propostos dois tipos de cenários, para as narrativas das conjecturas quantitativas dos fatores intervenientes à demanda e à disponibilidade hídrica, num determinado horizonte futuro de tempo. São estes os cenários tendencial e alternativo.

O cenário denominado tendencial é aquele em que se supõe que os padrões históricos, de evolução dos fatores intervenientes à demanda e disponibilidade de recursos hídricos, irão se propagar para o futuro. Na elaboração deste cenário são feitas análises prospectivas dos dados históricos, dos fatores intervenientes supracitados, com o objetivo de se determinar as características estatísticas, como tendência e sazonalidade, do padrão histórico de evolução destes fatores. Estas características estatísticas são então propagadas à projeção futura dos fatores mencionados. O cenário denominado alternativo é aquele em que se supõe que o padrão histórico de evolução, dos fatores intervenientes à demanda e ao uso dos recursos hídricos, não irá se propagar para o futuro. Na elaboração deste cenário supõe-se que os padrões de evolução, dos fatores supracitados, evoluem segundo os efeitos regionais da narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000). As bases de dados, para a projeção dos fatores intervenientes, segundo a narrativa mencionada, são os dos últimos registros disponíveis coletados nos estudos prospectivos.

Os cenários alternativo e tendencial foram gerados para os horizontes futuros de 2010, 2025 e 2050. Devido ao grande volume de dados, acerca dos fatores intervenientes mencionados, as simulações destes fatores se detiveram apenas em janelas de tempo no entorno dos anos horizonte supracitados, ou seja, apenas nos períodos de tempo com duração de três anos e que compreendessem o ano horizonte e os anos imediatamente anterior e posterior a este ano horizonte (ver figura 4.1).

4.2. CENÁRIOS CLIMÁTICOS.

No âmbito deste trabalho de Dissertação são propostos dois cenários climáticos quantitativos, o Cenário Climático Tendencial (CCT) e o Cenário Climático Alternativo (CCA), para cada uma das nove sub-bacias da UGRHI do Tietê-Jacaré.

O Cenário CCT é definido como sendo aquele em que as características estatísticas das séries históricas de precipitação, como tendência e sazonalidade, se

Figura 4.2: Períodos de tempo simulados para os cenários Tendencial e Alternativo.

perpetuam para as séries futuras de precipitação, ou seja, o regime futuro de precipitações tende a ser igual ao regime histórico de precipitações. O Cenário CCA é definido como sendo aquele em que as características estatísticas das séries históricas de precipitação não se perpetuam para as séries futuras, ou seja, o regime futuro de precipitações é significativamente alterado, com relação à série histórica, por efeito das previsões de mudanças no clima regional em decorrência das mudanças climáticas globais narradas pelo cenário de referência A1F do IPCC (2000).

A geração dos cenários climáticos quantitativos, segundo as narrativas dos cenários CCA e CCT, foi feita em duas etapas. A primeira etapa diz respeito aos estudos prospectivos das séries históricas de precipitação, quando foram feitas estimativas das precipitações históricas médias diárias, sobre cada sub-bacia; apuradas algumas características estatísticas, como tendência e sazonalidade, destas séries históricas médias diárias de precipitação; e estudados o comportamento das precipitações em função da umidade relativa do ar, da temperatura, da tensão de vapor e da tensão saturante de vapor. A segunda etapa diz respeito a geração das séries sintéticas futuras de precipitação, a partir do uso de um modelo estocástico linear, devidos tratamentos estatísticos e inferências de tendência e sazonalidade.

4.2.1 PRECIPITAÇÕES.

Uma vez que um dos objetivos deste trabalho de Dissertação é determinar os efeitos das projeções futuras de variações climáticas sobre a disponibilidade de recursos hídricos, na região ora em estudo, procurou-se desenvolver uma metodologia de geração de séries sintéticas futuras de precipitação que integrasse os efeitos dos aspectos físicos, intervenientes à formação das precipitações, com os aspectos estatísticos e aleatórios que são inerentes aos modelos matemáticos de geração de séries sintéticas.

Esta integração se fez necessária uma vez que se quis inferir, na tendência e sazonalidade das séries sintéticas, os efeitos das projeções futuras, de mudança na temperatura, apontadas pelo modelo climático UDCM. Esta integração somente foi realizada para as séries sintéticas geradas segundo a narrativa do cenário climático alternativo. Para o cenário climático tendencial, foram propagadas, para as séries sintéticas futuras de precipitação, a tendência linear e a sazonalidade observadas nos estudos prospectivos das séries históricas.

4.2.1.1 Estudos Prospectivos.

Como base de dados para a geração das séries sintéticas, para ambos os cenários climáticos, foram tomadas séries históricas de precipitação, com duração de dez anos, registradas pelos postos pluviométricos do DAEE.

- ***Precipitações Históricas Médias Diárias.***

Nesta fase de estudos prospectivos, determinaram-se as séries históricas de precipitações médias diárias em termos de área, sobre cada sub-bacia, a partir do levantamento dos dados dos postos supracitados, localizados nas respectivas sub-bacias, e do cálculo através do método da média aritmética. Como resultados, obtiveram-se nove séries históricas de precipitação média diária, uma para cada sub-bacia, correspondendo aos períodos citados na tabela 4.1.

As justificativas para o uso das precipitações médias diárias históricas em termos de área, em cada sub-bacia, em detrimento do conjunto de registros de precipitação das estações pluviométricas das respectivas sub-bacias, na observação dos componentes estatísticos das séries históricas e na geração das séries sintéticas futuras, são duas: A

primeira baseia-se no fato de que o custo computacional, para a simulação das séries sintéticas futuras, é bem menor uma vez que é mais fácil lidar com uma série histórica média, sobre cada sub-bacia, do que com o número de séries históricas, igual ao número de estações pluviométricas. A segunda baseia-se na observação da evolução, ao longo do tempo, da precipitação média diária sobre cada sub-bacia e dos respectivos desvios absolutos, das séries registradas nas estações pluviométricas, em torno desta média. Observou-se que estes desvios absolutos, em cada sub-bacia, foram relativamente pequenos, embasando, de forma qualitativa, a escolha do uso da precipitação média diária. A figura 4.2 ilustra um exemplo da evolução das precipitações médias mensais e dos respectivos desvios absolutos em torno desta média representados pelas envoltórias de máximos e mínimos. Portanto, considerou-se a precipitação média diária, sobre cada sub-bacia, como representativa do conjunto de registros de precipitação das estações pluviométricas daquela sub-bacia, nos períodos de tempo apontados pela tabela 4.1.

Os períodos, listados na tabela 4.1, foram escolhidos segundo a maior disponibilidade de postos pluviométricos com registros históricos, ou seja, procurou-se um maior conjunto de registros para que se pudesse ter uma representação, da distribuição espacial das precipitações, o mais densa possível, sobre as sub-bacias analisadas. No caso de períodos, de dez anos, com um mesmo número de postos pluviométricos, a escolha foi pelo período mais recente. O anexo A2 contém os gráficos de evolução das séries históricas de precipitação média diária, as estações pluviométricas utilizadas nos estudos, os períodos e tamanhos das séries históricas analisadas em cada sub-bacia. O anexo A1 contém a relação completa das estações pluviométricas, situadas na região da UGRHI do Tietê-Jacaré, distribuídas por sub-bacia. As séries históricas de precipitações, sobre as sub-bacias do Tietê-Jacaré, foram obtidas a partir do banco de dados pluviométricos do DAEE (1998) e do SIGRH (2005).

Tabela 4.1: Períodos de tempo analisados nos estudos prospectivos das séries históricas.

Sub-Bacia	Período
Rio Tietê / Rio Claro	Janeiro de 1990 a Dezembro de 1999
Rio Tietê / Rio Lençóis	Janeiro de 1961 a Dezembro de 1970
Rio Bauru	Janeiro de 1990 a Dezembro de 1999
Baixo Jacaré-Guaçu	Janeiro de 1995 a Dezembro de 2004
Médio Jacaré-Guaçu	Janeiro de 1990 a Dezembro de 1999
Alto Jacaré-Guaçu	Janeiro de 1995 a Dezembro de 2004
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	Janeiro de 1990 a Dezembro de 1999
Alto Jacaré-Pepira	Janeiro de 1990 a Dezembro de 1999
Rio Jaú	Janeiro de 1990 a Dezembro de 1999

Figura 4.3: Evolução histórica da precipitação média mensal, e dos respectivos desvios absolutos em torno da média, representados pelas envoltórias de máximos e mínimos, sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de janeiro de 1995 e dezembro de 2004.

- ***Análise da Sazonalidade das Séries Históricas de Precipitação.***

A análise da sazonalidade das séries históricas de precipitações médias mensais foi feita através do método das Funções Harmônicas de Fourier. A Função Harmônica de Fourier, ajustada à sequência de valores médios mensais de precipitação, dá como resultado uma curva representativa das precipitações médias mensais do período histórico analisado. A figura 4.3 ilustra um exemplo da explanação deste parágrafo. Uma síntese do método de Fourier é descrita através das equações subsequentes. Estas equações 1 a 5 foram obtidas de KOTTEGODA (1980).

$$Alfa(m) = Mm(m) \times SEN(2 \times \pi \times Nm \times Nh / 12) \quad (1)$$

$$Beta(m) = Mm(m) \times SEN(2 \times \pi \times Nm \times Nh / 12) \quad (2)$$

$$Teta(m) = \Sigma Alfa(m) \times SEN(2 \times \pi \times Nm \times Nh / 12) \quad (3)$$

$$Gama(m) = \Sigma Beta(m) \times COS(2 \times \pi \times Nm \times Nh / 12) \quad (4)$$

$$H.A(m) = PMm + Teta(m) + Gama(m) \quad (5)$$

Na qual:

- m : índice do mês (ex: $m = \text{janeiro, fevereiro, março, ...}$)
- $Mm(m)$: média das precipitações mensais (mm/mês).
- Nm : número referente ao mês. (ex: para Janeiro, $Nm = 1$; para Fevereiro, $Nm = 2$; para Março, $Nm = 3$; ...)
- Nh : número de harmônicos considerados para um melhor ajuste da Função de Fourier. (Nh deve variar de 1 a 6 harmônicos).
- PMm : precipitação média mensal (mm/mês) de todo o período analisado.
- $H.A(m)$: harmônico ajustado aos valores médios mensais (mm/mês)

- **Análise da Tendência das Séries Históricas de Precipitação.**

O método escolhido para a análise de tendência, das séries históricas de precipitações médias diárias, foi o método da regressão linear. Uma vez que, segundo KOTTEGODA (1980), desvios na tendência de uma série hidrológica são causadas por movimentos climáticos oscilatórios de baixa frequência, movimentos estes com duração da ordem de dezenas de anos, escolheu-se o método da regressão linear simples para a construção de uma reta representativa da tendência histórica de evolução das precipitações médias diárias, uma vez que o período histórico analisado é de apenas

Figura 4.4: Função Harmônica de Fourier ajustada à sequência de valores médios mensais de precipitação, correspondente a 120 meses de registros, sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

uma dezena de anos. Segundo LAPPONI (1997), a reta de regressão, representativa da tendência da série histórica de precipitação, pode ser representada pela equação:

$$P_{tendencia} = a + b \times T \quad (6)$$

Na qual:

$P_{tendencia}$: é a variável dependente representativa da tendência.

T : variável independente representativa do tempo.

a e b : coeficientes de intercepto e declividade.

$P_{observada}$: precipitação média diária observada.

Um vez que os n pares de valores, $P_{observada}$ e T , estão distribuídos ao redor da reta ajustada $P_{tendencia}$ de tendência, existirá um desvio d_i entre os valores $P_{observada}$ e $P_{tendencia}$, conforme indicado na figura 4.4, mostrando que, em geral, para cada valor de T o valor observado $P_{observada}$ e o valor ajustado $P_{tendencia}$ serão diferentes. Isto é, existirá um desvio medido como:

$$d_i = P_{observada.i} - P_{tendencia.i} \quad (7)$$

Compondo a equação 7 com a equação 6, temos:

$$d_i = P_{observada.i} - (a + b \times T_i) \quad (8)$$

Figura 4.5: Esquema ilustrativo do método da regressão linear simples.

Uma vez que o melhor ajuste, da reta de tendência, se dará quando o somatório dos quadrados dos desvios for minimizado, temos:

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n (P_{observada_i} - a - b \times T_i)^2 \Rightarrow \text{deve ser um valor mínimo.} \quad (9)$$

Aplicando conceitos de cálculo diferencial com derivadas parciais, uma vez que a soma dos quadrados dos desvios deva ser um valor mínimo, temos, para os coeficientes de declividade e intercepto, a e b :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n P_{observada_i} - b \times \sum_{i=1}^n T_i}{n} \quad (10)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \times P_{observada_i} - \sum_{i=1}^n T_i \times \sum_{i=1}^n P_{observada_i}}{n \times \sum_{i=1}^n T_i^2 - (\sum_{i=1}^n T_i)^2} \quad (11)$$

- ***Comportamento das Precipitações em Função da Temperatura.***

Para a estimativa da variação do regime de precipitação, em decorrência da projeção de aumento da temperatura, sobre a região da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, foram calculadas as variações dos registros históricos da umidade relativa do ar (UR) e da tensão saturante do vapor d'água (Es) em função da variação da temperatura, segundo a metodologia de MENDIONDO (2004).

Estas duas variáveis são funções, simples ou composta, da temperatura. Para o cálculo da variação absoluta destas variáveis, em função da variação absoluta da temperatura, foram tomadas como base as temperaturas médias mensais registradas no ano de 2000. As temperaturas médias mensais adotadas, para toda a região da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, foram obtidas das medições da Estação Climatológica do CRHEA/USP (2005). As variações regionais absolutas das temperaturas para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, a partir do ano base de 2000, foram obtidas a partir da aplicação do modelo climático UDCM.

Para os estudos deste trabalho de Dissertação considerou-se que as temperaturas médias mensais, registradas pela Estação Climatológica do CRHEA/USP (2004), fossem representativas das temperaturas médias mensais de toda a região da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. Considerou-se também que, até o ano de 2050, não haverá mudança significativa da tensão do vapor d'água (Ea), sobre a região, permanecendo constantes, ao longo do tempo, os valores mensais, registrados no ano 2000, pela estação climatológica supracitada. Porém haverá mudanças na tensão saturante de vapor (Es) devido às projeções de mudança na temperatura. O cálculo da tensão saturante do vapor d'água (Es) foi efetuado com a fórmula de Tetens (TUCCI, 1993), como segue:

$$Es = 611 \times e^{(a.T)/(b+T)} \quad (12)$$

Na qual:

Es : tensão saturante de vapor d'água (Pa).

T : representa a temperatura do ar em ($^{\circ}C$).

$a = 17,27$ e $b = 237,3$: são valores constantes para a água.

e : base exponencial.

O cálculo de UR foi efetuado com a seguinte fórmula (TUCCI, 1993):

$$UR = 100 \times (Ea/Es) \quad (13)$$

Na qual:

UR : umidade relativa do ar em termos percentuais (%)

Ea : tensão de vapor d'água (Pa).

Sendo a tensão saturante do vapor d'água função da temperatura, a umidade relativa é, então, uma função composta da temperatura como segue:

$$UR = 100 \times (Ea / (611 \times e^{(a.T)/(b+T)})) \quad (14)$$

A equação para o cálculo da taxa de variação da umidade relativa do ar, em função da variação da temperatura, foi obtida a partir da derivação parcial da equação 14. A equação resultante é a seguinte:

$$\frac{\partial UR}{\partial T} = 0,1637 \times Ea \times e^{\frac{17,27 \times T}{237,3 + T}} \times \left[\left(\frac{17,27}{237,3 + T} \right) - \left(\frac{17,27T}{(237,3 + T)^2} \right) \right] \quad (15)$$

Na qual:

$\partial UR / \partial T$: taxa de variação da umidade relativa do ar (% / °C)

De acordo com diferentes valores de temperatura, e por consequência diferentes valores de tensão saturante do vapor d'água (E_s) e umidade relativa do ar (UR), para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, também o regime de precipitação deverá mudar. De acordo com MENDIONDO (2004) estas mudanças podem ser avaliadas através de uma relação empírica entre a média mensal histórica da umidade relativa do ar (UR) e a precipitação histórica média mensal (P).

Para a construção da relação empírica supracitada foram usados os dados históricos de média mensal da umidade relativa do ar e precipitação mensal, coletados pela estação climatológica do CHREA/USP (2004), dos anos de 1973 a 2003. Para o ajuste da curva polinomial, aos dados de média mensal da umidade relativa do ar e precipitação mensal, foi usado o método dos mínimos quadrados. Este ajuste foi feito com ferramenta específica do programa Excel.

Considerou-se que a equação polinomial da relação empírica, entre a média mensal da umidade relativa do ar e a precipitação mensal, fosse representativa para toda a região da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. A equação polinomial obtida da relação empírica é a seguinte:

$$\text{para } 0\% \leq UR \leq 20\%: P = 0 \text{ mm} \quad (16)$$

$$\text{para } 20\% < UR \leq 100\%: P = 0,0042.UR^3 - 0,5285.UR^2 + 21,784.UR - 264,57$$

Na qual:

P : precipitação média mensal (mm/mês)

Observa-se que a equação polinomial, representativa da relação entre precipitação mensal e umidade relativa do ar média mensal, foi ajustada para uma faixa de valores, de umidade relativa do ar, de 20% a 87%. No entanto, considera-se a extrapolação da utilização desta equação para valores de umidade relativa fora desta faixa. Ainda, em análise prospectiva dos dados da Estação Climatológica do CRHEA/USP, como nenhum registro de umidade relativa do ar abaixo de 20% foi

encontrado, para efeitos práticos considerou-se que abaixo deste valor não ocorreria precipitação. A equação para o cálculo da taxa de variação da precipitação mensal, em função da variação da umidade relativa do ar, foi obtida a partir da derivação parcial da equação 16. A equação resultante é a seguinte:

$$\frac{\partial P}{\partial UR} = 21,784 - 1,057 \times UR + 0,0126 \times UR^2 \quad (17)$$

Na qual:

$\partial P/\partial UR$: variação da precipitação mensal (mm/%)

4.2.1.2 Geração das Séries Sintéticas.

Como ferramenta para a geração das séries sintéticas futuras de precipitação, sobre as sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, foi usado o modelo estocástico linear ARMA(1,1) com um termo auto-regressivo e um termo de média móvel. Estas séries foram geradas a partir das séries históricas médias diárias citadas no subitem anterior. Todas as modelagens e simulações das séries sintéticas foram realizados em planilhas Excel dispostas no anexo A3.

- ***A Escolha do Modelo Estocástico Linear.***

A escolha do modelo ARMA, para a geração das séries sintéticas, é baseada nas recomendações de OBEYSEKERA et al (1987), para a modelagem e simulação de chuvas diárias, e na avaliação dos critérios de autocorrelação segundo KOTTEGODA (1980). A escolha de um termo auto-regressivo e um termo de média móvel parte da observação de que as séries históricas de precipitação observadas, para as sub-bacias do Tietê-Jacaré, apresentaram um decaimento exponencial, em suas funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, após o Lag 1. Estes critérios, para a escolha do modelo estocástico linear e determinação de suas respectivas ordens, foram obtidos de KOTTEGODA (1980). Os gráficos das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial encontram-se no anexo A3. As figuras 4.5 e 4.6 ilustram exemplos de autocorrelograma e autocorrelograma parcial obtido a partir das precipitações médias mensais históricas sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

Figura 4.6: Autocorrelograma Serial para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

Figura 4.7: Autocorrelograma Parcial para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

A adoção de períodos diários, para a geração das séries sintéticas futuras de precipitação, justifica-se na observação de que as sub-bacias, para as quais foram simulados os processos de transformação precipitação-vazão, têm períodos de concentração que vão de 1 a 3 dias, segundo resultados dos cálculos realizados e dispostos no anexo C2. As séries sintéticas de precipitação foram geradas segundo a sequência de passos descritos nos parágrafos subsequentes deste subitem.

- *Análise das Distribuições de Freqüências.*

Uma vez analisadas as componentes, de tendência e sazonalidade, das séries históricas de precipitações, durante a fase de estudos prospectivos, o primeiro passo, para a geração das séries sintéticas de precipitação média diária, foi o da análise das distribuições de freqüências das séries históricas. Neste passo foram construídos histogramas de freqüência e foram avaliadas as médias, os desvios padrão, coeficientes de assimetria e curtoses destas séries históricas. A média representa um comportamento central tendencial da distribuição discreta de freqüências; o desvio padrão uma medida de dispersão em torno desta média; o coeficiente de assimetria uma medida da assimetria da distribuição em torno da média; e o coeficiente de curtose uma medida da magnitude do pico da distribuição mencionada. Os parâmetros mencionados neste parágrafo são representações de momentos estatísticos em torno da média (MAMDOUH, 1993). As seguintes equações foram obtidas de MCMAHON e MAIN (1986):

$$P_{média} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (18)$$

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (P_i - P_{média})^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$C_s = \frac{\frac{n}{(n-1) \times (n-2)} \times \sum_{i=1}^n (P_i - P_{média})^3}{S^3} \quad (20)$$

$$K = \frac{\frac{n^3}{(n-1) \times (n-2) \times (n-3)} \times \sum_{i=1}^n (P_i - P_{média})^4}{S^4} \quad (21)$$

Na qual:

$P_{média}$:	precipitação média diária (mm/dia).
n :	número de dias de registros de precipitação média diária.
i :	índice do dia.
P_i :	precipitação no dia i (mm/dia).
S :	desvio padrão.
C_s :	coeficiente de assimetria.

K: *coeficiente de curtose.*

Com estes parâmetros foram determinadas, no gráfico de curtose *versus* assimetria da página 76 de KOTTEGODA (1980), as distribuições teóricas de probabilidade que melhor se ajustavam às distribuições de freqüências das séries históricas. Esta análise se faz necessária uma vez que o padrão estatístico de distribuição do número aleatório gerado, que é componente do modelo ARMA, é o da distribuição teórica normal padronizada, ou seja, com média igual a zero e desvio padrão igual a um. Portanto, a distribuição de freqüências observada da série histórica, deve ser o mais verossímil possível da distribuição normal de probabilidades.

- ***Normalização e Padronização das Séries Históricas.***

Uma vez constatado que a distribuição de freqüências da série histórica de precipitações médias diárias não se assemelhava à distribuição normal de probabilidades, através da inspeção visual do histograma de freqüências e análise dos resultados dos cálculos da média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e curtose, desta distribuição de freqüências observada, procedeu-se à normalização e padronização das séries históricas de precipitações médias diárias. Este procedimento se faz necessário uma vez que o número aleatório, componente do modelo ARMA, foi gerado, através de ferramenta do programa Excel, com um padrão normal de distribuição.

O método escolhido para a normalização das séries históricas foi o de BOX-COX. Segundo MCMAHON (1986), o método pode ser aplicado através das seguintes equações:

$$PN_i = \frac{P_i^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{para } \lambda \neq 0, e \quad (22)$$

$$PN_i = \text{Log}(P_i) \quad \text{para } \lambda = 0. \quad (23)$$

Na qual:

PN_i: *valor normalizado da precipitação média diária (mm/dia).*

P_i: *precipitação média diária (mm/dia).*

λ: *parâmetro a ser ajustado para que PN_i tenha um coeficiente de assimetria igual a zero.*

Log: *logaritmo na base 10.*

As figuras 4.7 e 4.8 ilustram, respectivamente, exemplos de um histograma de frequências de uma série histórica e de um histograma de frequências da série histórica normalizada pelo método de BOX-COX. Procedeu-se a padronização das mesmas através da equação abaixo obtida de MCMAHON (1986).

$$PNP_i = \frac{PN_i - P_{média}}{SN} \quad (24)$$

Na qual:

PNP_i : precipitação média diária normalizada e padronizada (mm/dia).

PN_i : precipitação normalizada pelo método de BOX-COX (mm/dia).

$P_{média}$: média das precipitações média diárias (mm/dia).

SN : desvio padrão da série histórica normalizada.

- **Aplicação do Modelo ARMA(1,1).**

Uma vez normalizadas e padronizadas as séries históricas de precipitação média diária, o passo subsequente foi o da aplicação do modelo ARMA com um termo auto-regressivo e um termo de média móvel.

Figura 4.8: Histograma de frequências da série histórica de precipitações médias mensais sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

Figura 4.9: Histograma de frequências da série histórica normalizada de precipitações médias mensais sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

A formulação do modelo ARMA(1,1), apresentada abaixo, foi adaptada de KOTTEGODA (1980).

$$Z_i = (\phi_1 \times Z_{i-1}) + a_i - (\theta_1 \times a_{i-1}) \quad (25)$$

Na qual:

Z_i : desvio em relação à média do processo.

θ e ϕ : parâmetros auto-regressivos e de médias móveis respectivamente.

a_i : ruído branco ou número aleatório.

t : tempo em dias.

A determinação dos parâmetros θ e ϕ foi feita através do tratamento dos resíduos do modelo ARMA com o método da Soma dos Mínimos Quadrados. A rotina iterativa de otimização do método da Soma dos Mínimos Quadrados foi realizada com a ferramenta Solver do programa Excel. θ e ϕ são então determinados quando o somatório dos quadrados dos resíduos é minimizado. Segundo SALAS (1993) o resíduo do modelo ARMA(1,1), e seu respectivo tratamento através do método dos mínimos quadrados, podem ser descritos através das seguintes equações:

$$R_i = PNP_i - \phi_1 \times PNP_{i-1} + \theta_1 \times R_{i-1} \quad (26)$$

$$SMN = \sum_{i=1}^n R_i^2 \quad (27)$$

Na qual:

R_i : resíduo do modelo ARMA.

