

**ROGÉRIO SOLIANI STUDART**

**VALORAÇÃO DOS SERVIÇOS AMBIENTAIS ASSOCIADA À  
AUTODEPURAÇÃO DA ÁGUA DO RIO JAGUARIBE-CE EM UM  
CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Francisco Suetônio Bastos Mota

FORTALEZA – CE

2013

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Saneamento Ambiental, outorgado pela Universidade Federal do Ceará, e encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca Central da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta Dissertação é permitida, desde que seja feita de acordo com as normas da ética científica.

---

Rogério Soliani Studart

Dissertação aprovada em \_\_.\_\_.2013

---

Prof. Francisco Suetônio Bastos Mota (orientador), Doutor  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Francisco Assis de Souza Filho, Doutor  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Antonio Clécio Fontelles Thomaz, Doutor  
Universidade Estadual do Ceará

*“Nem tudo que se enfrenta pode ser  
modificado, mas nada pode ser  
modificado até que seja enfrentado”.*

*Albert Einstein*

Aos meus dois tesouros, minha esposa Ticiania  
e meu filho Rogerinho, sempre presentes em  
todos os momentos de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos ao Prof. Suetônio Mota, pela sua orientação experiente, segura e competente; ao prof. Francisco Assis de Souza Filho, por me despertar para o tema e seu constante estímulo ao longo do curso e ao prof. Clécio Thomaz, pelas observações pertinentes na leitura da dissertação.

Aos colegas Wictor Edney Dajtenko Lemos e Cleiton da Silva Silveira, pela imprescindível ajuda no entendimento do programa computacional QUAL2E e na formulação dos cenários de mudanças climáticas.

À profa. Renata Luna, pelo auxílio nas ilustrações e mapas, à Shirley Gomes, Edineuza da Silva e Umbelina Caldas Neta, pela imensa ajuda e gentileza sempre a mim dispensada por todas.

Meus agradecimentos especiais à Teresinha Alves, pelo apoio ao longo de todo o meu curso de Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro, sem o qual não teria sido possível realizar esta pesquisa.

# SUMÁRIO

<u>LISTA DE FIGURAS</u>	<u>viii</u>
<u>LISTA DE TABELAS</u>	<u>ix</u>
<u>LISTA DE ABREVIATURAS</u>	<u>x</u>
<u>RESUMO</u>	<u>xi</u>
<u>ABSTRACT</u>	<u>xii</u>
<u>1. INTRODUÇÃO</u>	<u>13</u>
1.1. Formulação do Problema	14
1.2. Objetivos	18
1.3. Objetivos específicos	18
1.4. Organização do Trabalho	19
<u>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>20</u>
2.1. Bens e Serviços Ambientais	20
2.2. A autodepuração em corpos de água	22
2.3. A Teoria Econômica e as Questões Ambientais	24
2.4. Valoração do Meio Ambiente	30
2.5. Métodos de Valoração dos Serviços Ambientais	33
2.6. Mudanças Climáticas	44
<u>3. MATERIAL E MÉTODOS</u>	<u>53</u>
3.1. Área de Estudo	53
3.2. Definição da Topologia a ser simulada	54
3.3. Estimativa das vazões e da carga poluidora lançada no rio Jaguaribe por cada centro urbano	54
3.4. Modelo Numérico de Qualidade de Água Utilizado	56
3.5. Modelo de Valoração Ambiental adotado	58
<u>4. RESULTADOS</u>	<u>62</u>

4.1.	Definição das vazões de esgoto lançada no rio Jaguaribe por cada centro urbano	62
4.2.	