PNP_i : precipitação média diária normalizada e padronizada (mm/dia).

SMN : somatório dos quadrados dos resíduos.

- **Despadronização e Restituição da Distribuição Original de Frequências.**

Uma vez geradas as séries sintéticas, procede-se a sua despadronização e restituição da distribuição original de frequências observada no histograma de frequências da série histórica. A despadronização é realizada através da seguinte equação:

$$PNP_i \times SN + P_{média} = PN_i \quad (28)$$

Na qual:

PNP_i : precipitação média diária normalizada e padronizada (mm/dia).

PN_i : precipitação normalizada pelo método de BOX-COX (mm/dia).

$P_{média}$: média das precipitações média diárias (mm/dia).

SN : desvio padrão da série histórica normalizada.

Após a despadronização, aplica-se, de forma inversa, o método de BOX-COX para a remoção do padrão normal de distribuição, através das seguintes equações:

$$(PN_i \times \lambda + 1)^{1/\lambda} = P_i \quad \text{para } \lambda \neq 0, e \quad (29)$$

$$10^{PN_i} = P_i \quad \text{para } \lambda = 0. \quad (30)$$

Na qual:

PN_i : valor normalizado da precipitação média diária (mm/dia).

P_i : precipitação média diária (mm/dia).

4.2.1.3 Séries Sintéticas Segundo o Cenário CCT.

Para este cenário climático supõe-se que as projeções de mudanças climáticas globais, feitas por instituições como o IPCC, não terão efeito significativo sobre a configuração climática da região ora em estudo. Portanto, para o Cenário Climático Tendencial CCT, as características estatísticas das séries históricas de precipitação, como tendência e periodicidade, se propagam para as séries futuras de precipitação, ou seja, o regime futuro de precipitações tende a ter um padrão igual ao regime histórico precipitações.

Para cada sub-bacia foram geradas séries sintéticas de precipitação, para os anos horizontes de 2010, 2025 e 2050, tomando-se como base as séries históricas de precipitações médias diárias. As séries sintéticas foram geradas segundo a metodologia descrita no subitem 4.2.1.2, no entanto, a tendência inferida nestas séries foi a tendência linear aferida nas séries históricas através do método da regressão linear. Ou seja, para o cenário CCT, foi aplicada uma taxa constante de variação, no tempo, ao valor médio das precipitações diárias. As equações abaixo sintetizam a metodologia:

$$P_{tendencia.i} = a + b \times T_i \quad (31)$$

$$P_i = P_{tendencia.i} + Z_i \quad (32)$$

Na qual:

$P_{tendencia.i}$: *é a variável representativa da tendência da série sintética (mm/dia).*

T : *variável representativa do tempo (dia).*

a e b : *coeficientes de intercepto e declividade aferidos na série histórica.*

P_i : *precipitação diária com a tendência aplicada.*

Z_i : *desvio em relação à média do processo.*

Embora se reconheça, neste trabalho de Dissertação, que a tendência das precipitações históricas não tenha um comportamento linear com o tempo, usou-se uma equação linear para representá-la, haja visto o período histórico analisado, de dez anos, ser menor que o período médio das oscilações climáticas de baixa frequência.

4.2.1.4 Séries Sintéticas Segundo o Cenário CCA.

Para este cenário climático, admite-se que as projeções de mudanças climáticas globais, feitas pelo IPCC (2000), terão efeito sobre a configuração climática da região ora em estudo. Ou seja, para o Cenário CCA, as características estatísticas das séries futuras de precipitação, como tendência e periodicidade mudam segundo os efeitos regionais da narrativa do cenário global de referência A1F (IPCC, 2000).

A justificativa para a escolha do cenário de referência A1F baseia-se no fato de que, segundo simulações do modelo climático UDCM, a narrativa deste cenário é a que causa o maior impacto sobre o clima da região sudeste do Brasil, onde se situa a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, provocando um decréscimo da quantidade de chuvas sobre a região ora em estudo. Ou seja, dentre os cenários de referência do IPCC, o cenário A1F é o que descreve as condições climáticas mais extremas. O modelo UDCM projeta, para a narrativa do cenário A1F, um aumento de 2,9°C para a temperatura média da região até 2050, tomando como base o registro do ano de 2000.

Para o cenário CCA foram aplicadas taxas sazonais de variação aos resultados das precipitações das séries sintéticas. Estas taxas de variação da precipitação, funções composta da temperatura e da umidade relativa do ar, foram calculadas a partir da equação 17. As variações sazonais na temperatura, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, que por consequência provocam variações na umidade relativa do ar e nos regimes de precipitações, foram obtidas a partir de aplicações do modelo UDCM. Como produto final destes passos, obteve-se as séries sintéticas de precipitações médias diárias geradas para os horizontes futuros de tempo de 2010, 2025 e 2050, segundo as narrativas dos cenários climáticos CCA e CCT. O fluxograma, dos passos acima descritos, para a geração das séries sintéticas encontra-se na figura 4.9.

4.2.1.5 Validação da Metodologia Adotada.

Como procedimento para a validação da metodologia adotada para a geração das séries sintéticas de precipitação, faz-se necessária a comparação das características dos resultados das séries sintéticas geradas com as características estatísticas das séries históricas de precipitação apuradas na fase de estudos prospectivos.

Também, uma vez que se usou números aleatórios padronizados e normalmente distribuídos, os resíduos do modelo ARMA adotado deverão ter esse padrão estatístico.

Figura 4.10: Fluxograma dos passos para a geração das séries sintéticas.

4.2.2 DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL.

Uma vez que um dos objetivos deste trabalho de Dissertação é avaliar as mudanças na disponibilidade hídrica superficial, em decorrência de conjecturas de mudanças nos regimes futuros de precipitações, desenvolveram-se estudos prospectivos e aplicações com modelo o HEC-HMS 2.1 (USACE, 2001) com o intuito de se caracterizar a resposta, em termos de escoamento superficial, das bacias hidrográficas ora em estudo, em função dos estímulos das precipitações.

4.2.2.1 Estudos Prospectivos.

Na fase de estudos prospectivos foram levantados dados históricos diários de vazão, precipitação e distribuição espacial das precipitações, sobre as sub-bacias ora em estudo, com o intuito de se calibrar o modelo matemático representativo dos processos de escoamento superficial das sub-bacias.

Como base de dados para a calibração do modelo foram usados os registros dos postos pluviométricos e fluviométricos do DAEE(1998) e SIGRH (2005). A localização dos postos pluviométricos, para a avaliação da distribuição espacial das chuvas, foi obtida a partir da base cartográfica do CBH-TJ (2000).

4.2.2.2 O Programa HEC-HMS.

O programa HEC-HMS 2.1 simula processos de precipitação e escoamento superficial em sistemas de bacias hidrográficas. O HEC-HMS é aplicável em vários de regiões geográficas para a solução dos mais diversos problemas da engenharia hidrológica (USACE, 2001). Estes problemas incluem desde a simulação da disponibilidade hídrica em grandes bacias e em longos períodos de tempo até a simulação de eventos concentrados de enchentes em pequenas bacias urbanas. Os hidrogramas produzidos pelo programa podem ser usados diretamente, em conjunto com outros programas, para estudos de disponibilidade hídrica, drenagem urbana, previsão de enchentes, impactos da urbanização nos processos de escoamento superficial, projeto hidrológico de reservatórios e operação de sistemas hídricos (USACE, 2000).

Figura 4.11 – Fluxograma de modelagem de sistemas hidrológicos com o programa HEC-HMS.

O HEC-HMS 2.1 possui métodos de simulação de eventos concentrados e longos períodos contínuos de tempo e modela os sistemas hidrológicos tanto de forma concentrada como distribuída. Este programa é fruto do aperfeiçoamento de versões anteriores ao longo de 30 anos de experiência, em modelagem computacional de sistemas hidrológicos, por parte da USACE (“*United States Army Corps of Engineers*”).

A representação física das bacias e cursos d’água é configurada no modelo de bacias do HEC-HMS 2.1. Elementos hidrológicos são conectados em rede para a simulação dos processos de escoamento. Os elementos hidrológicos disponíveis são: sub-bacias, canais, junções, reservatórios, desvios, fontes e sumidouros. A figura 4.10 ilustra uma seqüência de passos de aplicação do modelo.

4.2.2.3 Estruturação do Modelo Hidrológico.

Uma vez que se quer simular processos hidrológicos contínuos e de longo período, ou seja, processos de escoamento superficial para longos períodos de tempo que contenham vários eventos de precipitação, procedeu-se a escolha de modelos do HEC-HMS apropriados a este tipo de simulação. A figura 4.11 ilustra um digrama representativo da simulação realizada pelo HEC-HMS dos processos hidrológicos intervenientes ao escoamento superficial.

- ***Simulação dos Processos de Precipitação e Evapotranspiração.***

O método escolhido para a distribuição espacial das chuvas, sobre as sub-bacias hidrográficas ora em estudo, foi o dos Polígonos de Thiessen. Neste método assume-se a hipótese de que a precipitação, em qualquer ponto do polígono, seja igual à da

Figura 4.12 – Esquema ilustrativo das simulações do HEC-HMS.

registrada na estação pluviométrica que o representa. Os postos pluviométricos, usados para representar a distribuição espacial das chuvas através do método de Thiessen, usados para a simulação dos cenários futuros e calibragem do modelo, foram os do DAEE.

Uma vez que se quer avaliar a resposta da bacia, em termos de disponibilidade hídrica superficial, a longos períodos de tempo, períodos estes compostos de épocas chuvosas e de estiagem, a evapotranspiração deve ser levada em conta. Durante períodos de estiagem, o estado hídrico da bacia muda continuamente, de acordo com os movimentos das massas d'água. O HEC-HMS simula a evapotranspiração da água diretamente da superfície do solo, dos corpos d'água e da vegetação. Os dados de evaporação, usados nas simulações e calibragem, foram obtidos dos registros da Estação Climatológica do CRHEA/USP. Considerou-se que os dados desta estação fossem representativos de toda a região em estudo. A explanação de como o HEC-HMS simula os processos de evapotranspiração encontra-se na descrição do modelo SMA, explanada logo abaixo.

- ***Simulação dos Volumes de Escoamento Superficial.***

De acordo com a ilustração da figura 4.11, o programa HEC-HMS simula os volumes de escoamento superficial através da computação dos volumes de água que são

interceptados, infiltrados, armazenados, evapotranspirados ou, em suma, subtraídos do volume precipitado. A interceptação, infiltração, armazenamento e evapotranspiração são, definido pelo HEC-HMS, como perdas do volume precipitado. Portanto, um modelo que represente as perdas dos volumes precipitados deve ser escolhido. Uma vez que se quer simular um período contínuo de tempo, onde se leve em consideração os períodos chuvosos e de estiagem, faz-se necessária a escolha de um modelo que represente o movimento contínuo das massas d'água entre os diversos componentes de uma bacia hidrográfica que têm efeito significativo sobre esta dinâmica. Para a modelagem de longos períodos o HEC-HMS dispõe do modelo SMA (*"Soil-Moisture Accounting Units"*).

O modelo SMA simula o movimento das massas d'água através da dinâmica de armazenamentos na vegetação, superfície do solo e perfis subterrâneos (USACE, 2001). Dados a transpiração e a evapotranspiração potencial, o modelo simula o escoamento superficial em uma bacia, os escoamentos subterrâneos, perdas devido a evapotranspiração, infiltração e percolação, assim como os movimentos de ascensão capilar. A figura 4.12 ilustra um esquema do modelo SMA, adaptado de USACE (2000). O modelo SMA representa a bacia hidrográfica como uma série de perfis de armazenamento. Taxas de escoamento entre os diversos perfis e capacidades de armazenamento são associadas a cada componente do modelo. Os armazenamentos, em cada um destes componentes, são calculados ao longo das simulações e variam continuamente durante e entre os eventos de precipitação.

O perfil de armazenamento da interceptação vegetal representa a parcela da precipitação que é armazenada pela vegetação e não chega ao solo. A precipitação é a única afluência a este perfil, Quando a precipitação ocorre, ela preenche, primeiramente, este volume.

A depressão superficial representa todo o volume de água armazenado no micro-relevo da superfície. Todo o conteúdo armazenado neste perfil, no início do processo, irá infiltrar até que a capacidade de armazenamento deste perfil chegue no limite. Ocorrendo este limite, o excesso de água irá contribuir para o escoamento superficial.

O perfil da zona sub-superficial representa todo o volume d'água armazenado no perfil superior do solo. Este perfil é dividido em duas zonas pelo HEC-HMS: a zona superior e a zona de tensão. A zona superior é definida como sendo a porção deste perfil que irá perder água por evapotranspiração e por percolação. A zona de tensão é definida como sendo a porção deste perfil que irá perder água somente por evapotranspiração. A

zona superior representa a água presa nos poros do solo. A zona de tensão representa a água em aderência às partículas do solo. Os efeitos de evapotranspiração ocorrem primeiro na zona superior e depois na zona de tensão. Portanto, os efeitos da evapotranspiração são reduzidos abaixo da sua taxa potencial quando da ocorrência na zona de tensão. Isto representa o acréscimo natural da resistência na remoção da água do solo quando esta está aderida às suas partículas.

Os armazenamentos nos dois perfis subterrâneos representam processos de escoamento subterrâneo. A água percola para os perfis subterrâneos através da zona sub-superficial. As perdas nos perfis de armazenamento subterrâneo são devidas ao escoamento subterrâneo horizontal e à percolação entre um perfil e outro.

Os componentes de escoamento entre os diversos perfis são: a precipitação, infiltração, percolação, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e evapotranspiração.

A **precipitação** é a entrada do sistema de armazenamentos. A precipitação primeiramente contribui para a interceptação vegetal. Quando esta é preenchida, o montante em excesso está então disponível para infiltração.

Infiltração é a quantidade de água que entra na zona sub-superficial, proveniente da superfície do solo. A quantidade de água que infiltra durante um determinado intervalo de tempo é uma função do volume de água disponível para infiltração, do estado momentâneo da zona sub-superficial do solo e da máxima taxa de infiltração. Para cada intervalo em análise, o modelo SMA computa o volume de infiltração potencial como:

$$IPS = IMS - \frac{VIS}{AMS} \times IMS \quad (33)$$

Na qual:

IPS: taxa de infiltração potencial (mm/hora).

IMS: taxa máxima de infiltração (mm/hora).

VIS: o volume de água no solo no início da simulação (mm).

AMS: máximo volume de água possível de ser armazenado no solo (mm).

Figura 4.13 – Esquema ilustrativo do Modelo SMA.

Caso o volume de água disponível na superfície para infiltração exceda a taxa calculada de infiltração potencial, o excesso irá então contribuir para o armazenamento da zona de depressão superficial.

Percolação é o movimento descendente de água, proveniente da zona sub-superficial do solo, passando pelos perfis subterrâneos. No modelo SMA, a taxa de percolação, entre os perfis subterrâneos, depende do volume d'água do perfil fonte e do perfil receptor da massa d'água. A taxa de percolação é maior quanto maior for a diferença de volumes d'água armazenados entre os perfis fonte e receptor. O modelo

SMA computa a taxa de percolação entre a zona sub-superficial e o perfil subterrâneo 1 através da seguinte equação:

$$PPS = PMS \times \left(\frac{AIS}{AMS} \right) \times \left(1 - \frac{AS1}{AS1M} \right) \quad (34)$$

Na qual:

PPS: taxa de percolação potencial do solo (mm/hr).

PMS: taxa máxima de percolação do solo (mm/hr).

AIS: armazenamento inicial de água no solo no início da simulação (mm).

AMS: máximo volume de água armazenável no solo (mm).

AS1: armazenamento inicial de água no perfil subterrâneo 1 no início da simulação (mm).

AS1M: máximo volume de água armazenável no perfil subterrâneo 1 (mm).

O cálculo do processo de percolação entre o perfil subterrâneo 1 e o perfil subterrâneo 2 pode ser efetuado também através da equação 34.

O **volume de água escoado superficialmente** é o montante que excede a taxa de infiltração e supera a contenção do micro-relevo superficial e demais elementos de reservação. O modelo SMA computa apenas o volume escoado superficialmente, a distribuição temporal deste volume, em termos de vazão, ou hidrograma, é calculado por outro modelo a ser descrito mais a frente.

O **escoamento subterrâneo** é a soma dos volumes extravasados de cada perfil subterrâneo no fim de cada intervalo de tempo da simulação. A taxa de fluxo do escoamento subterrâneo é calculada, pelo modelo SMA, através da seguinte equação:

$$FES_{T+1} = \frac{PSA + AS1 - PPS1 - \frac{1}{2} \times FES_T \times T}{CES + \frac{1}{2} \times T} \quad (35)$$

Na qual:

FES_{T+1}: taxa de escoamento subterrâneo no início do tempo de simulação T+1 (mm/hora).

FES_T: taxa de escoamento subterrâneo no início do tempo de simulação T (mm/hora).

PSA: taxa de percolação atual do solo para o perfil subterrâneo 1 (mm/hora).

PPS1: percolação potencial do perfil subterrâneo 1 (mm/hora).

T: passo da simulação.

CES: coeficiente adimensional de escoamento do perfil subterrâneo 1.

O volume de escoamento subterrâneo, liberado pela bacia durante a simulação de um período contínuo, pode ser calculada através da integral da taxa de fluxo do escoamento subterrâneo sobre o período simulado. O modelo SMA computa este volume (*VES*) através da seguinte equação:

$$VES = \frac{1}{2} \times (FES_{T+1} + FES_T) \times T \quad (36)$$

A **evapotranspiração** representa perdas de volume d'água no armazenamento da interceptação vegetal, depressões superficiais, e armazenamentos no perfil sub-superficial do solo. No modelo SMA a demanda de água pela evapotranspiração é computada através dos valores médios mensais de evaporação, multiplicados por um coeficiente de correção. A evapotranspiração, segundo a simulação do HEC-HMS, atua, ao mesmo tempo, em todos os componentes mencionados no parágrafo anterior. No perfil sub-superficial, a evapotranspiração atua primeiramente na zona superior até exauri-la para, posteriormente, atuar na zona de tensão. Neste passo a evapotranspiração passa a ser uma parcela da evapotranspiração potencial e é calculada, pelo modelo SMA, através da seguinte equação:

$$ETA = ETPM \times F(AIS, AMZT) \quad (37)$$

Onde:

ETA: evapotranspiração no solo sub-superficial (mm/hora).

ETPM: evapotranspiração máxima potencial (mm/hora).

AMTZ: armazenamento máximo na zona de tensão (mm).

A função $F(AIS, AMZT)$ é definida da seguinte forma:

- Quando o armazenamento no perfil sub-superficial do solo exceder o armazenamento máximo da zona de tensão ($AIS / AMZT > 1$) a água será removida da zona superior a uma taxa constante e igual a 1.

- Quando o volume de água alcançar a zona de tensão, $F(AIS, AMZT)$ terá um valor igual à taxa de percolação.

Segundo o manual de referência técnicas do USACE (2000), os parâmetros do modelo SMA devem ser determinados através de calibração com dados observados de vazão. BENNETT (1998) faz a explanação de um guia de referências para o processo de calibração e adoção dos valores iniciais destes parâmetros.

- ***Simulação da Propagação do Escoamento Superficial.***

Seguindo recomendações de CUNDERLIK (2004), para a simulação da propagação de escoamentos superficiais para longos períodos de tempo, procedeu-se a escolha do modelo do Hidrograma Unitário de CLARK. O modelo de CLARK deriva o hidrograma unitário da bacia através da representação de dois processos de transformação da precipitação em escoamento superficial: a **Translação** é o movimento do excesso de água precipitada desde o seu ponto de origem até o exutório da bacia, e a **Atenuação** é redução da magnitude do pico de descarga a medida que o excesso é armazenado através da bacia quando da propagação do escoamento.

O componente de translação é baseado num histograma sintético do tipo tempo-área e no tempo de concentração. O histograma tempo-área especifica uma área de contribuição da bacia, para o escoamento no exutório da bacia, como uma função do tempo. O componente de atenuação é modelado como um reservatório linear (USACE, 2001). O reservatório linear representa o impacto agregado de todo o armazenamento da bacia. O escoamento médio do reservatório durante um período de tempo t é (USACE, 2000):

$$O_T = C_A \times I_T + C_B \times O_{T-1} \quad (38)$$

Na qual:

I_t : é a afluência média ao reservatório no tempo t .

C_a e C_b : são coeficientes de atenuação dados por:

$$C_A = \frac{\Delta T}{ST + 0.5\Delta T} \quad (39)$$

$$C_B = 1 - C_A \quad (40)$$

Os parâmetros requeridos pelo HEC-HMS, para o modelo de CLARK são o tempo de concentração (T_c) e o coeficiente de armazenamento (ST). Neste trabalho de Dissertação o coeficiente de armazenamento foi determinado através de calibração e o tempo de concentração através da equação de Dooge (apud TUCCI, 1993), recomendada para bacias rurais com área entre 140 km² e 930 km², como segue:

$$T_c = 21,88 \times A^{0,41} \times S^{-0,17} \quad (41)$$

Na qual:

- A : área da bacia em km².
- S : declividade do talvegue em m/m.
- T_c : tempo de concentração em minutos.

- ***Simulação do Escoamento em Canais.***

Em decorrência da pouca disponibilidade de dados acerca da geometria dos canais simulados, procedeu-se à escolha do modelo de Muskingum para a simulação dos escoamentos nos canais. O modelo de Muskingum admite uma relação linear entre volumes armazenados em um trecho do curso d'água e as vazões de entrada e saída neste trecho, conforme a equação a seguir:

$$V = K \times [X \times I + (1 - X) \times Q] \quad (42)$$

Na qual:

- V : volume armazenado no trecho (m³).
- I : vazão de entrada no trecho (m³/s).
- Q : vazão de saída do trecho (m³/s).
- K : constante de armazenamento ou recessão.
- X : fator de ponderação.

A constante de recessão e o fator de ponderação foram determinados através de processos de calibração.

- ***Simulação do Escoamento de Base.***

O modelo SMA, do HEC-HMS, foi desenvolvido para trabalhar em conjunto com o modelo de escoamento de base do reservatório linear (CUNDERLIK 2004). Neste modelo, os escoamentos, provenientes dos perfis subterrâneos do modelo SMA, são afluências aos reservatórios lineares do modelo de escoamento de base. Os parâmetros requeridos para o modelo de reservatório linear do escoamento de base são o coeficiente de armazenamento (Bs) e o número de reservatórios (Br). Estes parâmetros podem ser especificados para cada perfil subterrâneo do modelo SMA, em separado.

4.2.2.4 Calibragem e Verificação.

O primeiro passo para a calibragem do modelo, aos valores observados de vazão das estações fluviométricas do DAEE, foi o da escolha do período de análise e dos parâmetros iniciais. O período escolhido, em cada sub-bacia analisada, foi o último período de 6 meses com disponibilidade de dados observados de vazão. A relação de estações fluviométricas e os respectivos períodos de calibração encontram-se no anexo A2. Todas as calibrações foram realizadas em períodos de 6 meses, de outubro a abril, aonde se concentra a maior parte do período chuvoso na região ora em estudo.

Os parâmetros iniciais, com exceção dos parâmetros do modelo de CLARK, foram obtidos do trabalho de CUNDERLIK (2004), que calibrou os parâmetros do modelo SMA para a bacia de 19.636 km² do rio Avon localizado na região ocidental da Austrália. Os parâmetros do trabalho de CUNDERLIK (2004) foram escolhidos como referência, para os parâmetros iniciais de calibração, para este trabalho em virtude dos tamanhos das bacias hidrográficas, do rio Avon e do Tietê-Jacaré, terem a mesma magnitude e as duas serem bacias rurais, localizadas em latitudes próximas.

A calibração foi executada a partir de uma seqüência de rotinas de otimização dos parâmetros mencionados, com um aplicativo específico do programa HEC-HMS 2.1, composta com etapas de calibração manual, dentro de uma faixa de valores, para os parâmetros, aceitáveis como representativos dos processos em questão, segundo CUNDERLIK (2004). Primeiro procedeu-se à calibração dos parâmetros intervenientes ao volume escoado total no período de 6 meses da calibração. Em seguida, com estes primeiros parâmetros fixados, procedeu-se a calibração dos parâmetros intervenientes aos períodos de recessão e por fim aos picos, dando-se menor importância a este último.

Segundo recomendações de CUNDERLIK (2004) a função-objetivo usada para o processo de calibração automática foi a PWRMS (“*Peak-weighted root mean square error*”), e o método de busca o algoritmo de Nelder-Mead. A função-objetivo PWRMS compara todas as ordenadas dos hidrogramas simulado e observado, através do quadrado das diferenças, e associa pesos a estes resultados. Segundo CUNDERLIK (2004) esta função é uma medida implícita de comparação da magnitude dos picos, volumes e tempo de ocorrência dos picos dos hidrogramas observado e simulado. A função PWRMS é descrita pela equação abaixo obtida de HEC (2000):

$$Z = \left\{ \frac{1}{NQ} \times \left[\sum_{i=1}^{NQ} (q_0(i) - q_s(i))^2 \times \left(\frac{q_0(i) + q_0(\text{média})}{2 \times q_0(\text{média})} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

Na qual:

Z : função objetivo.

NQ : número de ordenadas computadas do hidrograma.

$q_0(i)$: vazão do hidrograma observado.

$q_s(i)$: vazão do hidrograma simulado.

$q_0(\text{média})$: vazão média do hidrograma observado.

Observa-se que, por inexistência de dados de vazões recentes nos cursos d’água principais, os parâmetros supracitados das sub-bacias do Bauru, Tietê-Lençóis e Tietê-Claro não foram calibrados. Para a verificação dos parâmetros calibrados do modelo, procedeu-se a simulação de um período contínuo de tempo de dois anos de tal forma que este que não tivesse nenhuma intercessão com o período calibrado.

4.2.2.5 Cenários de Disponibilidade Hídrica Superficial.

Uma vez calibrados e verificados os modelos supracitados, considerou-se que estes fossem representativos dos processos de escoamento superficial das bacias. O passo subsequente para a geração de cenários de disponibilidade hídrica, segundo os cenários climáticos CCT e CCA, foi o da projeção das séries sintéticas de precipitação, geradas para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, sobre as áreas das respectivas sub-bacias. No entanto, como as séries sintéticas geradas são séries médias de precipitação sobre as respectivas áreas das sub-bacias, procedeu-se à decomposição

Figura 4.14 – Esquema ilustrativo da desagregação da precipitação sintética média diária.

destas segundo a distribuição espacial observada nos estudos prospectivos. A decomposição destas precipitações médias foi efetuada diariamente segundo o peso que cada registro de posto pluviométrico representa na composição da média aritmética. As séries de precipitações históricas usadas para a decomposição das precipitações médias diárias foram aquelas dos últimos registros do conjunto de postos pluviométricos considerados. A figura 4.13 e as equações subsequentes ilustram a explanação deste parágrafo.

$$W_{JI} = \frac{PMH_I}{PH_{JI}} \quad (44)$$

$$PS_{JI} = W_{JI} \times PMS_I \quad (45)$$

Na qual:

J : índice do posto pluviométrico.

I : índice indicativo do dia.

W_{JI} : peso atribuído ao posto J no dia I .

PMH_I : precipitação média diária histórica no dia I (mm/dia).

PH_{JI} : precipitação histórica diária no posto J no dia I (mm/dia).

PS_{JI} : precipitação sintética diária no posto J no dia I (mm/dia).

PMS_I : precipitação média sintética diária no dia I (mm/dia).

4.3. CENÁRIOS SÓCIO-ECONÔMICOS.

No âmbito deste trabalho de Dissertação são propostos dois cenários sócio-econômicos quantitativos: o Cenário Sócio-Econômico Tendencial (CSET) e o Cenário Sócio-Econômico Alternativo (CSEA):

O Cenário CSET é definido como sendo aquele em que se supõe que não ocorrerão mudanças substanciais nos padrões históricos de evolução das variáveis sócio-econômicas e dos parâmetros tecnológicos intervenientes ao uso da água.

O Cenário CSEA é definido como sendo aquele em que os padrões históricos de evolução das variáveis sócio-econômicas e dos parâmetros tecnológicos, intervenientes ao uso da água, das nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, serão significativamente alterados para as projeções futuras. As taxas de variação adotadas, para estas variáveis sócio-econômicas, serão as mesmas das projeções da narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000) para o continente Sul-Americano.

Embora seja provável que a eficiência no uso dos Recursos Hídricos irá aumentar, para os anos horizontes propostos, foi adotada a suposição de estagnação deste parâmetro uma vez que se quer avaliar a relação entre oferta e demanda segundo um conjunto de circunstâncias críticas. A tabela 4.2 relaciona as variáveis sócio-econômicas e os parâmetros tecnológicos de interesse analisados, para os estudos desta Dissertação, para os setores usuários da água.

4.3.1. CENÁRIO SÓCIO-ECONÔMICO TENDENCIAL (CSET).

Para este cenário sócio-econômico, supõe-se que as projeções de mudanças regionais nas estruturas social, econômica, institucional e cultural, causadas pelo fenômeno macro-econômico da globalização, não terão efeito significativo sobre os padrões históricos de evolução das variáveis sócio-econômicas e dos parâmetros tecnológicos aqui estudados. Portanto, este cenário sócio-econômico é um cenário de desenvolvimento eminentemente regional.

Para o Cenário CSET, as tendências históricas de evolução destas variáveis se perpetuam para as projeções futuras dos anos horizonte de 2010, 2025 e 2050. A construção dos cenários tendenciais foi feita em duas etapas: estudos prospectivos das variáveis e parâmetros mencionados e projeção destes para os anos horizonte supracitados.

Tabela 4.2: Variáveis sócio-econômicas e parâmetros tecnológicos analisados por setor usuário da água.

Sector Usuário da Água	Variáveis Sócio-Econômicas e Parâmetros Tecnológicos
Abastecimento Público.	População Urbana e Rural.
	Eficiência do Sistema de Captação e Distribuição.
	Consumos per-Capita das Populações Urbanas e Rurais
	População Conectada ao Sistema de Abastecimento.
	População não-Conectada ao Sistema de Abastecimento.
Diluição de Efluentes Domésticos	Fator de Correlação entre Consumo d'Água Potável e Lançamento de Águas Servidas.
	Percentual da População Atendida pela Rede de Coleta de Esgotos.
	Percentual do Esgoto Coletado que é Tratado.
	Carga Orgânica Potencial do Esgoto Sanitário não Tratado.
	Eficiência Média dos Processos de Tratamento de Esgotos
	Comprimentos dos corpos fluviais receptores de efluentes domésticos
Irrigação.	Áreas Irrigadas.
	Consumo Intensivo de Água das Áreas Irrigadas.
	Sazonalidade da Atividade da Irrigação.
Pecuária.	Espécies de Rebanhos.
	População dos Rebanhos.
	Consumo Per-Capita do Rebanho.
Indústria e Diluição de Efluentes Industriais.	Tipos de Indústrias.
	Produção Industrial.
	Consumo Intensivo da Produção Industrial.
	Fator de Correlação entre Consumo d'Água Potável e Lançamento de Águas Servidas.
	Carga Orgânica Potencial do Efluente Industrial
	Remanescente Orgânico após o Tratamento

Na etapa de estudos prospectivos, os registros históricos, de evolução das variáveis sócio-econômicas e dos parâmetros tecnológicos de interesse, das nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, foram coletados em publicações de órgãos gestores públicos e instituições de coleta e tratamento de dados estatísticos. A estes dados foram ajustadas curvas polinomiais de tendência pelo método dos mínimos quadrados.

Na etapa de projeção foram usadas curvas polinomiais de tendência, ajustas na etapa dos estudos prospectivos, para a extrapolação dos valores, das variáveis sócio-econômicas, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050. Em cada sub-bacia foram construídos cenários tendenciais para os anos horizonte mencionados. Para os cenários CSET admite-se que a eficiência no uso dos recursos hídricos, registradas atualmente, por parte dos setores usuários relatados na tabela 4.2, não mudará para a projeção futura.

Por fim, observa-se que o cenário CSET é uma conjectura de desenvolvimento eminentemente regional, uma vez que se supõe que as atividades econômicas irão

crescer às mesmas taxas projetadas de crescimento das populações humanas. Esta suposição foi necessária uma vez que não foram encontrados registros consistentes da evolução dos setores produtivos da região ora em estudo.

4.3.2. CENÁRIO SÓCIO-ECONÔMICO ALTERNATIVO (CSEA).

Para este cenário sócio-econômico, supõe-se que as projeções de mudanças regionais nas estruturas social e econômica, causadas pela evolução de fenômenos globais como o fenômeno macro-econômico da globalização, terão efeito significativo sobre os padrões históricos de evolução das variáveis sócio-econômicas e sobre os parâmetros tecnológicos intervenientes aos diversos usos dos recursos hídricos.

O processo de evolução adotado, das variáveis e parâmetros supracitados, é o mesmo da narrativa do cenário global A1F (IPCC, 2000) e respectivos efeitos regionais, ou seja, supõe-se que as taxas de variação, ao longo do tempo, destas variáveis e parâmetros sejam iguais às da narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000) para o continente Sul-Americano.

A outra justificativa para a escolha do cenário de referência A1F, além daquela de maior impacto no clima da região e maior redução das precipitações, citada no item 4.1, é a de que a dinâmica da narrativa deste cenário é a que mais exerce pressão, ou demanda, dos meios de produção, sobre os recursos naturais e, por conseqüência, sobre os recursos hídricos. Logo, o cenário A1F é o que narra a situação mais crítica para a região ora em estudo, combinando um maior aumento da demanda por água, por efeito do aumento da atividade produtiva, com uma maior diminuição da disponibilidade hídrica, por efeito de uma maior redução nas precipitações, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050.

Para a construção destes cenários quantitativos tomou-se como base os valores, das variáveis sócio-econômicas e dos parâmetros tecnológicos supracitados, os últimos registros dos órgãos públicos gestores e instituições de coleta e tratamento de dados estatísticos. A projeção da evolução destas variáveis e parâmetros, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, foi feita a partir da aplicação das taxas regionais de variação, ao longo do tempo, da narrativa do cenário A1F (IPC, 2000) para o continente Sul-Americano. Para os cenários CSEA admite-se que a eficiência no uso dos recursos hídricos, por parte dos setores usuário relatados na tabela 4.2, registradas atualmente, não mudará para as projeções futuras.

Por fim, observa-se que este cenário é uma conjectura dos efeitos regionais provocados por mudanças macro-econômicas e tecnológicas globais, uma vez que se supõe que o comportamento da evolução populacional e dos fatores econômicos será orientado segundo as projeções regionais da narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000) para o continente Sul-Americano.

4.3.3. DEMANDAS HÍDRICAS.

Os estudos setoriais de usos da água foram realizados para os setores usuários da indústria, lançamento de efluentes industriais, irrigação, pecuária, abastecimento público, lançamento de efluentes domésticos e geração de energia hidroelétrica, em cada uma das nove sub-bacias que compõe a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré.

Estes estudos dividem-se em duas etapas. A primeira etapa é a dos estudos prospectivos da evolução dos fatores intervenientes aos usos da água. A segunda etapa é a da projeção destes fatores intervenientes, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, segundo as narrativas dos cenários sócio-econômicos tendencial e alternativo.

Uma vez que toda a simulação do balanço hídrico foi efetuada em escala espacial de sub-bacia e para efeito de avaliação dos conflitos de demanda por água, entre setores usuários concorrentes e sub-bacias dispostas ao longo de um mesmo curso d'água principal, os resultados das demandas hídricas, tanto por captação como pelo lançamento de efluentes, foram agrupados de forma concentrada por sub-bacia.

Essa admissão fez-se necessário uma vez que a consideração das localizações exatas, das captações e pontos de lançamento de efluentes, implicaria em maior dificuldade e complexidade dos processos de simulação, principalmente quanto à análise da vazão alocada nos corpos fluviais receptores para a diluição de efluentes, uma vez que esta é função do perfil de oxigênio dissolvido que, por sua vez, varia em função do tempo e da distância ao ponto de lançamento.

Uma vez que a distribuição espacial dos municípios não concorda com os limites das sub-bacias do Tietê-Jacaré e em decorrência da adoção da escala espacial citada no parágrafo anterior, o critério adotado para o agrupamento por sub-bacia, das variáveis sócio-econômicas, parâmetros tecnológicos e resultados de projeções de demanda por água, foi o da localização geográfica das sedes municipais.

4.3.3.1. Abastecimento Público.

No âmbito deste trabalho de Dissertação, define-se abastecimento público como sendo aquele em que são atendidas as demandas por água das cidades, vilas, distritos e povoados no consumo doméstico, comercial, público, entre outros, que integrem a vida das aglomerações populacionais assim como das populações dispersas nas zonas rurais.

- ***Estudos Prospectivos.***

Os estudos prospectivos, dos fatores intervenientes ao uso dos recursos hídricos, para o abastecimento público, se detiveram na análise das variáveis sócio-econômicas e parâmetros tecnológicos listados na tabela 4.2. Os parágrafos subsequentes descrevem os valores adotados, para estas variáveis e parâmetros, e as respectivas fontes de dados.

Os estudos prospectivos de evolução histórica das populações urbanas e rurais, das nove sub-bacias que compõe a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, foram feitos com base nos dados do último censo demográfico do IBGE (2000), do relatório do CBH-TJ (2000) e do relatório estatístico do SEADE (1998). Todos os dados apurados de evolução das populações urbanas e rurais dos municípios que compõe a UGRHI do Tietê-Jacaré, para os anos de 1970, 1980, 1991, 1996 e 2000, encontram-se no anexo BA1. Todas as demais variáveis sócio-econômicas e parâmetros tecnológicos, intervenientes aos usos dos recursos hídricos para o abastecimento público, encontram-se no anexo BA2.

Com relação às parcelas das populações conectadas e não conectadas à rede pública de abastecimento foram feitas duas suposições. A primeira de que todas as populações urbanas estariam conectadas à rede pública de abastecimento. A segunda de que todas as populações rurais não estariam conectadas a rede pública de abastecimento.

Com relação ao consumo per-capita, das populações conectadas à rede pública de abastecimento, foram adotados os valores apurados pelo CBH-TJ (2000) em cada município. Para os municípios sem dados de consumo per-capita associou-se o valor de 230,9 litros/habitante.dia, correspondente à média dos consumos per-capita dos municípios com registros de consumo per-capita.

Para as populações rurais, não conectadas à rede pública de abastecimento, adotou-se como suposição de consumo per-capita, para os estudos desta Dissertação, o valor de 100 litros/habitante.dia (VBA, 1999). Embora a Organização Mundial da Saúde

(OMS) recomende um consumo per-capita mínimo de 50 litros/habitante.dia para as populações rurais (VBA, 1999), a percepção é de que o padrão de vida das comunidades rurais, da região ora em estudo, é mais elevado, tendo como consequência um maior consumo per-capita.

Para a eficiência dos sistemas de captação e distribuição d'água, adotaram-se os valores de perdas apurados pelo CBH-TJ (2000) em cada um dos municípios estudados. Para aqueles municípios sem dados, ou estimativas de perdas, dos sistemas de distribuição, associou-se o valor de 35,0%, equivalente à média dos municípios com dados.

- ***Demandas Segundo as Narrativas dos Cenários CSET e CSEA.***

Para a projeção das demandas futuras por água para o abastecimento público, segundo as narrativas dos cenários CSET e CSEA, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, foi executada a seqüência de passos dos parágrafos subseqüentes. Observa-se que todos os passos, abaixo relatados, são comuns às narrativas dos cenários CSET e CSEA, com exceção do padrão de evolução futuro do crescimento populacional.

Para o cenário CSET admite-se que o padrão de evolução do crescimento populacional futuro será igual ao padrão histórico. Para isto foram somados os dados populacionais urbanos e rurais, dos municípios componentes de suas respectivas sub-bacias, em cada ano recenseado pelo IBGE, e então ajustadas curvas polinomiais de tendência, pelo método dos mínimos quadrados, a estas seqüências de dados históricos. A partir dos dados do ano base de 2000, foram projetadas, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, os tamanhos das populações urbanas e rurais, das respectivas sub-bacias.

Para o cenário CSEA, admite-se que as populações urbanas e rurais irão evoluir segundo as taxas projetadas pela narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000) para o continente sul-americano. A projeção populacional, para a narrativa deste cenário, foi feita com base nos valores recenseados em 2000 pelo IBGE.

O cálculo das projeções de demanda bruta por água foi feito segundo os dados projetados das populações dos municípios e dos respectivos consumos per-capita e eficiências dos sistemas de captação e distribuição d'água. No âmbito deste trabalho de Dissertação define-se demanda bruta por água o montante captado no manancial considerando as perdas dos sistemas de captação e distribuição. O cálculo da demanda

bruta diária por água, para as populações urbanas, foi feito de acordo com a seguinte equação:

$$D_{urb} = (P_{urb} \times CPC_{urb}) / (1-PSD)) / 1000 \quad (46)$$

Na qual:

D_{urb} : demanda bruta diária por água pela população urbana (m^3 / dia).

P_{urb} : população urbana.

CPC_{urb} : consumo per-capita da população urbana (litros / habitante.dia)

PSD : perdas, no sistema de captação e distribuição (%).

O cálculo da demanda bruta diária por água, para as populações rurais, foi feito de acordo com a seguinte equação:

$$D_{rur} = (P_{rur} \times CPC_{rur}) / 1000 \quad (47)$$

Na qual:

D_{rur} : demanda bruta diária por água pela população rural (m^3 / dia).

P_{rur} : população rural.

CPC_{rur} : consumo per-capita da população rural (litros / habitante.dia)

No âmbito das simulações deste trabalho de Dissertação se supôs que os parâmetros tecnológicos, como o consumo per-capita e a eficiência dos sistemas de captação e distribuição de água, intervenientes à demanda por água para o abastecimento público, permanecerão os mesmos daqueles registrados nos estudos prospectivos.

4.3.3.2. Diluição de Efluentes Domésticos.

No âmbito desta Dissertação define-se a diluição de efluentes domésticos como sendo uma demanda por água em termos da vazão alocada, num corpo d'água fluvial, para a diluição das cargas poluidoras das águas servidas provenientes do abastecimento público. Também pode-se interpretar a vazão alocada para a diluição dos efluentes domésticos como sendo a vazão indisponível para outros usos (KELMAN, 1997). O cálculo da demanda para a diluição de efluentes domésticos foi feito em termos das estimativas de concentração de DBO_5 .

- *Estudos Prospectivos.*

Uma vez que a quantidade de efluentes domésticos é uma função direta da quantidade de água para o abastecimento público, foram levados em consideração, para este setor usuário, todos os dados prospectivos apurados para o abastecimento público. Portanto os estudos prospectivos, para a estimativa de demanda por água para a diluição de efluentes domésticos, se detiveram na análise das variáveis sócio-econômicas e parâmetros tecnológicos listados na tabela 4.2 para os setores do abastecimento público e diluição de efluentes domésticos. Os parágrafos subsequentes descrevem os valores adotados, para estas variáveis e parâmetros, e as respectivas fontes de dados.

Para o fator de correlação entre o volume d'água potável consumido e o volume de águas servidas lançadas nos corpos d'água superficiais adotou-se o valor médio teórico de 80% segundo recomendações de SPERLING (1995).

Para o percentual da população, conectada à rede pública de abastecimento, que tem seus esgotos coletados e tratados, usaram-se os valores apurados pelo CBH-TJ (2000).

Para a carga orgânica potencial per-capita do esgoto sanitário não tratado, usou-se o valor teórico médio de 54 g.DBO₅/habitante.dia, segundo recomendações de SPERLING (1995).

Para a eficiência dos processos de tratamento de esgotos se supôs um nível de tratamento secundário, segundo a classificação de SPERLING (1995), com um valor médio de 80% na remoção da carga orgânica, caracterizando a adoção de mecanismos biológicos de remoção dos poluentes através de lagoas de estabilização, lodos ativados, sistemas aeróbios e anaeróbios, práticas dominantes nos municípios da região, com algum tipo de tratamento de esgotos, segundo informações do CBH-TJ (2000).

Baseado em informações do relatório do CERH (1999), supôs-se que todos os corpos d'água fluviais, receptores dos esgotos domésticos, fossem da classe 3, segundo classificação da resolução n.º 20 do CONAMA, segundo a qual é aceitável uma concentração mínima de 4,0 mg/litro de oxigênio dissolvido e uma concentração máxima de 10,0 mg/litro de DBO₅ no corpo d'água receptor.

Os comprimentos dos corpos fluviais receptores de efluentes domésticos, foram levantados a partir da base cartográfica, da UGRHI do Tietê-Jacaré, elaborada pelo CBH-TJ (2000).

- *Demandas Segundo as Narrativas dos Cenários CSET e CSEA.*

As projeções de demanda por água, para a diluição de efluentes domésticos, segundo as narrativas dos cenários CSEA e CSET, foram feitas de acordo com os passos descritos nos parágrafos subseqüentes. As únicas diferenças entre as projeções destes dois cenários é o padrão de evolução das populações e os respectivos consumos de água para o abastecimento público. Uma vez que o volume de efluentes é diretamente proporcional ao volume de água para o abastecimento público, a demanda por recursos hídricos para a diluição de efluentes domésticos será diferente para cada cenário.

O cálculo das projeções de demanda por água, alocada nas correntes fluviais receptoras, em termos de vazão, para a diluição dos esgotos domésticos lançados, foi feito segundo os dados projetados das populações urbanas e respectivos componentes tecnológicos listados na tabela 4.2. Observa-se que este cálculo foi feito em termos da demanda bioquímica de oxigênio observada aos cinco dias (DBO_5) e somente para as populações urbanas uma vez que, se supõe, as populações rurais não têm seus efluentes coletados pelo sistema público de esgotamento sanitário e, portanto, estes não são lançados nos corpos fluviais.

O cálculo da estimativa da demanda por água para a diluição de efluentes domésticos é uma tarefa mais difícil uma vez que esta demanda não é consuntiva, ou seja, o recurso hídrico para atender esta demanda é alocado temporariamente. Esta afirmativa se deve ao fato de que o corpo fluvial, receptor da carga poluidora, consegue assimilar esta carga ao longo do tempo, ou ao longo do seu percurso de escoamento,

Figura 4.15: Curva de evolução dos níveis de oxigênio dissolvido, ao longo de um curso d'água, segundo o modelo de STREETER-PHELPS.

através de processos de autodepuração, recuperando o seu poder de diluição, ou vazão alocável, de novos efluentes.

Portanto, a vazão disponível para os outros usos, que é a diferença entre a vazão do curso d'água e a vazão alocada para a diluição dos efluentes domésticos, varia ao longo do percurso deste curso d'água. Este fenômeno pode ser ilustrado através da evolução da curva de deplecionamento de oxigênio dissolvido, que é um parâmetro importante na medição da atividade bacteriana que assimila as cargas orgânicas lançadas no corpo fluvial. A figura 4.14 ilustra uma curva característica, de evolução dos níveis de oxigênio dissolvido ao longo de um curso d'água, determinada pelo modelo de STREETER-PHELPS (apud SPERLING, 1995).

Para o cálculo da estimativa da vazão alocada para a diluição de efluentes de águas servidas, em escala de sub-bacia, foi necessário fazer duas hipóteses, uma vez que só foi possível estimar, nos estudos prospectivos, o montante total lançado de cargas poluidoras, nos corpos fluviais receptores, por sub-bacia, sem levar em consideração a localização dos pontos de lançamento destes efluentes dentro das sub-bacias analisadas.

A primeira hipótese adotada, para a estimativa da vazão alocada para a diluição de efluentes numa determinada sub-bacia, é a de que o montante lançado de cargas poluidoras fosse distribuído ao longo do pseudocomprimento do curso d'água fictício da

Figura 4.16: Esquema ilustrativo do Curso d'água fictício.

sub-bacia em análise. O curso d'água fictício, de uma determinada sub-bacia, é definido, no âmbito deste trabalho de dissertação, como sendo aquele em que o seu comprimento é igual à soma dos comprimentos de todos os cursos d'água da sub-bacia em análise. A equação 48 e a figura 4.15 ilustram esta definição:

$$L_{FICTICIO} = \sum_{I=1}^N L_I \quad (48)$$

Na qual:

$L_{FICTICIO}$: comprimento do curso d'água fictício.

N : número de cursos d'água de uma bacia hidrográfica.

I : indicador do curso d'água.

L_I : comprimento do curso d'água I .

O cálculo desta distribuição foi feito através da divisão da vazão total dos esgotos e da carga poluidora total, produzida na sub-bacia, pelo número de pontos de lançamento de efluentes da sub-bacia. Este número de pontos de lançamento de efluentes foi estimado com base em informações do CBH-TJ (2000). As equações 49 e 50 sintetizam as explicações deste parágrafo.

$$Q_{EFLUENTE,J} = Q_{TOTAL,EFLUENTES} / N_{PONTOS} \quad (49)$$

$$DBO5_{EFLUENTE,J} = DBO5_{TOTAL} \quad (50)$$

Na qual:

J : indicador do ponto de lançamento do efluente doméstico.

$Q_{EFLUENTE,J}$: vazão do efluente lançado no ponto J (m^3/s).

$DBO5_{EFLUENTE,J}$: concentração de DBO_5 do efluente lançado no ponto J (mg/litro).

$Q_{TOTAL,EFLUENTES}$: vazão total dos efluentes domésticos na sub-bacia em análise (m^3/s).

$DBO5_{TOTAL}$: concentração de DBO_5 de todos os efluentes lançados na sub-bacia em análise.

N_{PONTOS} : número de pontos de lançamento de efluentes na sub-bacia em análise.

A vazão total de efluentes, a carga e a concentração orgânica potencial dos efluentes domésticos produzidos nas sub-bacias e lançados nos respectivos corpos fluviais receptores, em termos da DBO_5 , foram calculadas segundo as equações 51, 52 e

53. As perdas por infiltração no sistema de coleta de esgotos, causadas por tubos e conexões defeituosas, foram ignoradas.

$$Q_{TOTAL.EFLUENTES} = ((P_{urb} \times CPC_{urb} \times R) / 1000) \times PEC \quad (51)$$

$$CDBO5_{dom} = (PCDBO5 \times P_{urb}) / N_{PONTOS} \quad (52)$$

$$DBO5_{TOTAL} = (CDBO5_{dom} / Q_{esg.dom.}) \times (1 - (E/100) \times PECT) \quad (53)$$

Na qual:

P_{urb} : população urbana.

CPC_{urb} : consumo per-capita de água da população urbana (litros / habitante.dia)

R : fator de correlação entre consumo d'água potável e lançamento de águas servidas

PEC : percentual dos esgotos domésticos que são coletados.

$CDBO5_{dom}$: carga doméstica de DBO_5 (gramas / dia)

$PCDBO5$: carga doméstica per-capita de DBO_5 (gramas / habitante.dia)

E : eficiência média dos processos de tratamento de esgotos.

$PECT$: percentual do esgoto coletado que é tratado.

A segunda hipótese adotada, para a estimativa da vazão alocada para a diluição de efluentes numa determinada sub-bacia, é a de que todos os pontos de lançamentos estão uniformemente distribuídos ao longo do comprimento do curso d'água fictício da sub-bacia em análise, ou seja, de que todos os lançamento das cargas poluidoras se dá de forma distribuída ao longo deste comprimento fictício.

Esta segunda hipótese é importante, para que se possa levar em consideração os efeitos de autodepuração e recuperação da vazão disponível para outros usos, ao longo do percursos de escoamento, e para que se leve em conta o efeito cumulativo, ao longo do curso d'água, das vazões alocadas para a diluição de efluentes. A figura 4.16 ilustra a metodologia explanada nestes últimos parágrafos.

O cálculo da vazão demandada ($Q_{DIL,J}$), do corpo fluvial receptor, para a diluição dos efluentes domésticos, no ponto de lançamento do efluente, foi feito através da seguinte equação de diluição obtida do manual do SIAGUA (SRH/MMA, 2000) e de KELMAN (1997):

$$Q_{DIL,J} = Q_{EFLUENTE,J} \times [(DBO5_{EFLUENTE,J} - DBO5_{MIST,J}) / (DBO5_{MIST,J} - DBO_{RIO})] \quad (54)$$

Na qual:

Figura 4.17: Esquema ilustrativo da evolução da vazão indisponível para outros usos, devido a diluição de efluentes domésticos, ao longo do Curso d'água fictício.

- $Q_{DIL.J}$: vazão de diluição do efluente alocada no corpo d'água fluvial receptor no ponto de lançamento J do efluente (m^3/s)
- $Q_{EFLUENTE.J}$: vazão do efluentes lançado no ponto J (m^3/s).
- $DBO5_{EFLUENTE.J}$: concentração de DBO_5 do efluente lançado no ponto J (mg/litro).
- $DBO5_{MIST.J}$: concentração de DBO_5 da mistura no ponto de lançamento J (mg/litro)
- DBO_{RIO} : concentração de DBO_5 do curso d'água antes do lançamento da carga poluidora (mg/litro).

Para a concentração da demanda bioquímica de oxigênio observada aos cinco dias (DBO_{RIO}) antes do lançamento da carga poluidora, adotou-se o valor teórico de 2,0 mg/litro, para rios limpos, segundo SPERLING (1995). Uma vez que se estipulou que a classe dos corpos fluviais receptores, das sub-bacias em análise, fossem do tipo 3, segundo a classificação da resolução n.º 20 do CONAMA, adotou-se o valor de 10,0 mg/litro para a concentração de demanda bioquímica de oxigênio da mistura ($DBO5_{MIST.J}$).

Cabe ressaltar que a vazão de diluição ($Q_{DIL.J}$) somada com a vazão de lançamento ($Q_{EFLUENTE.J}$) resulta numa vazão indisponível ($Q_{IND.J}$), para qualquer outro uso, no ponto de lançamento do efluente. A equação abaixo sintetiza a afirmação deste parágrafo:

$$Q_{IND,J} = Q_{DIL,J} + Q_{EFLUENTE,J} \quad (55)$$

O cálculo da vazão indisponível ($Q_{IND,J+1}$), do corpo fluvial receptor, para a diluição de novas cargas de DBO₅ e qualquer outro uso, no ponto de lançamento de jusante, foi feito através da seguinte equação obtida do manual do SIAGUA (SRH/MMA, 2000) e de KELMAN (1997):

$$Q_{IND,J+1} = (Q_{IND,J}) \times e^{-K.T} + Q_{DIL,J+1} + Q_{EFLUENTE,J+1} \quad (56)$$

$$T = (V_{MÉDIA} / D_{TOTAL}) / 86.400 \quad (57)$$

Na qual:

$Q_{IND,N+1}$: vazão indisponível para a diluição para qualquer tipo de uso no ponto N+1 (m^3/s)

$Q_{DIL,J+1}$: vazão de diluição alocada no corpo d'água fluvial receptor no ponto de lançamento N+1 do efluente (m^3/s)

$Q_{EFLUENTE,J+1}$: vazão do efluentes lançado no ponto N+1 (m^3/s).

K : coeficiente de desoxigenação (dia^{-1}).

T : tempo de percurso (em dias) de um ponto de lançamento ao outro.

$V_{MÉDIA}$: Velocidade média dos cursos d'água da sub-bacia em análise (m/s).

D_{TOTAL} : Distância entre dois pontos de lançamento de efluentes (m)

Para o cálculo do tempo de percurso de um ponto de lançamento ao outro, adotou-se a hipótese de que a velocidade média, no curso d'água fictício, fosse igual a 1 m/s. Na impossibilidade de se efetuar testes de laboratórios, foi adotado o valor de 0,38 dia^{-1} para o coeficiente de desoxigenação segundo recomendações de SPERLING (1995).

Uma vez que, de acordo com a segunda hipótese, há uma seqüência de pontos de lançamento de efluentes ao longo do comprimento fictício, ocorrerá uma sobreposição de vazões indisponíveis à outros usos. O objetivo então é avaliar esta sobreposição de vazões, em cada ponto de lançamento, e determinar, então, a máxima vazão acumulada indisponível na sub-bacia. É este valor máximo, da vazão indisponível acumulada, que foi definido como sendo a demanda para a diluição de efluentes na sub-bacia em análise. A figura 4.17 ilustra a explanação deste parágrafo.

No âmbito das simulações deste trabalho de Dissertação adotou-se a hipótese de que os parâmetros tecnológicos, intervenientes à demanda por água para a diluição de efluentes domésticos, permanecerão os mesmos, daqueles registrados nos estudos prospectivos, para as estimativas futuras.

4.3.3.3. Agricultura Irrigada.

- ***Estudos Prospectivos.***

Os estudos prospectivos, dos fatores intervenientes ao uso dos recursos hídricos, pelo setor da agricultura irrigada, se detiveram na análise das variáveis econômicas e parâmetros tecnológicos relatados na tabela 4.2. No processo de coleta de informações, dos fatores intervenientes, não foram encontradas coleções completas de dados acerca dos tipos de culturas irrigadas na região, dos tipos de sistemas de irrigação, dos usos intensivos de água por estas culturas irrigadas e dos períodos de cultivo e colheita destas culturas. Foram somente encontrados dados de áreas irrigadas e não irrigadas a partir do censo agropecuário quinquenal do IBGE (1996). Para o uso intensivo de água para a irrigação (*UIM*), foi adotado nas simulações o valor médio anual de 0,327 litros/segundo.hectare, obtido a partir do relatório de situação do recursos hídricos do estado de São Paulo (CERH, 1999).

Uma vez que não há uma coleção completa de informações acerca dos tipos de culturas irrigadas na região e das datas de plantio e cultivo, o comportamento sazonal do uso da água pela irrigação não pode ser avaliado em termos da relação entre precipitação e evapotranspiração potencial da cultura irrigada. Portanto, o caráter sazonal desta atividade, que na região ora em estudo exerce uma demanda maior de recursos hídricos entre os meses de maio a setembro, foi estimado, nas simulações, através da metodologia do programa CROPWAT (FAO, 1992) que estipula uma sequência de fases e coeficientes de demanda que variam de acordo com a fase de desenvolvimento das culturas (ver ANEXO-MDSA – Manual do Usuário). Portanto, uma vez que há predomínio da atividade sucro-alcooleira na região ora em estudo, a sazonalidade inferida, para todas as atividades de irrigação na região, foi a mesma da do setor supramencionado, como segue:

$$Peso_I = DI_I \div DM \quad (58)$$

$$DM = \left(\sum_{I=1}^{I=12} DI_I \right) \div 12 \quad (59)$$

$$DI_I = ETPM_I \times KC_{I,F} - PM_I \quad (60)$$

$$UI_I = Peso_I \times UIM$$

Na qual:

- I:* índice indicativo do mês (ex: $I=1$ para janeiro, ..., $I=12$ para dezembro)
- UI_I:* uso intensivo de água para a irrigação no mês *I* (litros/segundo.hectare)
- UIM:* uso intensivo médio de água para a irrigação (litros/segundo.hectare).
- DI_I:* demanda consuntiva intensiva média no mês *I*. (mm/mês)
- DM:* média das demandas consuntivas intensivas médias (mm/mês).
- ETPM_I:* evapotranspiração média mensal no mês *I* (mm/mês).
- PM_I:* precipitação média mensal (mm/mês).
- KC_I:* coeficiente da cultura irrigada (ver anexo MDSA – Manual do Usuário).

Os dados de precipitação média mensal (PM_I) foram obtidos a partir dos registros da estação do CHREA/USP (2005) no ano de 2000 e os dados de evapotranspiração potencial obtidos do Boletim Agrometeorológico da EMBRAPA (2005). Os dados dos coeficientes da cultura irrigada (KC_I) foram obtidos de FAO (1992).

- ***Demandas Segundo as Narrativas dos Cenários CSET e CSEA.***

Como base de valores, para as projeções futuras de demanda por água pelo setor da irrigação segundo as narrativas dos cenários CSET e CSEA, foram adotados os do último censo agropecuário (IBGE, 1996) e o consumo intensivo médio anual de 0,327 litros/segundo.hectare (CERH, 1999).

Como padrões de evolução das áreas irrigadas, das sub-bacias do Tietê-Jacaré, para as projeções do cenário CSET, adotaram-se os mesmos padrões históricos, de evolução das populações das sub-bacias, inferidos segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.1. Portanto, supõe-se que haja uma relação direta entre o crescimento populacional e o crescimento da economia agrícola. Essa suposição foi necessária uma vez que, em estudos prospectivos, os registros históricos de evolução das áreas irrigadas

na região são falhos, pois os censos agropecuários do IBGE são quinquenais e os censos anteriores ao último, do ano de 1996, não têm registros das áreas irrigadas de vários municípios da região ora em estudo. Para a narrativa do cenário CSEA, se supõe que as áreas irrigadas irão evoluir segundo as taxas futuras projetadas da produção agrícola, no continente sul-americano, pelo IPCC (2000) para a narrativa do cenário de referência A1F.

Para a inferência do comportamento sazonal, da atividade da irrigação, multiplicou-se a taxa de consumo intensivo médio mensal pelo coeficiente 2,5, nos três meses de maior escassez relativa de chuvas, e pelo coeficiente de 0,5, nos 9 meses de maior abundância relativa de chuvas, segundo a metodologia adotada no plano Nacional de Recursos Hídricos (SRH/MMA, 2003), de tal forma que o consumo anual total permanecesse o mesmo. Os meses de maior escassez de chuvas e os meses de maior abundância de chuvas foram escolhidos segundo os resultados dos estudos prospectivos da sazonalidade do regime histórico de precipitações.

4.3.3.4. Pecuária.

- ***Estudos Prospectivos.***

Os estudos prospectivos, dos fatores intervenientes ao uso dos recursos hídricos, pelo setor da pecuária, se detiveram na análise das variáveis econômicas e parâmetros tecnológicos relatados na tabela 5.1. Nestes estudos foram encontrados dados acerca das espécies e das populações dos rebanhos no censo agropecuário quinquenal do IBGE (1996). Para os consumos per-capita, das espécies de rebanhos, foram adotados os valores obtidos de HAUSCHILD e DOELL (2000) e EMBRAPA (1984). A tabela 4.3 relaciona os consumos per-capita das principais espécies de rebanho.

- ***Demandas Segundo as Narrativas dos Cenários CSET e CSEA.***

Para a projeção de demanda por água pelo setor da pecuária, para as narrativas dos cenários CSET e CSEA, foram tomados, como base de valores, os registros do censo agropecuário quinquenal do IBGE (1996) e os consumos per-capita registrados por EMBRAPA (1984) e HAUSCHILD e DOELL (2000).

Tabela 4.3: Taxas de consumo per-capita das principais espécies de rebanhos.

Espécie Animal	Consumo Per-Capita (litros/dia)
Bovinos	68,0
Suínos	11,0
Equinos	54,5
Caprinos	8,5
Galináceos	0,3

(fontes: EMBRAPA, 1984 e HAUSCHILD, 2000)

Para o padrão de evolução das populações dos rebanhos, segundo as projeções do cenário CSET, também foram adotados os mesmos padrões históricos de evolução das populações humanas das sub-bacias, cabendo, neste caso, as mesmas considerações e suposições quanto ao setor da agricultura irrigada.

Para a narrativa do cenário CSEA, se supõe que as populações de rebanhos irão evoluir, segundo as taxas projetadas de produção animal, no continente sul-americano, pelo IPCC (2000) para a narrativa do cenário de referência A1F.

Para o consumo per-capita dos rebanhos, adotou-se a suposição de que o mesmo permaneça constante ao longo do tempo, ou seja, que não haverá melhorias da eficiência no uso dos recursos hídricos. Somente foram feitas simulações das demandas dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos por premência de dados das outras espécies de rebanhos.

4.3.3.5. Indústria e Diluição de Efluentes Industriais.

- ***Estudos Prospectivos.***

Os estudos prospectivos, dos fatores intervenientes ao uso dos recursos hídricos, pelo setor da indústria e dos respectivos lançamentos de cargas poluidoras nos corpos d'água fluviais, se detiveram na análise das variáveis econômicas e parâmetros tecnológicos relatados na tabela 4.2.

Como base de informações, dos tipos e quantidades de plantas industriais e respectivos parâmetros de consumos d'água e efluentes de cargas poluidoras, para as projeções de demanda por água para este setor, foram usados o cadastro de consumidores industriais e o inventário de efluentes industriais elaborado pelo CBH-TJ (2000). Observa-se que só foram consideradas, nas simulações de demanda por água para a diluição de efluentes, as cargas orgânicas, que têm como parâmetro característico

a concentração de DBO_5 , uma vez que não há registros dos parâmetros característicos da poluição provocada pelos dejetos inorgânicos. O anexo BD1 relaciona todas as indústrias e dados apurados dos parâmetros intervenientes ao consumo d'água e respectivos lançamentos de efluentes.

Adotou-se a hipótese de que o fator de correlação, entre a vazão de águas captadas para o consumo da produção industrial e a vazão de águas servidas lançadas nos corpos fluviais, seja igual a um, ou seja, que toda o volume consumido seja lançado, após o processamento industrial, nos corpos fluviais.

- ***Demandas Segundo as Narrativas dos Cenários CSET e CSEA.***

Para as projeções futuras de demanda por água, segundo a narrativa do cenário CSET, para o abastecimento das atividades industriais e diluição das respectivas cargas poluidoras, foram tomados como padrões de evolução, da atividade industrial, aqueles adotados para a evolução das populações humanas das sub-bacias, inferidos segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.1. Portanto, foi feita a suposição de que haja uma relação direta entre o crescimento populacional e o crescimento da atividade industrial evidenciando uma conjuntura de desenvolvimento econômico eminentemente regional.

Para as projeções futuras de demanda por água, segundo a narrativa do cenário CSEA, foram tomados como padrões de evolução, da atividade industrial, os padrões de evolução regional, previsto pela narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000) para o continente sul-americano, em termos da contribuição da atividade à formação do produto nacional bruto (PNB) (MOURA, 2003).

Para o consumo de água e a produção de dejetos orgânicos foram feitas as suposições de que haja uma relação direta com a evolução da produção industrial, ou seja, que estes dois parâmetros irão crescer às mesmas taxas de crescimento da produção industrial. As projeções de demanda por água, alocada nos corpos fluviais receptores, em decorrência do lançamento de efluentes orgânicos industriais, foram realizadas segundo a mesma metodologia adotada para a diluição dos esgotos domésticos.

4.3. CENÁRIOS DE BALANÇOS HÍDRICOS.

Uma vez definidos os cenários de disponibilidade hídrica superficial, segundo os cenários climáticos CCA e CCT, e os cenários de demanda hídrica, segundo os cenários sócio-econômicos CSET e CSEA, o objetivo principal deste trabalho de Dissertação é alcançado quando da combinação destes cenários para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050. A tabela 4.4 ilustra como foram combinados os cenários sócio-econômicos com os cenários climáticos para compor os cenários A e B.

Observa-se que os cenários sócio-econômicos, representativos das demandas hídricas consuntivas e não consuntivas, são uma conjectura da demanda total dos recursos hídricos, sem levar em consideração o tipo de manancial supridor desta demanda. Portanto, a parcela da demanda consuntiva que é suprida por mananciais subterrâneos, foi suprimida da demanda consuntiva total, para se chegar a uma estimativa da demanda consuntiva suprida pelos mananciais superficiais. Toda a demanda não consuntiva, representativa neste trabalho de Dissertação para a alocação temporária de recursos hídricos para a diluição de efluentes, foi projetada sobre os mananciais de superfície.

Tabela 4.4: Composição dos Cenários I, II, III e IV.

Cenários	CSET	CSEA
CCT	A	
CCA		B

O CBH-TJ (2000), em seu relatório de diagnóstico da situação dos recursos hídricos na UGRHI do Tietê-Jacaré, apurou e estimou os percentuais das demandas setoriais supridos por mananciais subterrâneos e superficiais. Nas conjecturas dos cenários de balanços hídricos, estes mesmos percentuais foram usados para o cômputo das estimativas das demandas consuntivas por recursos hídricos dispostos em mananciais de superfície. Por fim, as simulações dos cenários de balanços hídricos foram realizadas para os períodos de tempo, com duração de três anos, que contivessem os anos horizontes e os anos imediatamente anterior e posterior a estes anos horizontes.

A análise comparativa entre oferta hídrica e demanda hídrica será efetuada na condição crítica, ou seja, nos períodos de estiagem quando, em decorrência de uma menor quantidade de chuvas, a vazão disponível para o consumo é mínima e a pressão sobre os recursos hídricos é maior devido a atividade da irrigação.

A grayscale photograph of a cloudy sky. A large, dark, textured cloud mass dominates the center-right of the frame. To its left, a bright, glowing light source, possibly the sun or moon, is partially obscured by the cloud's edge, creating a strong backlighting effect and illuminating the surrounding clouds. The sky is filled with various cloud formations, some appearing as wispy streaks and others as denser patches. The overall tone is dramatic and atmospheric.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

5.1. SÉRIES SINTÉTICAS DE PRECIPITAÇÕES.

Este item apresenta os resultados das gerações das séries sintéticas de precipitação média diária, para os horizontes de tempo de 2010, 2025 e 2050, nas nove sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo as narrativas dos cenários climáticos CCT e CCA.

Para o cenário CCT apenas a tendência e a sazonalidade, apuradas nos estudos prospectivos das séries históricas, foram propagadas para as séries sintéticas futuras de precipitação. Para o cenário CCA foram aplicadas taxas de variação da precipitação, às séries sintéticas futuras de precipitação, resultantes da variação regional da temperatura em decorrência da mudança climática global projetada segundo a narrativa do cenário de referência A1F (IPCC, 2000). Estas variações sazonais de temperatura foram obtidas através de simulações com o modelo climático UDCM.

Segundo estas simulações a temperatura média, para a região sudeste do Brasil, deverá aumentar em 0,9°C até 2010, 1,4°C até 2025 e 2,9°C até 2050, a partir dos valores registrados no ano de 2000. A figura 5.1 ilustra a variação da temperatura no Brasil, apontada pelo modelo UDCM, segundo a narrativa do cenário A1F. A figura 5.2 ilustra os resultados obtidos, a partir de simulações com o modelo UDCM, das variações sazonais absolutas nas temperaturas médias mensais, para a região sudeste do Brasil, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, a partir do ano base de 2000. Considerou-se para as 9 sub-bacias as mesmas variações mensais de temperatura, projetadas para região sudeste do Brasil pelo modelo UDCM, uma vez que a escala geográfica do mesmo é mais abrangente do que as áreas destas sub-bacias.

Para a estimativa da variação do regime de precipitação, em decorrência da projeção de aumento da temperatura foram calculadas as variações absolutas da umidade relativa do ar (UR) e tensão saturante do vapor d'água (Es), para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, tomando como base os registros do ano 2000.

Considerou-se que, até o ano de 2050, não haverá mudança significativa da tensão do vapor d'água permanecendo constantes, ao longo do tempo, os valores mensais registrados pela estação climatológica CRHEA/USP no ano de 2000.

Figura 5.1: Aumento da temperatura média, sobre o Brasil, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (Fonte: Adaptado de IMAGE 2.2).

Figura 5.2: Aumento da temperatura média, sobre a região da bacia do Tietê-Jacaré, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (Fonte: Adaptado de UDCM).

Para o cálculo das variações absolutas da umidade relativa do ar (UR) e tensão saturante do vapor d'água (Es), foram usadas como variações absolutas das temperaturas médias mensais aquelas resultantes das simulações do modelo UDCM (ver figura 5.2) e como base os valores registrados pela estação climatológica do CRHEA/USP em 2000. A tabela 5.1 relaciona os valores médios mensais de

temperatura registrados pela estação do CRHEA/USP no ano de 2000 e os valores projetados para os anos horizontes. A tabela 5.2 relaciona os valores e as variações absolutas, das tensões saturantes de vapor d'água e umidades relativas médias mensais, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 tomando como base os valores do ano de 2000.

Para a estimativa da precipitação foi construída uma relação empírica entre a umidade relativa média mensal e a precipitação mensal a partir de dados registrados, pela estação climatológica do CHREA/USP, no período de 1973 a 2003, e através do ajuste de uma equação polinomial de terceiro grau aos dados observados. A relação dos dados de umidade relativa do ar e precipitação utilizados encontram-se no anexo A4. A figura 5.3 ilustra a curva da equação polinomial ajustada.

As variações absolutas, das precipitações diárias médias por mês, calculadas a partir da equação 17, e tomando como base os valores mensais de precipitação registrados no ano de 2000, pela estação climatológica do CRHEA/USP, estão relacionados na tabela 5.3 e ilustrados na figura 5.4. As variações absolutas das médias diárias de precipitação foram calculadas a partir da divisão das variações mensais pelos respectivos números de dias de cada mês.

Tabela 5.1: Valores médios mensais de temperatura para o ano de 2000 e projeções de temperatura para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (Fonte de dados do ano 2000: CRHEA/USP, 2005).

Mês	Temperatura (°C)			
	2000	2010	2025	2050
Janeiro	22,80 °C	23,75 °C	24,29 °C	25,93 °C
Fevereiro	21,80 °C	22,73 °C	23,23 °C	24,81 °C
Março	21,50 °C	22,41 °C	22,96 °C	24,38 °C
Abril	22,20 °C	23,09 °C	23,50 °C	24,96 °C
Maio	19,40 °C	20,24 °C	20,64 °C	21,91 °C
Junho	19,30 °C	20,16 °C	20,60 °C	21,93 °C
Julho	17,10 °C	17,96 °C	18,34 °C	19,61 °C
Agosto	19,30 °C	20,16 °C	20,54 °C	21,81 °C
Setembro	21,40 °C	22,29 °C	22,89 °C	24,16 °C
Outubro	22,30 °C	23,25 °C	24,04 °C	25,43 °C
Novembro	23,80 °C	24,75 °C	25,41 °C	26,81 °C
Dezembro	23,00 °C	23,91 °C	24,36 °C	25,76 °C
MÉDIA	21,16 °C	22,06 °C	22,57 °C	23,96 °C

(Fonte de dados do ano 2000: CRHEA/SUP, 2005)

Figura 5.3: Curva ajustada da relação empírica entre precipitação mensal e umidade relativa média mensal.

Tabela 5.3: Variações absolutas das precipitações médias mensais para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, com relação aos valores registrados em 2000.

Ano	2010	2025	2050
Mês	ΔP dia	ΔP dia	ΔP dia
Janeiro	-1,37mm	-1,95mm	-3,08mm
Fevereiro	-0,98mm	-1,36mm	-2,13mm
Março	-0,93mm	-1,33mm	-2,01mm
Abril	-0,21mm	-0,27mm	-0,37mm
Maio	-0,02mm	-0,02mm	+0,01mm
Junho	-0,02mm	-0,04mm	-0,13mm
Julho	-0,08mm	-0,12mm	-0,29mm
Agosto	-0,14mm	-0,20mm	-0,44mm
Setembro	-0,09mm	-0,17mm	-0,35mm
Outubro	-0,01mm	-0,04mm	-0,13mm
Novembro	-0,09mm	-0,12mm	-0,11mm
Dezembro	-0,95mm	-1,30mm	-2,03mm
MÉDIA	-0,41 mm	-0,58 mm	-0,92 mm

Tabela 5.2: Relação de valores e variações absolutas, das tensões saturantes de vapor d'água (Pa) e umidades relativas médias mensais (%), para o ano base de 2000 e os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050.

Ano		Mês											
		Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
2000	Es(Pa)	2832	2613	2565	2677	2253	2240	1950	2240	2550	2693	2949	2810
	UR(%)	73,18	69,49	69,08	57,5	50,2	35,1	30,4	25,8	29,4	36,2	53,7	69,4
2010	Es(Pa)	2913	2765	2712	2826	2373	2361	2058	2361	2692	2853	3122	2969
	Δ Es(Pa)	164	152	147	149	120	122	108	122	143	160	173	159
	UR(%)	69,1	65,7	65,3	54,5	47,7	33,3	28,8	24,5	27,8	34,2	50,7	65,7
	Δ UR(%)	-4,1	-3,8	-3,7	-3,0	-2,5	-1,8	-1,6	-1,3	-1,5	-2,0	-3,0	-3,8
2025	Es(Pa)	3037	2850	2804	2896	2433	2427	2109	2418	2791	2992	3247	3050
	Δ Es(Pa)	261	237	238	219	180	188	159	179	242	298	298	240
	UR(%)	66,9	63,7	63,2	53,2	46,5	32,4	28,1	23,8	26,8	32,6	48,8	64,0
	Δ UR(%)	-6,3	-5,8	-5,9	-4,4	-3,7	-2,7	-2,3	-1,9	-2,6	-3,6	-4,9	-5,5
2050	Es(Pa)	3349	3133	3053	3161	2630	2633	2283	2614	3013	3251	3527	3315
	Δ Es(Pa)	572	520	488	484	376	394	332	375	464	557	578	505
	UR(%)	60,7	58,0	58,0	48,8	43,0	29,9	26,0	22,1	24,8	30,0	44,9	58,9
	Δ UR(%)	-12,5	-11,5	-11,0	-8,82	-7,19	-5,25	-4,4	-3,7	-4,5	-6,2	-8,79	-10,5

Figura 5.4: Variações das precipitações médias diárias, por mês, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, com relação aos valores médios registrados em 2000.

Observa-se que, segundo as simulações, até o ano de 2010 o valor médio da precipitação diária deverá diminuir -0,41 mm, com relação ao registrado em 2000, ou seja, nestes dez anos haverá uma diminuição projetada da precipitação média mensal a uma taxa anual de -1,26 mm. Até o ano de 2025 a projeção é de diminuição da precipitação média diária em -0,58 mm, com relação ao valor médio registrado em 2000. Até o ano de 2050 a projeção é de diminuição da precipitação média diária em -0,92 mm, com relação ao valor médio registrado em 2000.

Por fim, com relação à diminuição das precipitações médias diárias (ver tabela 5.3 e figura 5.4), calculadas pela metodologia adotada neste trabalho de Dissertação, observa-se que estas correspondem às projeções de redução das precipitações médias diárias apontadas pelas simulações do modelo UDCM para a região Sudeste. A tabela 5.4 compara os valores obtidos através da metodologia adotada neste trabalho de Dissertação com os valores provenientes das simulações do UDCM. A figura 5.5 ilustra a variação nas precipitações médias diárias, sobre o Brasil, apontadas pelas simulações do modelo UDCM.

Tabela 5.4: Comparação entre as variações absolutas das precipitações médias diárias calculadas pela metodologia da Dissertação e das projeções das simulações do modelo UDCM.

Ano Horizonte	ΔP diária	
	Metodologia Adotada	Modelo UDCM
2010	-0,41 mm	-0,10 mm
2025	-0,58 mm	-0,35 mm
2050	-0,92 mm	-0,57 mm

Figura 5.5: Diminuição da precipitação média diária, sobre o Brasil, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (Fonte: Adaptado de IMAGE 2.2).

5.1.1 Análises das Séries Históricas

O primeiro passo para a geração das séries sintéticas de precipitação média diária, sobre as sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, foi o da análise estatística das séries históricas de precipitações. Em cada uma das sub-bacias foram feitos estudos prospectivos dos registros históricos de precipitação diária de várias estações pluviométricas e, então, calculadas as médias diárias sobre cada sub-bacia. O tamanho dos registros históricos analisados é de dez anos. Os períodos históricos, em que estes registros foram analisados, variam de sub-bacia para sub-bacia em função da disponibilidade de dados e do número de estações pluviométricas com registros num mesmo período.

A tabela 5.5 relaciona os períodos históricos analisados, em cada sub-bacia, e as precipitações médias diárias, mensais e anuais, estimadas nos respectivos períodos. Para

Tabela 5.5: Períodos históricos analisados, em cada sub-bacia, e respectivas precipitações médias diárias, mensais e anuais.

Sub-Bacia	Período Histórico	Precipitação Média (mm)		
		Diária	Mensal	Anual
Tietê/Claro	Jan/1990 a Dez/1999	3,60 mm	112,6 mm	1.351,0 mm
Tietê/Lençóis	Jan/1961 a Dez/1970	3,22 mm	99,9 mm	1.299,2 mm
Bauru	Jan/1990 a Dez/1999	3,88 mm	120,4 mm	1.445,0 mm
Baixo Jacaré-Guaçu	Jan/1995 a Dez/2004	3,68 mm	114,0 mm	1.367,9 mm
Médio Jacaré-Guaçu	Jan/1990 a Dez/1999	4,21 mm	130,4 mm	1.564,9 mm
Alto Jacaré-Guaçu	Jan/1995 a Dez/2004	3,82 mm	118,4 mm	1.420,6 mm
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	Jan/1990 a Dez/1999	4,03 mm	125,0 mm	1.600,6 mm
Alto Jacaré-Pepira	Jan/1990 a Dez/1999	3,54 mm	109,8 mm	1.317,3 mm
Jaú	Jan/1990 a Dez/1999	3,84 mm	119,0 mm	1.427,5 mm

a maioria das sub-bacias foi considerado o período histórico entre janeiro de 1990 e dezembro de 1999, devido à maior disponibilidade de registros junto ao SIGRH (2005). Constatou-se que os dados relacionados na tabela 5.5 estão dentro da faixa de variação espacial de precipitações, sobre a bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, de 1.200 mm a 1.600 mm por ano, observada por SANT'ANNA NETO (1995).

Para a análise da sazonalidade, das séries históricas de precipitações, foi usado o método das Funções Harmônicas de Fourier. Constatou-se que, para as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, como na maior parte do estado de São Paulo, o período mais chuvoso vai de outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso de dezembro a fevereiro. Estes resultados conferem com a afirmação do CBH-TJ (2000) de que no período mais seco a precipitação média mensal é inferior a 30 mm. A figura 5.6 ilustra a sazonalidade estimada do regime de precipitação, sobre as sub-bacias do Alto Jacaré-Guaçu, no período histórico relacionado na tabela 5.5. As demais figuras, ilustrativas da estimativa de sazonalidade das outras sub-bacias, encontram-se no anexo A3.

Para a análise da tendência, das séries históricas de precipitações, foi usado o método da Regressão Linear Simples. Constatou-se que, para a maioria das sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, houve uma diminuição nas precipitações médias nos períodos históricos analisados. A tabela 5.6 relaciona as diminuições ocorridas nas precipitações médias mensais, apuradas segundo as linhas de tendências inferidas, nos períodos históricos analisados sobre as nove sub-bacias.

Figura 5.6: Sazonalidade do Regime Histórico de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçú.

Tabela 5.6: Variação das precipitações médias mensais, das sub-bacias do Tietê-Jacaré, apuradas nos períodos históricos analisados.

Sub-Bacia	Período Histórico	Variação na Precipitação Média Mensal
Tietê/Claro	Jan/1990 a Dez/1999	- 8,14 mm
Tietê/Lençóis	Jan/1961 a Dez/1970	- 31,16 mm
Bauru	Jan/1990 a Dez/1999	- 18,22 mm
Baixo Jacaré-Guaçú	Jan/1995 a Dez/2004	+ 3,29 mm
Médio Jacaré-Guaçú	Jan/1990 a Dez/1999	- 47,7 mm
Alto Jacaré-Guaçú	Jan/1995 a Dez/2004	- 37,84 mm
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	Jan/1990 a Dez/1999	- 14,08 mm
Alto Jacaré-Pepira	Jan/1990 a Dez/1999	- 52,55 mm
Jaú	Jan/1990 a Dez/1999	- 13,22 mm

A relação de postos pluviométricos, considerados na análise das séries históricas, está no anexo A2. A figura 5.7 ilustra a série histórica de precipitações médias mensais, sobre as sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú. Os demais gráficos, das outras sub-bacias, encontram-se no anexo A2.

Figura 5.7: Série histórica de precipitações médias mensais, sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, para o período histórico de janeiro de 1995 a dezembro de 2004.

Para a análise da distribuição de frequências, das precipitações diárias médias históricas, de cada sub-bacia, foram construídos histogramas de frequência e calculados os coeficientes de assimetria e curtose. Esta análise foi necessária para se avaliar a distribuição teórica de probabilidades que melhor se ajustava à distribuição de frequência observada. A figura 5.8 ilustra o histograma de frequência das precipitações médias históricas sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu. Os histogramas das demais bacias encontram-se no anexo A3. A tabela 5.7 relaciona os coeficientes de assimetria e curtose apurados nas séries históricas de precipitações médias mensais.

Observa-se que, por inspeção visual dos histogramas de frequências e pelos resultados dos coeficientes de assimetria e curtose, segundo critérios de KOTTEGODA (1980), nenhuma das precipitações médias mensais históricas se assemelha à distribuição normal de probabilidades. Uma vez que os números aleatórios, gerados para o modelo ARMA(1,1), são normalmente distribuídos e padronizados, fez-se necessário normalizar as séries históricas através do modelo de BOX-COX.

A figura 5.9 ilustra o histograma de frequências da série histórica de precipitações médias mensais normalizadas pelo modelo de BOX-COX. A tabela 5.8 relaciona os coeficientes de assimetria e curtose para as séries históricas normalizadas.

Figura 5.8: Histograma de frequências das precipitações médias mensais históricas da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu.

Tabela 5.7: Coeficientes de Assimetria e Curtose das Séries Históricas de Precipitações Médias Mensais.

Sub-Bacia	Coeficiente de Assimetria	Coeficiente de Curtose
Tietê/Claro	1,3454	2,4949
Tietê/Lençóis	1,0870	0,9350
Bauru	0,8061	0,3725
Baixo Jacaré-Guaçu	1,6608	4,7328
Médio Jacaré-Guaçu	1,0566	0,9164
Alto Jacaré-Guaçu	1,2259	1,2280
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1,1691	1,2636
Alto Jacaré-Pepira	1,5442	3,3078
Jaú	1,1460	1,3679

Observa-se, por inspeção visual dos histogramas de frequências e pelos resultados da tabela 5.8, que estes se assemelham à distribuição normal de probabilidades. As séries sintéticas futuras de precipitação, para as narrativas dos cenários CCT e CCA, foram geradas a partir das séries históricas padronizadas e normalizadas pelo método de BOX-COX. Após a geração, com o modelo ARMA(1,1), foi aplicada a forma inversa do modelo de BOX-COX para a remoção do padrão normal de distribuição de frequências.

Figura 5.9: Histograma de frequências das precipitações médias mensais históricas normalizadas pelo método de BOX-COX, da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú.

Tabela 5.8: Coeficientes de Assimetria e Curtose das Séries Históricas de Precipitações Médias Mensais Normalizadas pelo modelo de BOX-COX.

Sub-Bacia	Coeficiente de Assimetria	Coeficiente de Curtose
Tietê/Claro	0,2757	0,5686
Tietê/Lençóis	0,0410	1,1385
Bauru	0,4063	0,4949
Baixo Jacaré-Guaçú	0,0250	0,3110
Médio Jacaré-Guaçú	0,2270	0,8873
Alto Jacaré-Guaçú	0,0061	1,0617
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	0,2181	0,6227
Alto Jacaré-Pepira	0,1393	0,4797
Jaú	0,3133	0,4934

5.1.2 Séries Sintéticas Geradas para o Cenário CCT.

Este subitem apresenta os resultados das gerações das séries sintéticas de precipitação, segundo a narrativa do cenário climático tendencial CCT. A tendência e sazonalidade, observadas na série histórica, foram propagadas para as séries sintéticas futuras que contém os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050.

As figuras de 5.10 a 5.12 ilustram as séries sintéticas geradas para os períodos de janeiro de 2005 a dezembro de 2014 (contendo o ano horizonte de 2010), janeiro de

2020 a dezembro de 2029 (contendo o ano horizonte de 2025) e janeiro de 2045 a dezembro de 2054 (contendo o ano horizonte de 2050), sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu. Constatou-se pequenas diminuições, de um período simulado para o outro, nas precipitações médias anuais dos períodos simulados em todas as sub-bacias. A tabela 5.9 relaciona os valores de precipitação média anual apurados, em cada sub-bacia, nos períodos histórico e simulados. Pelos resultados apresentados na tabela 5.9 verifica-se a concordância dos resultados da simulação do modelo ARMA(1,1) com as tendências históricas observadas de diminuição das precipitações sobre a maioria das sub-bacias. Observa-se ainda que as equações das linhas de tendência das séries sintéticas geradas, para uma mesma bacia, inferidas pelo método da regressão linear, não têm coeficientes de declividade e intercepto idênticos, uma vez que se afirmou que para o cenário CCT a tendência observada na série histórica seria propagada para as séries sintéticas. Isto se deve ao fato de que a distribuição da seqüência temporal de números aleatórios normalmente distribuídos, gerados por meio de ferramental computacional, varia de uma simulação para outra por causa de sua propriedade randômica.

Tabela 5.9: Precipitações médias anuais, sobre as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, apuradas nos períodos históricos e simulados.

Sub-Bacia	Precipitação Média Anual no Período (mm)			
	Histórico	2005 a 2014	2020 a 2029	2045 a 2054
Tietê/Claro	1.351,0 mm	1.339,5 mm	1.291,7 mm	1.281,7 mm
Tietê/Lençóis	1.299,2 mm	1.287,1 mm	1.252,5 mm	1.240,5 mm
Bauru	1.445,0 mm	1.431,9 mm	1.315,2 mm	1.270,5 mm
Baixo Jacaré-Guaçu	1.367,9 mm	1.367,6 mm	1.285,0 mm	1.251,4 mm
Médio Jacaré-Guaçu	1.564,9 mm	1.550,0 mm	1.380,8 mm	1.335,3 mm
Alto Jacaré-Guaçu	1.420,6 mm	1.414,6 mm	1.285,3 mm	1.235,9 mm
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1.600,6 mm	1.632,1 mm	1.580,0 mm	1.587,7 mm
Alto Jacaré-Pepira	1.317,3 mm	1.304,5 mm	1.218,2 mm	1.205,9 mm
Jaú	1.427,5 mm	1.292,4 mm	1.147,8 mm	1.101,2 mm

Figura 5.10: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2014, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.11: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, para o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2029, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.12: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, para o período de janeiro de 2045 a dezembro de 2054, segundo a narrativa do cenário CCT.

Por fim, observa-se que as características estatísticas de sazonalidade e tendência, das séries históricas, foram propagadas para as séries sintéticas futuras. Esta observação pode ser qualitativamente constatada através da comparação entre os gráficos da série histórica e das séries sintéticas.

5.1.3 Séries Sintéticas Geradas para o cenário CCA.

Este subitem apresenta os resultados das gerações das séries sintéticas de precipitação, segundo a narrativa do cenário climático tendencial CCA. A tendência e sazonalidade, apuradas na série histórica, foram removidas e foram aplicadas as variações mensais de precipitação diária para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 (ver tabela 5.3). As figuras de 5.13 a 5.15 ilustram as séries sintéticas geradas para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu segundo a narrativa do cenário CCA. Os gráficos das séries sintéticas sobre as demais sub-bacias encontram-se no anexo A3. Constatou-se uma diminuição, de um período simulado para o outro, nas precipitações médias anuais e diárias dos períodos simulados, para todas as sub-bacias. A tabela 5.10 relaciona os resultados obtidos para os períodos simulados.

Tabela 5.10: Precipitações médias anuais e diárias, e respectivas variações com relação aos registros em 2000, sobre as sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CCA.

Sub-Bacia	Período	Precipitação Média Anual		Precipitação Média Diária	
		Valor	Variação	Valor	Variação
Tietê-Claro	2005 a 2014	1.250,0 mm	-90,9 mm	3,42 mm	-0,25 mm
	2020 a 2029	1.132,8 mm	-196,4 mm	3,10 mm	-0,54 mm
	2045 a 2054	1.035,4 mm	-284,6 mm	2,84 mm	-0,78 mm
Tietê-Lençóis	2005 a 2014	1.171,6 mm	-114,6 mm	3,21 mm	-0,31 mm
	2020 a 2029	1.088,4 mm	-189,8 mm	2,98 mm	-0,52 mm
	2045 a 2054	989,3 mm	-278,9 mm	2,71 mm	-0,76 mm
Bauru	2005 a 2014	1.319,1 mm	-113,3 mm	3,61 mm	-0,31 mm
	2020 a 2029	1.151,8 mm	-263,9 mm	3,15 mm	-0,72 mm
	2045 a 2054	1.016,3 mm	-385,7 mm	2,78 mm	-1,06 mm
Baixo Jacaré-Guaçú	2005 a 2014	1.256,3 mm	-100,6 mm	3,44 mm	-0,28 mm
	2020 a 2029	1.124,8 mm	-218,1 mm	3,08 mm	-0,60 mm
	2045 a 2054	1.004,3 mm	-327,6 mm	2,75 mm	-0,89 mm
Médio Jacaré-Guaçú	2005 a 2014	1.445,2 mm	-107,7 mm	3,96 mm	-0,29 mm
	2020 a 2029	1.234,0 mm	-297,9 mm	3,38 mm	-0,82 mm
	2045 a 2054	1.090,0 mm	-427,9 mm	2,99 mm	-1,17 mm
Alto Jacaré-Guaçú	2005 a 2014	1.305,0 mm	-104,6 mm	3,57 mm	-0,29 mm
	2020 a 2029	1.125,0 mm	-266,6 mm	3,08 mm	-0,73 mm
	2045 a 2054	987,4 mm	-489,8 mm	2,71 mm	-1,34 mm
Baixo Jacaré-Pepira	2005 a 2014	1.195,7 mm	-274,9 mm	3,27 mm	-0,75 mm
	2020 a 2029	1.058,9 mm	-396,7 mm	2,90 mm	-1,09 mm
	2045 a 2054	987,4 mm	-461,2 mm	2,70 mm	-1,26 mm
Alto Jacaré-Pepira	2005 a 2014	1.195,7 mm	-109,6 mm	3,28 mm	-0,30 mm
	2020 a 2029	1.058,9 mm	-232,4 mm	2,90 mm	-0,64 mm
	2045 a 2054	987,4 mm	-296,9 mm	2,71 mm	-0,81 mm
Jaú	2005 a 2014	1.189,0 mm	-214,5 mm	3,26 mm	-0,59 mm
	2020 a 2029	992,2 mm	-391,3 mm	2,72 mm	-1,07 mm
	2045 a 2054	858,5 mm	-512,0 mm	2,35 mm	-1,40 mm

Observa-se, pelos resultados da tabela 5.10, que as variações absolutas das precipitações médias diárias, para os anos horizonte propostos, não corresponderam exatamente às variações que se quis inferir (ver tabela 5.3) para as séries sintéticas dos respectivos períodos. Este fato ocorreu por um motivo observado. O motivo é o da propriedade randômica da distribuição temporal dos números aleatórios. Observa-se que as variações absolutas nas precipitações médias diárias variam sazonalmente, (ver tabela 5.3) e como os números aleatórios não têm uma distribuição uniforme ao longo do tempo, segundo as suas magnitudes, um maior número de números aleatórios de maior magnitude pode ter coincidido nos meses em que as variações da precipitação diária são maiores ou menores que a variação média anual da precipitação diária.

Figura 5.13: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2014, segundo a narrativa do cenário CCA.

Figura 5.14: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, para o período de janeiro de 2020 a dezembro de 2029, segundo a narrativa do cenário CCA.

Figura 5.15: Série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, para o período de janeiro de 2045 a dezembro de 2054, segundo a narrativa do cenário CCA.

5.1.4. Validação da Metodologia.

Uma vez geradas as séries sintéticas de precipitação, segundo a metodologia adotada, faz-se necessária a validação destes resultados através da comparação das características estatísticas das séries sintéticas geradas com as características estatísticas das séries históricas de precipitação que serviram de matriz para o modelo estocástico linear.

Sobre as séries sintéticas, geradas para ambos os cenários climáticos, foram analisadas a tendência, sazonalidade, a distribuição de frequências e os parâmetros estatísticos representativos desta distribuição de frequências como os momentos estatísticos de 1.^a, 2.^a, 3.^a e 4.^a ordem, ou seja, a média, desvio padrão, coeficientes de assimetria e curtose respectivamente.

As figuras 5.16, 5.17 e 5.18 ilustram a sazonalidade aferida para as séries sintéticas de precipitações geradas sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, segundo a narrativa do cenário CCT, e as figuras 5.19, 5.20 e 5.21 ilustram segundo a narrativa do cenário CCA. As ilustrações de sazonalidade das demais sub-bacias encontram-se nos

Figura 5.16: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período futuro de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.17: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período futuro de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.18: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período futuro de 2049 a 2051, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.19: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período futuro de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCA.

Figura 5.20: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período futuro de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCA.

Figura 5.21: Sazonalidade da Série Sintética de Precipitações Mensais sobre a Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período futuro de 2049 a 2051, segundo a narrativa do cenário CCA.

anexos A3. Percebe-se, por inspeção visual, que a sazonalidade aferida nas séries históricas de precipitação (ver figura 5.6) foram propagadas para as séries sintéticas futuras. Os períodos de estiagem de precipitações foram mantidos no meio dos anos e os períodos chuvosos no início e fim dos anos.

Na ilustração das figuras 5.10, 5.11 e 5.12, percebe-se que a tendência linear à diminuição das precipitações foi preservada quando da sua reposição às séries sintéticas. As ilustrações das demais sub-bacias encontram-se nos anexos A3.

As figuras 5.22, 5.23 e 5.24 ilustram a distribuição de frequências aferidas para as séries sintéticas de precipitações geradas sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, segundo a narrativa do cenário CCT, e as figuras 5.25, 5.26 e 5.27 ilustram segundo a narrativa do cenário CCA. As ilustrações das demais sub-bacias encontram-se nos anexos A3. A tabela 5.11 compara os resultados dos coeficientes de assimetria e curtose, coeficientes estes característicos das distribuições de frequências, das séries sintéticas geradas para os cenários CCA e CCT com os coeficientes de assimetria e curtose da séries históricas de precipitação que serviram de matriz para o modelo de geração de séries sintéticas. Percebe-se pelos resultados explanados nas figuras e tabela supracitadas, que também a propriedade de distribuição de frequências das séries de precipitação também se assemelham às propriedades das séries históricas de precipitação.

A partir dos resultados dos processos de validação adotados, o autor julgou que o metodologia adotada serviu ao propósito da geração de séries sintéticas e que esta metodologia é apropriada para a configuração estatística das séries históricas usadas como matriz para o modelo estocástico adotado.

Após a seqüência de análises acima, procedeu-se a verificação dos resíduos do modelo ARMA(1,1). A verificação sobre os resíduos é então efetuada através das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial da série de resíduos. Qualquer estrutura de autocorrelação nos resíduos no modelo significa que o modelo não capturou toda informação contida na série original. As figuras 5.2⁸₁ e 5.2⁹₂ apresentam as funções de autocorrelação e autocorrelação parcial das séries de resíduos das séries sintéticas geradas para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, segundo a narrativa dos cenários CCA e CCT. Percebe-se, nos resultados das figuras 5.2⁸₁ e 5.2⁹₂, uma baixa correlação entre os resíduos.

Figura 5.22: Histograma de frequências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.23: Histograma de frequências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.24: Histograma de frequências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de 2049 a 2050, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.25: Histograma de frequências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de 2009 a 2011, segundo a narrativa do cenário CCA.

Figura 5.26: Histograma de frequências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de 2024 a 2026, segundo a narrativa do cenário CCA.

Figura 5.27: Histograma de frequências das precipitações médias mensais da série sintética de precipitações gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de 2049 a 2051, segundo a narrativa do cenário CCA.

Tabela 5.11: Comparação entre os coeficientes de assimetria e curtose das séries sintéticas de precipitação, geradas segundo as narrativas dos cenários CCA e CCT. e os coeficientes de assimetria e curtose das séries históricas de precipitação que serviram de matriz para a geração das séries sintéticas.

Sub-Bacia	Série Histórica	Série entre 2009 e 2011		Série entre 2024 e 2026		Série entre 2049 e 2051	
		CCA	CCT	CCA	CCT	CCA	CCT
CURTOSE							
Tietê/Claro	2,4949	2,1714	2,1793	2,1811	2,1145	2,1123	2,1361
Tietê/Lençóis	0,9350	1,0112	1,0124	1,0344	1,0120	1,2510	1,0115
Bauru	0,3725	0,5211	0,5224	0,5901	0,5201	0,6321	0,5061
Baixo Jacaré-Guaçú	4,7328	3,8694	3,8671	3,8011	3,8611	3,7715	3,7942
Médio Jacaré-Guaçú	0,9164	1,0102	1,0112	1,0921	1,0125	1,1212	1,5210
Alto Jacaré-Guaçú	1,2280	1,1115	1,1125	1,1015	1,1153	1,1114	1,1141
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1,2636	1,1645	1,1609	1,1735	1,1689	1,325	1,3611
Alto Jacaré-Pepira	3,3078	2,9999	2,9905	2,8531	2,9977	2,8999	2,7523
Jaú	1,3679	1,3544	1,3231	1,3614	1,3215	1,3111	1,1423
ASSIMETRIA							
Tietê/Claro	1,3454	1,5236	1,5358	1,5211	15,2681	15,2680	15,1169
Tietê/Lençóis	1,0870	1,2315	1,2125	1,2351	12,2643	12,2640	12,1419
Bauru	0,8061	1,0001	1,0506	1,3610	11,3720	11,3720	11,2598
Baixo Jacaré-Guaçú	1,6608	1,7114	1,8114	1,6251	17,1600	17,1602	16,9885
Médio Jacaré-Guaçú	1,0566	1,1113	1,1123	1,1630	11,2892	11,2891	11,1767
Alto Jacaré-Guaçú	1,2259	1,3569	1,3552	1,0253	12,4589	12,4581	12,3338
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1,1691	1,5214	1,5258	1,5652	15,3750	15,3751	15,2219
Alto Jacaré-Pepira	1,5442	1,6215	1,6016	1,6015	16,0822	16,0821	15,9219
Jaú	1,1460	1,2100	1,2901	1,2101	12,3673	12,3670	12,2447

Figura 5.28: Autocorrelação dos resíduos da série sintética gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, segundo a narrativa do cenário CCT.

Figura 5.29: Autocorrelação dos resíduos da série sintética gerada sobre a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, segundo a narrativa do cenário CCA.

5.1.5 Síntese dos Resultados.

Nos estudos prospectivos foi constatada, nos períodos de 10 anos analisados e em todas as sub-bacias, uma tendência linear à diminuição das precipitações.

Na projeção futura do regime de precipitações o cenário CCT e o cenário CCA apontam uma tendência à diminuição das precipitações. Essa tendência futura à diminuição das precipitações foi conferida com as projeções do modelo climático UDCM, para a região sudeste do Brasil, com base na narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000). Pelos resultados explanados nos subitens 5.1.2 e 5.1.3, observa-se que é o Cenário CCA que apresenta uma conjuntura de maior escassez de chuvas na região ora em estudo. A tabela 5.13 compara os resultados das precipitações médias anuais, sobre a totalidade da UGRHI do Tietê-Jacaré, para os períodos futuros que contêm os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, das narrativas dos cenários CCT e CCA.

O cálculo das precipitações médias anuais, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050, sobre a totalidade da UGRHI do Tietê-Jacaré, foi feito a partir da média ponderada, em termos de área de sub-bacia, dos resultados obtidos em cada sub-bacia.

5.2. DISPONIBILIDADE HÍDRICA SUPERFICIAL.

Este item apresenta os resultados obtidos dos processos de calibração dos parâmetros do modelo hidrológico HEC-HMS, dos processos de verificação do modelo e das simulações de disponibilidade hídrica superficial, nos exutórios das sub-bacias em questão, para os respectivos períodos de calibração.

5.2.1 Calibração.

As calibrações dos parâmetros do modelo HEC-HMS foram realizadas em períodos com duração de 6 meses, de outubro a abril, abrangendo o período mais chuvoso na região. Estes períodos de calibração, assim como os períodos de verificação e simulação dos cenários, têm uma discretização diária.

Observa-se que as sub-bacias do Tietê-Lençóis, Tietê-Claro e Bauru não tiveram seus parâmetros calibrados, uma vez que não foram encontrados registros recentes de dados fluviométricos nestas regiões e pelo fato de as bacias do Tietê-Claro e Tietê-

Tabela 5.12: Comparação entre os resultados obtidos, para a evolução das precipitação média anual sobre a totalidade da UGRHI do Tietê-Jacaré, para os cenários CCT e CCA.

Períodos Futuros	Precipitação Média Anual (mm)	
	Cenário CCT	Cenário CCA.
2005 a 2014	1.385,30	1.249,72
2020 a 2029	1.303,69	1.112,16
2045 a 2054	1.281,03	1.005,10

Lençóis terem, em seu curso d'água principal, o Rio Tietê, vazões regularizadas pelo reservatório da usina hidroelétrica de Barra Bonita.

As sub-bacias, que foram calibradas, foram discretizadas espacialmente em sub-bacias correspondentes aos tributários de 1ª ordem ao curso d'água principal. O anexo de Arquivos Gráficos contém uma planta da UGRHI do Tietê-Jacaré, subdividida nas sub-bacias propostas pelo CBH-TJ (2000), a localização dos postos pluviométricos e fluviométricos e a discretização espacial mencionada.

Precedendo o processo de calibração, para cada uma das sub-bacias discretas mencionadas, foi adotada uma coleção inicial de parâmetros. Para os modelos SMA, Muskingum e de Reservatórios Lineares, foram adotados, como valores iniciais dos parâmetros, aqueles propostos por CUNDERLIK (2004). Para o modelo de Clark, os tempos de concentração, das sub-bacias discretizadas, foram calculados através da fórmula de Dooge para bacias rurais. O parâmetros iniciais e calibrados encontram-se nos anexos C2. A figura 5.30 ilustra o gráfico comparativo entre o hidrogramas simulados e observados para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu onde a curva em azul representa o hidrograma simulado e a em vermelho o hidrograma observado. Todos os demais resultados gráficos, das calibrações realizadas para as sub-bacias do Médio Jacaré-Guaçu, Baixo Jacaré-Guaçu, Alto Jacaré-Pepira, Baixo-Médio Jacaré-Pepira e Jaú encontram-se dispostos nos anexos C2.

Observa-se que, durante a fase de calibragem, houve uma preocupação maior em se ajustar os parâmetros para que o comportamento do hidrograma simulado fosse o mais verossímil possível do comportamento do hidrograma observado nos períodos de estiagem. Com isso procurou-se também igualar os volumes escoados, simulado e observado, dando-se menor importância aos ajustes nos picos. A adoção desta diretriz para a calibragem foi necessária uma vez que é mais importante avaliar disponibilidade hídrica, para efeitos comparativos com a demanda, em períodos críticos, ou seja, de estiagem. A tabela 5.13 compara parâmetros inerentes aos hidrogramas observados e simulados das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados.

Figura 5.30: Gráfico comparativo entre os hidrogramas observados e simulados, na fase de calibragem, da bacia do Alto Jacaré-Guaçu. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1)

A calibração dos parâmetros do modelo HEC-HMS foi realizada em etapas de calibração manual e etapas de calibração automática. A figura 5.31 apresenta um gráfico de concordância dos valores simulados com os valores observados. Este gráfico dá uma perspectiva da qualidade do processo de otimização e aponta, para que magnitude de vazões, o processo de otimização foi mais eficiente.

5.2.2 Validação.

O processo de validação dos parâmetros calibrados foi efetuado para um período de dois anos com dados diários de chuva e vazão. O período para a validação foi escolhido segundo a proximidade temporal com o período de calibração, tomando-se o devido cuidado para se evitar interseções. Esta escolha baseia-se na suposição de que os parâmetros intervenientes aos processos de escoamento superficial não tenham mudado de forma significativa. A figura 5.32 ilustra um gráfico comparativo dos hidrogramas observado e simulado para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, para o período de verificação, e a tabela 5.14 compara os parâmetros inerentes aos hidrogramas

Tabela 5.13: Comparação de parâmetros inerentes aos hidrogramas observados e simulados das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrado.

	Vazão de Pico (m³/s)	Total Escoado (10⁶ m³)	Tempo de Ocorrência do Pico
<i>Alto Jacaré-Guaçu – Posto fluviométrico: DAEE 5D-025.</i>			
Observado	19,04	133,65	11-10-1972
Simulado	16,91	136,88	16-10-1972
Resíduo	2,13	3,23	5 dias
<i>Médio Jacaré-Guaçu – Posto fluviométrico: DAEE 5C-013</i>			
Observado	30,41	352,14	15-10-1972
Simulado	32,95	356,32	17-10-1972
Resíduo	2,54	3,86	2 dias
<i>Baixo Jacaré-Guaçu – Posto fluviométrico: DAEE 5C-021</i>			
Observado	66,70	762,14	20-11-1972
Simulado	63,95	767,99	29-11-1972
Resíduo	2,75	5,854	9 dias
<i>Alto Jacaré-Pepira – Posto fluviométrico: DAEE – 5D-028</i>			
Observado	55,49	168,97	11-03-1996
Simulado	26,64	176,70	08-03-1996
Resíduo	28,85	7,73	3 dias
<i>Baixo-Médio Jacaré-Pepira – Posto fluviométrico: DAEE – 5C-020</i>			
Observado	63,53	524,96	12-01-1977
Simulado	49,15	511,96	15-01-1977
Resíduo	14,38	13,00	3 dias
<i>Jaú – Posto fluviométrico: DAEE – 5D-029</i>			
Observado	57,44	145,72	18-02-1995
Simulado	33,38	179,61	07-02-1995
Resíduo	24,04	33,89	9 dias

observado e simulado, para este período de verificação, das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados.

Observa-se, pelos resultados apontados na tabela 5.14 e na figura 5.32, que o modelo respondeu de forma desejável no período de verificação, ou seja, conseguiu reproduzir um comportamento semelhante ao do hidrograma observado durante o período de estiagem, apresentando uma boa resposta quanto ao volume escoado e atendendo assim à necessidade de um modelo que dê uma resposta aproximada da realidade da disponibilidade hídrica superficial nos períodos críticos ou de estiagem. Os demais resultados, das sub-bacias aonde foram efetuados processos de calibração e verificação dos modelos, encontram-se nos anexos C2.

Figura 5.31: Gráfico de concordância dos valores simulados com os valores observados de vazão no processo de calibração dos parâmetros do Alto Jacaré-Guaçu. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1)

Figura 5.32: Gráfico comparativo entre os hidrogramas observados e simulados, na fase de verificação, da bacia do Alto Jacaré-Guaçu. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1)

Tabela 5.14: Comparação de parâmetros inerentes aos hidrogramas observados e simulados, das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados, para o período de verificação.

	Vazão de Pico (m³/s)	Total Escoado (10⁶ m³)	Tempo de Ocorrência do Pico
<i>Alto Jacaré-Guaçu – Posto fluviométrico: DAEE 5D-025.</i>			
Observado	24,28	493,00	19-03-1974
Simulado	20,77	505,95	26-03-1974
Resíduo	3,50	12,95	7 dias
<i>Médio Jacaré-Guaçu – Posto fluviométrico: DAEE 5C-013</i>			
Observado	57,10	1.269,30	21-03-1974
Simulado	83,21	1.309,50	29-03-1974
Resíduo	26,11	40,20	8 dias
<i>Baixo Jacaré-Guaçu – Posto fluviométrico: DAEE 5C-021</i>			
Observado	131,82	2.618,97	02-01-1974
Simulado	224,72	2.689,17	31-12-1973
Resíduo	92,89	70,71	3 dias
<i>Alto Jacaré-Pepira – Posto fluviométrico: DAEE – 5D-028</i>			
Observado	49,52	625,18	15-03-1992
Simulado	42,12	653,79	12-03-1992
Resíduo	7,40	28,61	3 dias
<i>Baixo-Médio Jacaré-Pepira – Posto fluviométrico: DAEE – 5C-020</i>			
Observado	69,53	1.942,52	16-03-1992
Simulado	62,15	1.894,25	13-03-1992
Resíduo	7,38	48,27	3 dias
<i>Jaú – Posto fluviométrico: DAEE – 5D-029</i>			
Observado	20,55	369,12	19-03-1993
Simulado	23,59	372,77	20-02-1993
Resíduo	3,04	3,65	29 dias

5.2.3 Disponibilidade Hídrica Superficial no Período de Calibração.

Uma vez que um dos objetivos, ou etapas, deste trabalho de Dissertação é determinar a disponibilidade hídrica superficial, em termos da vazão nos exultórios das sub-bacias aonde foram feitos balanços entre demanda e disponibilidade, faz-se necessário apresentar os resultados de disponibilidade hídrica superficial, no período de calibração, para efeitos comparativos com os resultados dos cenários futuros a serem apresentados nos dois subitens subsequentes. Observa-se que os postos fluviométricos, aonde foram calibrados os parâmetros das sub-bacias em questão, não se situam nos exultórios das mesmas. A figura 5.33 ilustra um hidrograma gerado, no período de calibração, para o exultório da sub-bacia do alto Jacaré-Guaçu. A tabela 5.15 relaciona as vazões mínimas simuladas e volumes superficiais escoados, nos respectivos períodos de calibração, nas sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados. A ênfase na

Figura 5.33: Hidrograma no exultório da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu no período de calibração. (FONTE: Adaptado de HEC-HMS 2.1)

apresentação das vazões mínimas é devida ao objetivo de avaliação da disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem.

Os resultados de disponibilidade hídrica, para os períodos correspondentes aos cenários futuros, serão explanados nos subitens correspondentes aos resultados dos balanços hídricos entre disponibilidade e demanda.

5.3. PROJEÇÕES DAS DEMANDAS SETORIAIS POR ÁGUA.

Este item apresenta os resultados obtidos das projeções das demandas setoriais futuras por água, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050 e para as nove sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo as narrativas dos cenários sócio-econômicos CSET e CSEA. Todas as simulações foram realizadas em escala de município, mas os resultados obtidos foram agrupados por respectivas sub-bacias uma vez que as simulações dos balanços, entre oferta hídrica e demanda hídrica, foram feitas em escala de sub-bacia. As simulações das demandas foram realizadas com a aplicação do MDSA.

Tabela 5.15: Vazões mínimas simuladas e volumes escoados, nos exultórios das sub-bacias que tiveram seus parâmetros calibrados, nos respectivos períodos de calibração.

	Vazão Mínima (m³/s)	Volume Escoado (10⁶ m³)
Alto Jacaré-Guaçú	8,32	246,26
Médio Jacaré-Guaçú	17,38	392,44
Baixo Jacaré-Guaçú	29,53	767,99
Alto Jacaré-Pepira	9,11	381,59
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	13,39	511,96
Jaú	4,12	209,00

5.3.1. Abastecimento Público e Diluição de Efluentes Domésticos.

- *Análise dos Dados Históricos.*

A figura 5.34 ilustra os dados históricos de evolução das populações urbanas e rurais recenseadas, na sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, e a respectiva curva polinomial de tendência ajustada aos dados históricos. Os resultados das demais sub-bacias encontram-se nos anexos BA. Observa-se, em todas as curvas polinomiais ajustadas, a tendência histórica do aumento da discrepância entre a fração da população situada nas áreas urbanas e a fração da população situada nas áreas rurais. Outra observação é a de que todas as populações urbanas cresceram a taxas positivas cada vez maiores e as populações rurais decresceram a taxas negativas cada vez maiores. Essa observação leva à especulação de que, num futuro próximo, as populações destas sub-bacias serão eminentemente urbanas. A evolução da concentração populacional nas áreas urbanas leva à perspectiva de um aumento do consumo per capita médio da região ora em estudo.

- *Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSET.*

O primeiro passo para a projeção das demandas futuras por água foi o da projeção das populações, urbanas e rurais, para os anos horizonte de 2010, 2025 e 2050. A figura 5.35 ilustra os montantes populacionais projetados, segundo a narrativa do cenário CSET, para as nove sub-bacias componentes da bacia do Tietê-Jacaré. O anexo BA3 contém as projeções populacionais para todos os municípios, para todos os anos horizonte e para os anos imediatamente anterior e posterior a cada ano horizonte.

Figura 5.34: Evoluções Populacionais da Sub-Bacia do Alto Jacaré-Guaçu e Linhas de Tendência.

A partir dos dados populacionais projetados, foram calculadas as projeções das demandas brutas por água para o consumo humano, para os anos horizonte supracitados e os respectivos anos imediatamente anteriores e posteriores, segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.1, aplicação do modelo MDSA e narrativa do cenário CSET. A tabela 5.16 relaciona e a figura 5.36 ilustra as projeções do abastecimento público, para os anos horizontes propostos em cada uma das sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré. Os resultados da tabela 5.16 do modelo MDSA indicaram a tendência à diminuição dos consumos de água pelas populações rurais. O anexo BA4 contém as projeções de demanda bruta por água, para o abastecimento público, para todos os municípios e para todos os anos horizonte.

Figura 5.35: Projeções de crescimento populacional para os anos horizonte segundo a narrativa do cenário CSET.

Tabela 5.16: Demandas projetadas por água para abastecimento público em m^3/s , para os anos horizontes propostos, nas sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.

Sub-Bacia	Demanda em (m^3/s)								
	2010			2025			2050		
	Urb.	Rur.	Tot.	Urb.	Rur.	Tot.	Urb.	Rur.	Tot.
Tietê/Claro	0,678	0,001	0,679	0,853	-	0,853	1,209	-	1,209
Tietê/Lençóis	0,888	0,001	0,889	1,083	-	1,083	1,380	-	1,380
Bauru	1,811	0,004	1,815	2,288	-	2,288	3,095	-	3,095
Baixo Jacaré-Guaçu	0,286	0,001	0,287	0,456	-	0,456	0,837	-	0,837
Médio Jacaré-Guaçu	1,095	-	1,095	1,215	-	1,215	1,295	-	1,295
Alto Jacaré-Guaçu	1,114	0,002	1,116	1,411	-	1,411	1,929	-	1,929
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	0,084	0,001	0,085	0,131	-	0,131	0,243	-	0,243
Alto Jacaré-Pepira	0,226	0,001	0,228	0,367	-	0,367	0,700	-	0,700
Jaú	0,724	0,002	0,726	0,944	-	0,944	1,370	-	1,370
TOTAIS	6,907	0,012	6,919	8,748	-	8,748	12,058	-	12,058

Figura 5.36: Projeções de demanda bruta por água para abastecimento público segundo a narrativa do cenário CSET.

Os cálculos das vazões indisponíveis nos corpos d'água fluviais, em decorrência da diluição de efluentes domésticos, foram realizados segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.2. A tabela 5.17 relaciona os resultados obtidos das projeções de lançamentos de cargas poluidoras domésticas, em termos de concentração de DBO_5 , e as respectivas vazões indisponíveis, nos corpos d'água fluviais receptores, para a diluição destas cargas poluidoras, em cada sub-bacia componente do Tietê-Jacaré. A figura 5.37 ilustra a evolução das vazões indisponíveis mencionadas. Observa-se que estes resultados correspondem à máxima vazão indisponível acumulada no curso d'água fictício (ver definição no subitem 4.3.3.2) da sub-bacia em análise. O anexo BA5 contém todos os resultados das variáveis intervenientes ao cálculo desta vazão.

- ***Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSEA.***

A metodologia adotada, para a projeção da demanda por água para o consumo humano e diluição de efluentes domésticos, para a narrativa do cenário CSEA, é a mesma da adotada para a narrativa do cenário CSET, com exceção do padrão de evolução das populações urbanas e rurais. Para este cenário o padrão adotado para a evolução das populações, foi o mesmo do das projeções do cenário A1F (IPCC, 2000) para o

Figura 5.37: Evolução das vazões indisponíveis nos corpos fluviais receptores, em decorrência da diluição de cargas poluidoras provenientes de esgotos domésticos, segundo narrativa do cenário CSET.

Tabela 5.17: Projeções de lançamento de cargas poluidoras domésticas e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição de cargas poluidoras domésticas, segundo narrativa do cenário CSET.

Sub-Bacia	2010		2025		2050	
	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)
Tietê/Claro	6.523	1,37	8.205	1,73	11.622	2,45
Tietê/Lençóis	11.587	1,07	14.127	1,30	18.011	1,68
Bauru	24.907	2,38	31.463	3,02	42.557	4,08
Baixo Jacaré-Guaçu	2.767	0,51	4.412	0,81	8.108	1,52
Médio Jacaré-Guaçu	12.988	1,72	14.407	1,92	15.360	2,06
Alto Jacaré-Guaçu	12.942	1,55	16.393	1,95	22.412	2,67
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1.414	0,71	2.213	1,24	4.092	2,31
Alto Jacaré-Pepira	2.026	0,80	3.283	1,24	6.266	2,39
Jaú	9.533	1,69	12.429	2,21	18.035	3,22
TOTAIS	84.688	11,79	106.934	15,43	146.465	22,36

continente sul-americano. A figura 5.38 ilustra a evolução das populações das sub-bacias segundo a narrativa do cenário CSEA e a tabela 5.18 relaciona as taxas de variação absolutas adotadas para as projeções das populações, da região ora em estudo, segundo narrativa do cenário A1F. O anexo BA6 contém todos os dados de projeção populacional, para todos os municípios componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré, para todos os anos horizonte e para todos os anos anterior e posterior a cada ano horizonte, segundo a narrativa do CSEA.

Tabela 5.18: Variações absolutas das populações urbanas e rurais, para a região do Tietê-Jacaré, segundo narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000).

	2010	2025	2050
Variação Populacional Absoluta	+13,9%	+31,9%	+45,8%
Parcela da População em Regiões Urbanas	85%	85%	85%

(Fonte: Adaptado de IMAGE 2.2).

Figura 5.38: Projeções de crescimento populacional, para os anos horizonte, segundo a narrativa do cenário CSEA.

Tabela 5.19: Demandas projetadas por água para abastecimento humano em m³/s, para os anos horizontes propostos, nas sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSEA.

Sub-Bacia	Demanda em (m ³ /s)								
	2010			2025			2050		
	Urb.	Rur.	Tot.	Urb.	Rur.	Tot.	Urb.	Rur.	Tot.
Tietê/Claro	0,562	0,020	0,583	0,651	0,024	0,675	0,720	0,026	0,746
Tietê/Lençóis	0,729	0,036	0,765	0,844	0,042	0,886	0,933	0,046	0,979
Bauru	1,467	0,076	1,543	1,698	0,088	1,787	1,877	0,098	1,975
Baixo Jacaré-Guaçu	0,208	0,008	0,216	0,241	0,009	0,250	0,266	0,010	0,276
Médio Jacaré-Guaçu	0,941	0,042	0,983	1,090	0,049	1,139	1,205	0,054	1,259
Alto Jacaré-Guaçu	0,905	0,040	0,945	1,048	0,046	1,094	1,158	0,051	1,209
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	0,062	0,004	0,066	0,071	0,005	0,076	0,079	0,005	0,084
Alto Jacaré-Pepira	0,162	0,005	0,168	0,188	0,006	0,194	0,208	0,007	0,215
Jaú	0,584	0,029	0,613	0,676	0,034	0,710	0,748	0,037	0,785
TOTAIS	5,620	0,261	5,880	6,508	0,302	6,810	7,193	0,334	7,527

Os resultados das projeções de evolução da demanda por água, para o consumo humano e a diluição de efluentes, estão relatados nas tabelas 5.19 e 5.20 e ilustrados nas figuras 5.39 e 5.40 respectivamente. Os anexos BA7 e BA8 contém todos os resultados por município componente da UGRHI do Tietê/Jacaré. Todas as considerações para este cenário, acerca dos cálculos dos variáveis em análise, são as mesmas das do cenário CSET. Observa-se que as projeções de crescimento populacional, segundo a narrativa do cenário A1F, exercem uma pressão menor sobre o consumo dos recursos hídricos do que as projeções de crescimento populacional, segundo o padrão histórico de crescimento, adotado para o cenário CCT.

5.3.2. Agricultura Irrigada.

- ***Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSET.***

As projeções de demanda por água, pelo setor da agricultura irrigada, foram calculadas segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.3. A tabela 5.21 relaciona e as figuras 5.41 e 5.42 ilustram as projeções das áreas irrigadas e as respectivas demandas médias anuais por água, para a agricultura irrigada, nas nove sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré.

Figura 5.39: Projeções de demanda bruta por água para abastecimento humano segundo a narrativa do cenário CSEA.

Figura 5.40: Evolução das vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição de cargas poluidoras provenientes de esgotos domésticos, segundo narrativa do cenário CSEA.

Tabela 5.20: Projeções de lançamento de cargas poluidoras domésticas e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição de cargas poluidoras, segundo a narrativa do cenário CSEA.

Sub-Bacia	2010		2025		2050	
	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)
Tietê/Claro	5.405	1,15	6.259	1,33	6.919	1,44
Tietê/Lençóis	9.511	0,87	11.015	1,01	12.176	1,13
Bauru	20.169	1,93	23.356	2,25	25.817	2,49
Baixo Jacaré-Guaçú	2.014	0,37	2.332	0,42	2.578	0,48
Médio Jacaré-Guaçú	11.162	1,48	12.925	1,72	14.288	1,92
Alto Jacaré-Guaçú	10.513	1,26	12.175	1,44	13.458	1,60
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	1.038	0,53	1.202	0,71	1.329	0,71
Alto Jacaré-Pepira	1.452	1,01	1.682	1,18	1.859	1,35
Jaú	7.688	1,37	8.903	1,58	9.841	1,74
TOTAIS	68.954	9,97	79.851	11,65	88.266	12,86

Observa-se que os valores de consumo, no ano 2000, são projeções deste trabalho de Dissertação uma vez que não há registros para este ano. A figura 5.43 ilustra a sazonalidade da projeção do consumo mensal segundo a metodologia de inferência de sazonalidade que se adotou. Em comparação com outros setores, observa-se a agricultura irrigada é o setor que mais exerce pressão sobre os recursos hídricos.

Tabela 5.21: Projeções de evolução de áreas irrigadas e demandas médias anuais por água segundo narrativa do cenário CSET.

Sub-Bacia	Áreas Irrigadas (Km ²) e Demandas por Água (m ³ /s)									
	1996		2000		2010		2025		2050	
	Área	Dem.	Área	Dem.	Área	Dem.	Área	Dem.	Área	Dem.
Tietê/Claro	40.00	1.31	41.97	1.37	49.29	1.61	61.69	2.02	87.37	2.86
Tietê/Lençóis	149.03	4.87	156.99	5.13	186.08	6.08	225.74	7.38	287.80	9.41
Bauru	3.97	0.13	4.27	0.14	5.14	0.17	6.45	0.21	8.72	0.29
Baixo Jacaré-Guaçú	12.11	0.40	14.66	0.48	19.93	0.65	31.09	1.02	57.15	1.87
Médio Jacaré-Guaçú	24.63	0.81	25.41	0.83	28.62	0.94	31.75	1.04	33.85	1.11
Alto Jacaré-Guaçú	24.15	0.79	26.08	0.85	31.28	1.02	39.37	1.29	53.83	1.76
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	17.81	0.58	19.36	0.63	26.04	0.85	39.98	1.31	73.91	2.42
Alto Jacaré-Pepira	7.11	0.23	7.84	0.26	10.86	0.35	17.17	0.56	32.77	1.07
Jaú	5.48	0.18	5.93	0.19	7.17	0.23	9.27	0.30	13.46	0.44
TOTAIS	284.3	9.30	302.5	9.89	364.4	11.92	462.5	15.12	648.8	21.22

Figura 5.41: Projeção de evolução das áreas irrigadas nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré segundo a narrativa do cenário CSET.

Figura 5.42: Projeção de evolução das demandas por água pela agricultura irrigada, nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.

Figura 5.43: Sazonalidade da projeção de evolução das demandas por água pela agricultura irrigada, no conjunto das nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.

- ***Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSEA.***

As projeções de demanda por água, pelo setor da agricultura irrigada, foram calculadas segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.3. A tabela 5.22 relaciona as projeções das variações, em termos percentuais, da produção agrícola no continente sul-americano, feitas pelo IPCC (2000) segundo a narrativa do cenário A1F. Estas taxas de variação média na produção agrícola do continente sul-americano foram adotadas como sendo as mesmas taxas de variação do crescimento das áreas irrigadas da região ora em estudo. Estas variações foram calculadas sobre o ano base de 1996, ano do último censo agropecuário do IBGE (1995-1996a).

As áreas irrigadas para o ano de 2000 são projeções deste trabalho de Dissertação uma vez que não foram encontrados registros por parte dos órgãos estatísticos afins. A tabela 5.23 relaciona e as figuras 5.44 e 5.45 ilustram as projeções das áreas irrigadas e as respectivas demandas médias anuais por água, para a agricultura irrigada, nas nove sub-bacias componentes da UGRHI do Tietê-Jacaré. Para a inferência da sazonalidade, ao consumo da irrigação para o cenário CCA, foi adotada a mesma metodologia da do cenário CCT.

Tabela 5.22: Projeções de evolução das áreas irrigadas segundo a narrativa do cenário CSEA e sobre os registros do ano base de 1996.

	2000	2010	2025	2050
Variação das Áreas Irrigadas	+46%	+89%	+132%	+183%

(Fonte: Adaptado de IMAGE 2.2).

Tabela 5.23: Projeções de evolução de áreas irrigadas e demandas médias anuais por água segundo narrativa do cenário CSEA.

Sub-Bacia	Áreas Irrigadas (Km ²) e Demandas por Água (m ³ /s)									
	1996		2000		2010		2025		2050	
	Área	Dem.	Área	Dem.	Área	Dem.	Área	Dem.	Área	Dem.
Tietê/Claro	40,00	1,31	58,38	1,91	75,51	2,47	92,86	3,04	113,29	3,70
Tietê/Lençóis	149,03	4,87	217,50	7,11	281,33	9,20	345,96	11,31	422,08	13,80
Bauru	3,97	0,13	5,79	0,19	7,49	0,25	9,22	0,30	11,24	0,37
Baixo Jacaré-Guaçu	12,11	0,40	17,67	0,58	22,86	0,75	28,11	0,92	34,30	1,12
Médio Jacaré-Guaçu	24,63	0,81	35,95	1,18	46,49	1,52	57,18	1,87	69,76	2,28
Alto Jacaré-Guaçu	24,15	0,79	35,25	1,15	45,59	1,49	56,06	1,83	68,40	2,24
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	17,81	0,58	25,99	0,85	33,62	1,10	41,34	1,35	50,44	1,65
Alto Jacaré-Pepira	7,11	0,23	10,38	0,34	13,42	0,44	16,51	0,54	20,14	0,66
Jaú	5,48	0,18	8,00	0,26	10,34	0,34	12,72	0,42	15,52	0,51
TOTAIS	284,3	9,30	414,91	13,57	536,66	17,55	659,95	21,58	805,16	26,33

Figura 5.44: Projeção de evolução das áreas irrigadas nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré segundo a narrativa do cenário CSEA.

Figura 5.45: Projeção de evolução das demandas por água pela agricultura irrigada, nas nove sub-bacias do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSEA.

5.3.3. Pecuária.

- Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSET.*

As projeções de demanda por água, pelo setor da pecuária, foram calculadas segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.4. A tabela 5.24 relaciona a evolução das populações dos rebanhos. A figura 5.46 ilustra a evolução das demandas por água dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos nas nove sub-bacias estudadas. Os resultados para todos os municípios encontram-se nos anexos BC1 e BC2.

Observa-se, pela explanação dos resultados, que embora as populações de suínos e galináceos sejam relativamente grandes, é a população de bovinos que representa a maior parcela, da atividade da pecuária, na demanda por água. Por exemplo, para o ano base de 1996, estima-se que a pecuária bovina tenha consumido cerca de 96% da água consumida no setor da pecuária, restando 2,4% para a pecuária de suínos e 1,6% para o setor da avicultura.

Tabela 5.24: Projeções de evolução das populações dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos segundo a narrativa do cenário CSET.

Sub-Bacia	Evolução Populacional dos Rebanhos. (Milhares de Animais)								
	Bovinos			Suínos			Galináceos		
	2010	2025	2050	2010	2025	2050	2010	2025	2050
Tietê/Claro	198	248	352	23	28	40	1,486	1,860	2,635
Tietê/Lençói	47	57	73	23	28	36	1,131	1,372	1,750
Bauru	824	1,034	1,399	51	64	87	1,077	1,351	1,828
Baixo Jacaré-Guaçu	41	64	117	4	6	10	317	495	910
Médio Jacaré-Guaçu	385	427	455	88	97	104	924	1,025	1,092
Alto Jacaré-Guaçu	61	76	104	37	46	63	10	12	17
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	37	57	106	2	3	6	853	1,310	2,420
Alto Jacaré-Pepira	92	145	278	20	32	62	875	1,385	2,642
Jaú	48	62	90	20	25	37	283	366	531
TOTAIS	1,733	2,171	2,973	267	331	445	6,956	9,175	13,825

Figura 5.46: Projeções de demanda por água, para a pecuária, segundo a narrativa do cenário CSET.

Tabela 5.25: Evolução das populações animais segundo a narrativa do cenário A1F (IPCC,2000).

	2000	2010	2025	2050
Bovinos	+50%	+98%	+153%	+193%
Suínos	+48%	+91%	+139%	+193%
Galináceos	+49%	+96%	+148%	+192%

(Fonte: Adaptado de IMAGE 2.2).

Tabela 5.26: Projeções de evolução das populações dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos segundo a narrativa do cenário CSEA.

Sub-Bacia	Evolução Populacional dos Rebanhos. (Milhares de Animais)								
	Bovinos			Suínos			Galináceos		
	2010	2025	2050	2010	2025	2050	2010	2025	2050
Tietê/Claro	329	421	486	36	45	56	2.400	3.039	3.581
Tietê/Lençói	75	96	111	34	42	52	1.938	2.454	2.892
Bauru	1.260	1.610	1.860	75	93	114	1.702	2.156	2.540
Baixo Jacaré-Guaçu	58	74	86	5	6	7	397	503	593
Médio Jacaré-Guaçu	665	850	982	145	181	222	1.369	1.733	2.042
Alto Jacaré-Guaçu	93	119	137	54	68	83	15	19	22
Baixo-Médio Jacaré-Pepira	51	65	75	3	4	4	1.159	1.467	1.729
Alto Jacaré-Pepira	119	152	176	26	32	39	1.102	1.396	1.645
Jaú	72	92	106	29	36	44	417	528	622
TOTAIS	2.722	3.477	4.018	406	507	622	10.498	13.294	15.667

- ***Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSEA.***

A tabela 5.25 relaciona as taxas médias de evolução das populações animais, no continente sul-americano, segundo a narrativa do cenário A1F do IPCC (2000), tomando como base os valores registrados no ano base de 1996 pelo censo agropecuário do IBGE (1995-1996a). Estas taxas foram usadas para a projeção das populações animais da região ora em estudo. A tabela 5.26 relaciona a evolução das populações dos rebanhos. A figura 5.47 ilustra a evolução das demandas por água dos rebanhos de bovinos, suínos e galináceos nas nove sub-bacias estudadas. Os resultados para todos os municípios encontram-se nos anexos BC3 e BC4.

5.3.4. Indústria e Diluição de Efluentes.

- ***Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSET.***

As projeções de demanda por água, para o abastecimento da produção industrial e diluição das cargas poluidoras orgânicas provenientes desta produção, para a narrativa do cenário CSET, foram calculadas segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.5. A figura 5.48 ilustra as projeções das demandas, para o abastecimento da produção industrial, segundo a narrativa do cenário CSET.

Figura 5.47: Projeções de demanda por água, para a pecuária, segundo a narrativa do cenário CSEA.

A tabela 5.27 relaciona as projeções de lançamento das cargas poluidoras e as respectivas vazões alocadas, nos corpos fluviais receptores. A figura 5.49 ilustra a evolução das demandas por vazão, nos corpos fluviais receptores, para a diluição das águas servidas provenientes da atividade industrial. Os anexos BD2 e BD3 contém todos os resultados projetados para todos os municípios. Observa-se que, como não foram encontradas atividades industriais de impacto relevante sobre os recursos hídricos das sub-bacias do Médio Jacaré-Guaçu, Baixo-Médio Jacaré-Pepira e Alto Jacaré-Pepira, para estas sub-bacias não foram estimados consumo para este setor econômico.

- ***Projeção da Demanda Segundo a Narrativa do Cenário CSEA.***

As projeções de demanda por água, para o abastecimento da produção industrial e diluição das respectivas cargas poluidoras orgânicas, para a narrativa do cenário CSEA, foram calculadas segundo a metodologia descrita no subitem 4.3.3.5. Para a projeção de evolução da demanda, supôs-se que as taxas de evolução do consumo de água e do lançamento de cargas poluidoras orgânicas fossem iguais às taxas

Figura 5.48: Projeções de demanda por água, para o abastecimento da produção industrial, segundo a narrativa do cenário CSET.

Tabela 5.27: Projeções de lançamento de cargas poluidoras de rejeitos industriais e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição das cargas poluidoras, segundo narrativa do cenário CSET.

Sub-Bacia	2010		2025		2050	
	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)
Tietê/Claro	130,48	0,03	178,68	0,04	280,95	0,05
Tietê/Lençóis	23.074,10	0,48	31.596,97	0,58	49.682,07	0,74
Bauru	2.230,95	0,16	3.055,00	0,20	4.803,58	0,28
Baixo Jacaré-Guaçu	2.109,78	0,92	2.889,07	1,42	4.542,69	2,57
Alto Jacaré-Guaçu	2.182,60	0,13	2.988,78	0,16	4.699,47	0,22
Jaú	9.687,85	0,50	13.266,24	0,64	20.859,42	0,93
TOTAIS	39.415,77	2,22	53.974,74	3,04	84.868,18	4,78

de evolução da produção industrial regional, segundo as projeções do cenário de referência A1F (IPCC, 2000) para o continente sul-americano. A tabela 5.28 relaciona as taxas médias de projeção da evolução da produção industrial, para o continente Sul-Americano, que foram usadas para a projeção da evolução da produção industrial na região ora em estudo, em termos da contribuição da atividade industrial ao produto nacional bruto (PNB). Estas taxas são relativas aos registros do ano base de 2000.

Figura 5.49: Projeções de demanda por água, para a diluição de efluentes industriais, segundo a narrativa do cenário CSET.

A figura 5.50 ilustra as projeções das demandas, para o abastecimento da produção industrial, segundo a narrativa do cenário CSEA. A tabela 5.29 relaciona as projeções de lançamento das cargas poluidoras e as respectivas vazões alocadas, nos corpos fluviais receptores, para a diluição destas cargas. A figura 5.51 ilustra a evolução das demandas por vazão, nos corpos fluviais receptores, para a diluição das águas servidas provenientes da atividade industrial. Os anexos BD4 e BD5 contém todos os resultados projetados para todos os município, segundo a narrativa deste cenário.

Tabela 5.28: Projeção das taxas médias de evolução da produção industrial, no continente Sul-Americano, segundo a narrativa do cenário de referência A1F (IPCC, 2000).

	2010	2025	2050
Taxas de Evolução da Produção Industrial.	18%	67%	139%

(fonte: adaptado de IMAGE 2.2)

Figura 5.50: Projeções de demanda por água, para o abastecimento da produção industrial, segundo a narrativa do cenário CSEA.

Tabela 5.29: Projeções de lançamento de cargas poluidoras de rejeitos industriais e vazões alocadas nos corpos fluviais receptores, para a diluição das cargas poluidoras, segundo narrativa do cenário CSEA.

Sub-Bacia	2010		2025		2050	
	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)	DBO ₅ (kg/dia)	Q (m ³ /s)
Tietê/Claro	156,58	0,04	203,55	0,06	295,15	0,08
Tietê/Lençóis	27.688,92	0,64	35.995,60	0,87	52.193,62	1,23
Bauru	2.677,14	0,22	3.480,28	0,29	5.046,41	0,41
Baixo Jacaré-Guaçu	2.531,74	1,09	3.291,26	1,47	4.772,33	2,07
Alto Jacaré-Guaçu	2.619,12	0,17	3.404,85	0,23	4.937,04	0,33
Jaú	11.625,42	0,66	15.113,05	0,89	21.913,92	1,26
TOTAIS	47.298,92	2,82	61.488,59	3,81	89.158,46	5,37

5.3.5. Demanda Global.

Neste item são apresentados os resultados da demanda global, no conjunto das sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, para as narrativas dos cenários CSET e CSEA. No âmbito deste trabalho de Dissertação define-se demanda global como a soma de todas as demandas consuntivas, ou seja, a soma de todas as demandas que representem locação permanente de recursos hídricos.

Figura 5.51: Projeções de demanda por água, para a diluição de efluentes industriais, segundo a narrativa do cenário CSEA.

Embora a demanda por água para a diluição de cargas orgânicas, nos corpos fluviais receptores, seja não consuntiva, alocando recursos hídricos temporariamente, considerou-se este uso na demanda global uma vez que este uso, a princípio, indisponibiliza recursos hídricos para os outros usos consuntivos. A geração de energia elétrica, a outra demanda não consuntiva, foi considerada na demanda global em termos da vazão regularizada pela usina de Barra Bonita, situada no extremo montante do trecho do Rio Tietê localizado no Alto Jacaré-Guaçu, influenciando somente na disponibilidade hídrica das sub-bacias do Tietê-Claro e Tietê-Lençóis. A tabela 5.30 e as figuras 5.52, 5.53 e 5.54 ilustram e comparam a evolução das demandas, de todos os setores usuários analisados, das projeções dos cenários CSET e CSEA.

A demanda consuntiva total representa a soma de todas as demandas que alocam recursos hídricos permanentemente, ou seja, demandas que extraem água dos mananciais sem nenhum tipo de retorno. A demanda consuntiva total é a soma das demandas para o abastecimento público, indústria, agricultura irrigada e pecuária. A demanda não consuntiva total representa a soma de todas as demandas que alocam recursos hídricos temporariamente, ou seja, que indisponibilizam estes recursos para outros usos. A demanda não consuntiva total é a soma das demandas, em termos de vazão alocada nos corpos fluviais, para a diluição de efluentes domésticos e industriais.

Tabela 5.30: Evolução das demandas setoriais por água, na UGRHI do Tietê Jacaré, segundo as narrativas dos cenários CSEA e CSET.

Setor Usuário	Demanda (m ³ /s)					
	2010		2025		2050	
	CSEA	CSET	CSEA	CSET	CSEA	CSET
Abastecimento Público	5,88	6,92	6,81	8,75	7,53	12,06
Irrigação	17,55	11,92	21,58	15,12	26,33	21,22
Pecuária	2,23	1,42	2,85	1,78	3,30	2,44
Indústria	4,36	3,44	5,89	4,72	8,32	7,42
Total Consuntivo	30,02	23,70	37,13	30,37	45,47	43,14
Efluentes Domésticos	9,97	11,79	11,65	15,43	12,86	22,36
Efluentes Industriais	1,69	1,38	2,28	2,01	3,22	3,44
Total não Consuntivo	11,66	13,17	13,93	17,44	16,08	25,80

Figura 5.52: Evolução das demandas setoriais por água, na UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSET.

Figura 5.53: Evolução das demandas setoriais por água, na UGRHI do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário CSEA.

Figura 5.54: Gráfico comparativo da evolução das demandas Consuntivas e Não-Consuntivas para os cenários CSET e CSEA.

Comparando os resultados das projeções de demanda dos cenários CSET e CSEA, fazem-se as seguintes observações:

- A narrativa do cenário CSEA é o que exerce maior demanda consuntiva total por recursos hídricos e o cenário CSET é o que exerce maior demanda não consuntiva total por recursos hídricos.
- Embora a demanda consuntiva total da narrativa do cenário CSEA seja maior que a da narrativa do cenário CSET, a demanda para o abastecimento público no cenário CSET é maior que no cenário CSEA.
- Embora a demanda não consuntiva total da narrativa do cenário CSET seja maior que a da narrativa do cenário CSEA, a demanda para a diluição de efluentes industriais no cenário CSEA é maior que no cenário CSET.
- Para as projeções de demandas até 2050, há uma tendência que as demandas totais, das narrativas dos cenários CSET e CSEA, se igualem até às proximidades do ano de 2050.
- Todas as projeções de demandas dos setores econômicos da Indústria, Agricultura Irrigada e Pecuária para o cenário CSEA são maiores que as projeções do cenário CSET e todas as projeções de demandas para o abastecimento público e diluição de efluentes para o cenário CSET são maiores que as projeções do cenário CSEA.

Todas as observações supracitadas são resultantes dos seguintes fatos:

- O cenário CSEA, baseado na narrativa regional do cenário A1F, é um cenário de inserção regional ao mercado globalizado, ou seja, os meios de produção locais trabalham na perspectiva do suprimento do mercado interno e das exportações. Logo, é a narrativa do cenário CSEA que exerce a maior pressão sobre os recursos naturais, entre eles os recursos hídricos, devido aos níveis mais elevados de produção.
- O cenário CSET é um cenário eminentemente regional, ou seja, os meios de produção locais trabalham na perspectiva somente do mercado interno.
- Uma vez que o cenário CSEA projeta um crescimento populacional a taxas menores que o cenário CSET, a demanda por água para o abastecimento público e diluição de efluentes domésticos tende a ser maior na narrativa do cenário CSET.
- Uma vez que o cenário CSEA, baseado na narrativa regional do cenário A1F, projeta um início de estagnação do crescimento econômico e reversão das taxas de

crescimento populacional em meados deste século, as projeções de demanda por água, para os dois cenários, tenderão a se igualar neste período.

5.4. PROJEÇÕES DE BALANÇOS HÍDRICOS.

Neste item são apresentados os resultados e discussões correspondentes ao objetivo principal deste trabalho de Dissertação. São apresentados os resultados gráficos dos balanços hídricos, entre disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica superficial, para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, e os resultados de alguns parâmetros de interesse, para análise em situação crítica, para todas as sub-bacias. Os resultados gráficos das demais sub-bacias encontram-se no anexo D. Os gráficos, abaixo apresentados, mostram curvas de evolução da disponibilidade hídrica superficial, em termos de vazão no exutório da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, e curvas de evolução das demandas hídricas sobre os mananciais de superfície.

Observa-se que a curva representativa da demanda é a soma das demandas consuntivas, que captam água dos mananciais de superfície, com as demandas não consuntivas, que despejam efluentes nestes mananciais e indisponibilizam parcelas das vazões dos cursos d'água para outros usos. O cômputo da parcela da demanda que incide sobre os mananciais de superfície foi efetuado segundo as estimativas do CBH-TJ (2000), estimativas estas baseadas em cadastros de usuários. Para o setor da irrigação, como não há estimativa das fontes de suprimento do consumo, considerou-se a incidência de toda a demanda deste setor sobre os mananciais de superfície.

5.4.1. CENÁRIO A.

O cenário A é uma composição do cenário climático CCT e do cenário CSET, ou seja, é um cenário de projeção futura da evolução histórica recente dos fatores intervenientes à disponibilidade e oferta hídricas. As figuras 5.55 a 5.57 ilustram as curvas de evolução da disponibilidade e oferta hídricas para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, na sequência de intervalos de tempo no entorno dos anos horizonte. Observa-se, pela evolução dos gráficos das figuras 5.55, 5.56 e 5.57, uma tendência à redução da disponibilidade hídrica superficial, em decorrência da tendência à diminuição das

Figura 5.55: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2011, segundo a narrativa do cenário A.

Figura 5.56: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2024 a dezembro de 2026, segundo a narrativa do cenário A.

Figura 5.57: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2049 a dezembro de 2051, segundo a narrativa do cenário A.

precipitações, e uma tendência ao aumento da demanda, sobre os mananciais de superfície, principalmente nos períodos de estiagem de chuvas.

Nos períodos de estiagem, onde a disponibilidade hídrica e a quantidade e intensidade de chuvas é menor, e a demanda por recursos hídricos é maior devido, principalmente, à atividade sazonal da irrigação, a relação entre disponibilidade e oferta se torna mais crítica. A evolução desta situação crítica pode ser constatada na sequência de gráficos das figuras 5.55 a 5.57 quando, em 2050, a diferença entre demanda e oferta hídricas é bem reduzida chegando a menos de $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no período mais crítico. A tabela 5.31 relaciona alguns parâmetros para a análise de situação crítica entre oferta e demanda hídrica, nos anos horizontes propostos para todas as sub-bacias em análise.

Observa-se, pelos resultados da tabela 5.31, que a demanda hídrica, estimada segundo a metodologia deste trabalho de Dissertação, representa uma parcela significativa do escoamento superficial, principalmente nos períodos de estiagem. Por exemplo, comparando os resultados da sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçú, a demanda máxima (vazão máxima) representa 51% da disponibilidade mínima (vazão mínima), na projeção para 2010, chegando a 93%, na projeção para 2050.

Tabela 5.31: Parâmetros característicos da relação entre oferta e disponibilidade hídricas na análise de situação crítica, para as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário A.

Sub-Bacia	Ano Horizonte	Oferta Hídrica	Demanda Hídrica
		Vazão Mínima (m ³ /s)	Vazão Máxima (m ³ /s)
Alto Jacaré-Guaçú	2010	7,21	3,71
	2025	7,06	4,67
	2050	7,05	6,52
Médio Jacaré-Guaçú	2010	17,03	3,88
	2025	16,34	4,30
	2050	15,89	4,65
Baixo Jacaré-Guaçú	2010	31,10	4,29
	2025	30,97	5,99
	2050	27,14	10,88
Alto Jacaré-Pepira	2010	5,04	1,50
	2025	4,98	2,36
	2050	4,53	4,59
Baixo Jacaré-Pepira	2010	7,01	2,23
	2025	6,93	3,29
	2050	6,91	6,28
Jaú	2010	3,01	2,78
	2025	2,81	3,61
	2050	2,85	5,25
Tietê-Lençóis	2010	160,00	8,96
	2025	160,00	10,65
	2050	160,00	14,24
Tietê-Claro	2010	160,00	4,38
	2025	160,00	5,50
	2050	160,00	7,99
Bauru	2010	3,14	3,93
	2025	2,92	4,98
	2050	2,51	6,72

Esta relevância da demanda, com relação à disponibilidade hídrica superficial, principalmente nos períodos de estiagem, leva ao questionamento dos parâmetros calibrados destas sub-bacias, principalmente àqueles referentes ao comportamento das mesmas nos períodos de recessão, uma vez que o autor desta Dissertação não levou em consideração a demanda nos processos de calibração.

No entanto, uma vez que a calibração foi realizada para períodos de tempo passados, nos quais há poucas informações acerca da demanda, julgou-se que esta consideração só iria fomentar as incertezas quanto à calibração, uma vez que estas são compostas de incertezas quanto a sazonalidade da demanda, fontes de suprimento da demanda, distribuição espacial dos pontos de captação e falta de informações intervenientes à estimativa da demanda como parâmetros de eficiência no uso dos

recursos hídricos e dados acerca da intensidade e periodicidade das atividades econômicas.

Ainda com relação aos resultados explanados na tabela 5.31, observa-se que, em 2050, a maioria das sub-bacias apresenta uma situação bastante crítica nos períodos de estiagem destacando-se, nesta análise, as sub-bacias do Bauru e Jaú, aonde há uma perspectiva eminente de que a demanda supere a oferta hídrica nos períodos de estiagem.

Com relação às bacias do Tietê-Claro e Tietê-Lençóis, observa-se que a oferta é bem superior à demanda por terem, estas sub-bacias, como curso d'água principal, o trecho do Rio Tietê com vazões regularizadas pelo Reservatório de Barra Bonita (ONS, 2002). A vazão mínima de 160 m³/s (ONS, 2002) corresponde às restrições de operação do reservatório de Barra Bonita, situado a montante, necessárias à manutenção da navegabilidade e os níveis de oxigênio da água para atender a demanda ecológica no Rio Tietê.

Os resultados das simulações, para este cenário, apontam uma tendência à escassez de recursos hídricos ocorrendo de forma heterogênea nas dimensões espacial e temporal, e induzindo a uma perspectiva eminente de reversões cada vez maiores de água entre as sub-bacias adjacentes ou a uma exploração maior dos mananciais subterrâneos, quando a orientação para o suprimento da demanda será direcionada sobre critérios técnicos e econômicos que fogem ao escopo deste trabalho de Dissertação.

5.4.2. CENÁRIO B.

O cenário B é uma composição dos cenários CCA e CSEA, ou seja, é um cenário de projeção futura da narrativa do cenário A1F (IPCC, 2000) dos fatores intervenientes à disponibilidade e oferta hídricas. As figuras 5.58 a 5.60 ilustram as curvas de evolução da disponibilidade e oferta hídricas para a sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu, na sequência de intervalos de tempo no entorno dos anos horizontes. A tabela 5.32 relaciona alguns parâmetros para a análise de situação crítica entre oferta e demanda hídrica, nos anos horizontes propostos para todas as sub-bacias em análise.

Tabela 5.32: Parâmetros característicos da relação entre oferta e disponibilidade hídricas na análise de situação crítica, para as sub-bacias componentes do Tietê-Jacaré, segundo a narrativa do cenário B.

Sub-Bacia	Ano Horizonte	Oferta Hídrica	Demanda Hídrica
		Vazão Mínima (m ³ /s)	Vazão Máxima (m ³ /s)
Alto Jacaré-Guaçú	2010	6,19	4,26
	2025	5,88	4,86
	2050	5,11	5,67
Médio Jacaré-Guaçú	2010	16,21	4,85
	2025	15,34	5,57
	2050	17,89	5,82
Baixo Jacaré-Guaçú	2010	28,14	4,29
	2025	27,98	5,01
	2050	23,12	6,58
Alto Jacaré-Pepira	2010	6,21	1,99
	2025	4,88	2,14
	2050	4,01	2,53
Baixo Jacaré-Pepira	2010	6,89	2,18
	2025	6,77	2,67
	2050	6,77	3,16
Jaú	2010	3,12	2,84
	2025	2,75	3,22
	2050	2,69	3,92
Tietê-Lençóis	2010	160,00	16,15
	2025	160,00	19,06
	2050	160,00	24,48
Tietê-Claro	2010	160,00	5,55
	2025	160,00	6,73
	2050	160,00	8,81
Bauru	2010	3,13	4,23
	2025	2,84	4,82
	2050	2,68	5,36

Reportando-se ao subitem 5.1.4 e à tabela 5.11, observa-se que o cenário climático alternativo é o de menor quantidade de chuvas supondo-se, portanto, que este seja o cenário de menor disponibilidade hídrica superficial. No entanto, nem todos os resultados de vazão mínima, inerentes à análise da situação crítica da disponibilidade hídrica, corresponderam desta forma, se tomarmos como comparação os resultados de disponibilidade hídrica do Cenário A (ver tabela 5.31) que tem um regime de chuvas, baseado na narrativa do cenário CCT, maior. Ou seja, nem todas as vazões mínimas do cenário B foram menores que as vazões mínimas do cenário A.

Figura 5.58: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2011, segundo a narrativa do cenário B.

Figura 5.59: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçu, no período de janeiro de 2024 a dezembro de 2026, segundo a narrativa do cenário B.

Figura 5.60: Balanço Hídrico entre disponibilidade e demanda para a bacia do Alto Jacaré-Guaçú, no período de janeiro de 2049 a dezembro de 2051, segundo a narrativa do cenário B.

A explicação encontrada para a explanação do parágrafo anterior baseia-se na aleatoriedade inerente dos processos de geração de séries sintéticas de precipitação. Embora tenha se conseguido, para o cenário CCA, uma precipitação média anual menor que a do cenário CCT (ver tabela 5.11), e por consequência um volume escoado menor, em algumas bacias e em alguns anos horizontes as intensidades precipitadas foram, em alguns momentos destes anos, maiores para o cenário CCA do que o cenário CCT. Comparando as séries sintéticas de precipitação, geradas para os cenários CCA e CCT, o autor desta Dissertação observou que esta ocorrência se deu devido à distribuição temporal randômica dos números aleatórios gerados que, em pequenos espaços de tempo, se concentraram em números de maior magnitude da distribuição probabilística adotada.

Com relação à demanda para este cenário, e reportando-se ao subitem 5.3.5 e à tabela 5.30, observa-se que o cenário CSEA é o cenário de maior demanda por recursos hídricos. Portanto o cenário B, que é uma combinação dos cenários CCA e CSEA, é o mais crítico dos cenários futuros propostos, uma vez que ele combina com o cenário

climático de menor disponibilidade hídrica com o cenário sócio-econômico de maior pressão sobre os recursos hídricos.

Análise interessante pode ser feita comparando os cenários A e B, haja visto que o cenário A é o menos crítico por combinar o cenário climático de maior disponibilidade hídrica com o de menor demanda hídrica. Como ambos os cenários apresentam o mesmo comportamento tendencial, a maioria das considerações feitas para o cenário A pode ser colocada para o cenário B. No entanto, em termos quantitativos, a narrativa do cenário B leva a uma concretização mais rápida da conjuntura entre hídrica explanada para o cenário A. Por exemplo, comparando os resultados do cenário A, no período de janeiro de 2049 a dezembro de 2051 (ver figura 5.57), com os resultados do cenário B, no período de janeiro de 2024 a dezembro de 2026, percebe-se que estes se assemelham em termos quantitativos da diferença entre disponibilidade hídrica e demanda nos períodos de estiagem.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

Este trabalho de Dissertação apresentou uma metodologia para a análise de cenários futuros de disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica, levando-se em consideração a variação de alguns fatores climáticos e a evolução dos fatores intervenientes, julgados mais relevantes, ao uso dos recursos hídricos.

Como aplicação e estudo de caso desta metodologia, foram gerados cenários climáticos, intervenientes à disponibilidade hídrica, e cenários sócio-econômicos, intervenientes à demanda hídrica, para a bacia da Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Tietê-Jacaré, e então avaliadas a evolução futura da relação entre oferta hídrica superficial e demanda hídrica para o abastecimento público, das indústrias, atividade da irrigação, pecuária e demanda para a diluição de efluentes orgânicos lançados nos mananciais de superfície.

As etapas de trabalho, efetuadas para se atingir o objetivo final de avaliação da relação entre disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica foram quatro, a saber: modelar e simular séries sintéticas de precipitação segundo a narrativa de cenários climáticos futuros; modelar e simular a disponibilidade hídrica superficial segundo a narrativa de cenários climáticos futuros; modelar e simular a demanda por recursos hídricos segundo a narrativa de cenários sócio-econômicos futuros; simular balanços entre disponibilidade hídrica superficial e demanda por recursos hídricos. Estas etapas foram efetuadas sobre as nove sub-bacias componentes da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré.

- ***Modelagem e Simulação das Séries Sintéticas de Precipitação.***

A modelagem e a simulação das séries sintéticas de precipitações e a respectiva caracterização estatística das séries históricas foram efetuadas sobre uma base de registros históricos de postos pluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Procurou-se escolher um período de tempo o maior possível, para a formação da matriz de dados históricos usada no modelo estocástico linear, e que contivesse um maior número possível de postos pluviométricos, na qual o conjunto destes postos pluviométricos fosse o mais representativo possível da distribuição espacial das precipitações sobre as áreas de estudo.

Para a formação de uma matriz de dados históricos para o modelo estocástico, segundo o critério do parágrafo anterior, foram encontradas várias dificuldades no que diz respeito à concordância temporal dos registros dos postos pluviométricos de uma mesma sub-bacia de estudo. Esta dificuldade, segundo o critério adotado, limitou o intervalo de tempo usado nos estudos prospectivos a 10 anos prejudicando, desta forma, uma melhor análise da tendência de evolução das séries históricas, uma vez que este intervalo de tempo é curto para se avaliar este tipo de padrão de uma série de dados hidrológicos.

Embora tenha havido dificuldades na formação de uma matriz de dados para a geração destas séries sintéticas, a metodologia proposta pelo autor deste trabalho se mostrou eficiente na inferência de alguns efeitos climáticos sobre o regime de precipitações. O autor julgou satisfatória a combinação realizada entre metodologias estocásticas e metodologias determinísticas e empíricas, para se chegar a efetuação desta etapa.

- ***Modelagem e Simulação da Disponibilidade Hídrica Superficial.***

Para se estimar a disponibilidade hídrica superficial, segundo a narrativa de cenários climáticos futuros intervenientes aos processos de formação das precipitações, fez-se necessário a adoção de um modelo que simulasse os processos de chuva-vazão. A disponibilidade hídrica superficial foi estimada em termos da vazão nos exutórios das sub-bacias em questão. O modelo adotado neste trabalho foi o HEC-HMS 2.1 (USACE).

Uma vez que se quis estimar a disponibilidade hídrica superficial para longos períodos de tempo, fez-se necessária a adoção de um grupo de métodos que levasse em conta a variação das variáveis de estado das sub-bacias ao longo do tempo. Métodos deste tipo, que descrevem a dinâmica de armazenamentos e transferências das massas d'água entre os diversos componentes de uma bacia, contém um grande número de parâmetros que, para a sua estimativa, necessitam de uma boa caracterização da área de estudo.

Combinando uma premência de dados regionais característicos dos parâmetros mencionados, com heterogeneidade espacial das características das sub-bacias e com a escala geográfica do trabalho, a estimativa inicial dos parâmetros, e os processos de calibração e verificação subseqüentes foram efetuados com o auxílio de literatura

específica destinada ao HEC-HMS 2.1 e artigos de trabalhos similares com a mesma ferramenta e metodologia similar.

Quando da simulação dos processos de chuva-vazão, a partir das séries sintéticas futuras geradas com tendências de diminuição dos regimes de precipitação, não se constatou, em muitos casos, uma sensibilidade do modelo à diminuição das precipitações, no que diz respeito às vazões. O autor concluiu que isto se deve à distribuição aleatória das precipitações geradas com o modelo estocástico linear.

- ***Modelagem e Simulação das Demandas Hídricas.***

As estimativas de demanda por recursos hídricos, nos setores na agricultura irrigada, pecuária, indústria, abastecimento e diluição de efluentes orgânicos domésticos e industriais, foram bastante condicionadas à falta de dados afins, à incoerência de registros de mesma natureza entre instituições afins, à falta de uma homogeneidade nas dimensões espacial e temporal dos dados, à dificuldade de acesso e organização de inventários de registros.

Todas estas dificuldades supracitadas condicionaram e orientaram a metodologia de estimativa das demandas de tal forma que uma série de suposições, suposições estas baseadas principalmente em dados de regiões diversas, tiveram que ser feitas para a efetivação do trabalho.

- ***Simulação da Relação entre Disponibilidade Hídrica e Demanda Hídrica.***

Observa-se, pelos resultados explanados no último subitem do item 5 de resultados, que todas as etapas acima descritas, que comportam a metodologia proposta, levaram a um resultado, intuitivamente esperado, da evolução para uma relação crítica entre demanda e disponibilidade hídrica superficial, principalmente nos períodos de estiagem quando as demandas são maiores, devido à atividade sazonal da irrigação, e à disponibilidade hídrica superficial ser menor, devido à uma quantidade menor de chuvas.

A metodologia adotada também evidenciou a defasagem esperada entre os picos de disponibilidade hídrica e demanda hídrica. Isto ocorre devido ao comportamento sazonal das precipitações que, em períodos de estiagem de chuvas, provocam uma redução da disponibilidade hídrica superficial e um aumento do consumo,

principalmente devido à atividade da irrigação. Em períodos de chuvas frequentes a disponibilidade hídrica é, naturalmente, bem maior e a demanda se reduz por não haver necessidade, por exemplo, de se captar águas dos mananciais para a irrigação.

Embora o número de incertezas e suposições, para se chegar ao objetivo final deste trabalho de Dissertação, tenha sido grande, a metodologia adotada respondeu bem ao resultado esperado.

Devido a este grande número de incerteza e suposições, o autor julga que o resultado pontual, ou seja, do balanço hídrico numa única sub-bacia, seja importante. O melhor resultado deste trabalho, segundo o julgamento do autor, é o comportamento tendencial e relativo entre as sub-bacias no que diz respeito à evolução para uma situação de escassez de recursos hídricos.

O comportamento tendencial pontual reflete a orientação correta que foi a metodologia, embora os resultados sejam função e uma gama de incertezas.

O comportamento relativo evolutivo é bem mais importante pois mostra a ordem temporal em que as sub-bacias irão entrar em situação de escassez de recursos hídricos, evidenciando tendências de reversão de água entre elas por causa da heterogeneidade espacial futura das relações de disponibilidade hídrica superficial e demanda hídrica.

Embora o número de incertezas e suposições acerca dos resultados, o autor conclui que as ocorrências registradas nos resultados supra explanados são factíveis.

Com relação aos cenários gerados, remetendo-se aos comentários explanados quando da exposição dos resultados, conclui-se, por fim, que o cenário climático alternativo é o que provocou, segundo os resultados das simulações, a menor disponibilidade hídrica. Conclui-se também que o cenário sócio-econômico alternativo foi o que apresentou um maior impacto sobre a demanda por recursos hídricos.

Na composição dos cenários, o cenário B, que é a composição do cenário climático de menor disponibilidade hídrica com o cenário sócio-econômico de maior demanda hídrica, resulta na situação mais crítica da relação entre oferta e demanda.

Esta conclusão gera uma série de recomendações de iniciativas a serem tomadas no âmbito regional, para a atenuação da perspectiva futura de escassez hídrica no que diz respeito ao:

- Aumento da eficiência no uso dos recursos hídricos, principalmente por parte do setor da irrigação.

- Investimento na pesquisa e formação de registros de dados intervenientes a planos de bacia que visem uma gestão atual pró-ativa dos recursos hídricos.
- Aumento da eficiência e implantação de novos processos de remoção dos componentes poluentes no tratamento das águas servidas.
- Retificação e construção de redes de abastecimento público para a atenuação das perdas de água dos sistemas.
- Valoração econômica e classificação da água como insumo de maior valor às atividades produtivas induzindo a um uso mais eficiente dos recursos hídricos.
- Ratificação e educação de forma pró-ativa quanto a ordem de prioridade de consumo da água, para se evitar um conflito eminente entre setores usuários.
- Conscientização dos usuários de água no que diz respeito a finalidade deste recurso natural.
- Adoção de um protocolo padronizado de ações, estruturado numa rede de precedências, que oriente e coordene as ações setoriais quanto à gestão ótima e pró-ativa dos recursos hídricos.

Uma vez que se está evoluindo para uma gestão descentralizada dos recursos hídricos, tanto em termos jurídicos e institucionais, é de suma importância a conscientização dos tomadores de decisão para a adoção de instrumentos que coordenem os diversos agentes e instituições intervenientes à gestão dos recursos hídricos.

O autor deste trabalho de Dissertação percebe que protocolos dessa natureza, que se configurem numa rede de relações e precedências, devem ser adotados para que se proceda à uma gestão ordenada e pró-ativa dos recursos hídricos, objetivando uma constância ótima no tempo do manejo das águas.

Uma proposta de protocolo encontra-se nos anexos deste trabalho de Dissertação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ALCAMO, J.; HENRICHS, T.; RÖSCH, T. (2000). World Water in 2025 – Global Modeling and Scenario Analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. Kassel World Water Series – Report n.º 2. University of Kassel – Center for Environmental Systems Research. Kassel, Germany.
- ARAÚJO, J. C.; DÖLL, P.; GÜNTNER, A.; KROL, M.; ABREU, C. B. R.; HAUSCHILD, M.; MENDIONDO, E. M.; (2004). Water Scarcity Under Scenarios for Global Climate Change and Regional Development in Semiarid Northeastern Brazil. *Water International*, Volume 29, Number 2, Pages 209-220, June 2004 – International Water Resources Association.
- BABOVIC, V.; LARSEN, L. C. (1998). System Modeling Revisited – Verification, Confirmation and the Role of Uncertainty Analysis. *Proceedings of the Third International Conference on Hydroinformatics*. Copenhagen, Denmark. 1998.
- BENNETT, T. H. (1998). Development and Application of a Continuous Soil Moisture Accounting Algorithm for the HEC-HMS. MS Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.
- CARRERA, J. F. & GARRIDO, J. R. (2003). *Economia dos Recursos Hídricos*. Salvador. Editora da Universidade Federal da Bahia – EDUFBA. 458p.
- CBH-TJ (2000). Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré – Relatório Zero - Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré – Relatório Final n.º 40.674, 528p. 1 CD-ROM.
- CERH (1999). Conselho Estadual dos Recursos Hídricos - Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo, 128p. (fonte: <http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/basecon/perh2000idx.html>)
- CHURCHILL, M. A.; ELMORE, H. L.; BUCKINGHAM, R. A. (1962). The prediction of stream reaeration rates. *Journal Sanitary Engineering Division, ASCE*, 88 (4). July 1962, p. 1-46.
- CRHEA/USP (2004). Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Banco de Dados de Observações Hidrológicas, CD-ROM.

- CUNDERLIK, J. M.; SIMONOVIC, P. S. (2004). Calibration, Verification and Sensitivity Analysis of the HEC-HMS Hydrologic Model. CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions. Project Report IV. August, 2004.
- DAEE (1990). Departamento de Águas e Energia Elétrica - Plano Estadual de Recursos Hídricos: primeiro plano do Estado de São Paulo - Síntese. São Paulo: DAEE. 120p. il.
- DAEE (1998). Departamento de Águas e Energia Elétrica - Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos - CTH. Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo (Atualizados até 1997). São Paulo. 1 CD-ROM.
- DAEE (1998). Departamento de Águas e Energia Elétrica - Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos - CTH. Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo (Atualizados até 1997). São Paulo. 1 CD-ROM.
- EMBRAPA-CPATSA/SUDENE (1984). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Projeto Sertanejo. Captação e conservação de água de chuva para consumo humano - cisternas rurais - dimensionamento, construção e manejo. Circular Técnica n.º 12.
- EMBRAPA (2005). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Boletim Agrometeorológico do Café. (fonte: <http://www22.sede.embrapa.br/cafe/consorcio/boletim/>).
- FAO (1992). Food and Agricultural Organization - CROPWAT – A Computer Program for Irrigation Planning and Management. FAO Irrigation and Drainage Paper 46, Rome.
- GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. (2003) (org). Global Change and Regional Impacts: Water Availability and Vulnerability of Ecosystems and Society in the Semiarid Northeast of Brazil. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 424.p.
- HAUSCHILD, M.; DÖLL, P. (2000) Water Use in Semi-Arid Northeastern Brazil – Modeling and Scenarios Analysis. Kassel World Water Series – Report n.º 3. University of Kassel – Center for Environmental Systems Research. Kassel, Germany.
- IBGE (2000). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Contagem da População, Rio de Janeiro.

- IBGE (ed) (1995-1996a). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Censos Econômicos de 1995 – 1996. Censo Agropecuário Brasileiro. Rio de Janeiro.
- IMAGE (2001). An Integrated Model to Assess the Global Environment – An Implementation of the SRES Scenarios.
- IPCC, (2000). Intergovernmental Panel on Climate Change - Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge. pp. 599.
- IPCC (2001). Intergovernmental Panel on Climate Change - Climate Change 2000. The science of climate change. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPT. (1987). Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares: manual de procedimentos para avaliação. São Paulo. 74p. (IPT. Publicação, 1 732).
- KELMAN, J. (1977). Stochastic Modeling of hydrologic Intermittent Daily Processes. Colorado State University Hydrology Paper n.º 89.
- KELMAN, J.; OLIVEIRA, G. C.; PEREIRA, M. V. F.; COSTA, C.C.G. (1982). Modelos de Séries Hidrológicas. Manual de Metodologia, Relatório Técnico CEPEL n.º 113/81-A, Revisão 1.
- KELMAN, J. (1997). Gerenciamento de Recursos Hídricos: Outorga e Cobrança. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória – ES.
- KOTTEGODA, N. T. (1980). Stochastic Water Resource Technology. The MacMillan Press Ltd. p. 125-130.
- LAPPONI, J. C. (1997). Estatística usando Excel 5 e 7. Lapponi Treinamento e Editora. 420p.
- LEI, J.; SCHILLING, W. (1996). Preliminary Uncertainty Analysis – A Prerequisite for Assessing the Predictive Uncertainty of Hydrological Models. Water Science and Technology, vol. 33, n.º 2, p. 79-90.
- MAMDOUH, S.; VAN OORSCHOT, H. J. L.; DE LANGE, S. J. (1993). Statistical Analysis in Water Resources Engineering. Applied Hydrology Monographs 1. A.A Balkema Publishers. p. 392.
- MCMAHON, T. A.; MEIN, R. G. (1986). River and Reservoir Yield. Water Resources Publications. p. 223-295.
- MENDIONDO, E. M. (2004). VWP - Virtual Water Problem Reloaded. (Fonte: <http://www.shs.eesc.usp.br/laboratorios/hidraulica/download/shs5874.zip>).

- MONTEIRO, C.A. de F. (1973). A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo sob a forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia/ USP.
- MOURA, M.; ANDRADE, E. (2003). Macroeconomia. Coleção Biblioteca Valor. Publifolha.
- OBEYSEKERA, J. T. B.; TABIOS III, G. Q.; SALAS, J. D. (1987) On parameter estimation of temporal rainfall models. *Water Resources Research*, v. 23, nº 10, p. 1837-1850, Oct.,1987.
- ONS (2002). Operador Nacional do Sistema Elétrico / Diretoria de Planejamento e Programação da Operação - Inventário das Restrições Operativas Hidráulicas dos Aproveitamentos Hidrelétricos. Novembro de 2002.
- PINO, F.A. *et al.* (orgs.). (1997). Levantamento Censitário de Unidades de Produção Agrícola do Estado de São Paulo. São Paulo: IEA/ CATI/ SAA. 4v. (Projeto LUPA).
- SALAS, J. D. (1993). Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. In: MAIDMENT, D.R. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw Hill Inc., 1993. p. 19.1-19.72.
- SRH/MMA (2000). Secretaria de Recursos Hídricos/Ministério do Meio Ambiente – Diretoria do Programa de Implementação da Gestão dos Recursos Hídricos – Gerência de Implementação dos Instrumentos da Política – Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Usuários da Água. Manual do Sistema Quali-quantitativo de Análise de Outorgas – SQAQ. Brasília, DF.
- SRH/MMA (2003). Secretaria de Recursos Hídricos/Ministério do Meio Ambiente - Plano Nacional de Recursos Hídricos – PNRH. (Fonte: <http://pnrh.cnrh-srh.gov.br>)
- SANT'ANNA NETO, J.L. (1995). As chuvas no Estado de São Paulo: contribuição ao estudo da variabilidade e tendência da pluviosidade na perspectiva da análise geográfica. São Paulo. (Tese de Doutorado apresentada ao departamento de Geografia - FFLCH/ USP).
- SANTOS, F.D. (2003) Água e Alterações Climáticas, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 24pp.
- SEADE (1998). Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados - Anuário Estatístico do Estado de São Paulo. São Paulo. 927p.

- SEFAZ. (1999). Secretaria de Fazenda do Estado de São Paulo - Índice de Participação dos Municípios na Arrecadação do ICMS: ano base de 1997. (Fonte: <http://www.fazenda.sp.gov.br/indice%20de%20participacao/fazip.htm>).
- SIGRH (2005). Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo - Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo. (Fonte: <http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu>)
- SCS (1957). Soil Conservation Service - Engineering Handbook: section 4 Hydrology. Washington: U.S. Department of Agricultural. Supplement A.
- SCS (1975). Soil Conservation Service - Urban Hydrology for Small Watersheds. Washington: U.S. Department of Agricultural. (Technical Release, n. 55).
- SETZER, J. (1966). Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo. São Paulo: Comissão Internacional da Bacia do Rio Paraná-Uruguai.
- SPERLING, M. V. (1995). Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos, 2.^a ed., Belo Horizonte – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Geras.
- TUCCI, C. E. M. (1993) (org.). Hidrologia: Ciência e Aplicação, 2.^a ed., Editora da Universidade, 943p.
- TUCCI, C.E.M. (1998) Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Edit. Universidade/UFRGS/ABRH.
- USACE (2000). Hydrological Engineering Center / US Army Corps of Engineers–HMS – Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual, March 2000.
- USACE (2001). Hydrological Engineering Center / US Army Corps of Engineers–HMS – Hydrologic Modeling System. User's Manual, version 2.1, January 2001.
- USGS (1998). U.S. Geological Survey - National Water Use Data 1995.
- VBA (1999). VBA Consultores – Projeto de Transposição das Águas do Rio São Francisco. Ministério da Integração Nacional.
- WALKER, B.; STEFFENS, W. L. (1999). The Nature of Global Change. In: Walker B. Steffen W. L., Canadell J., Ingram J. (eds) The terrestrial biosphere and global change – implications for natural and managed ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge, pag. 1-19.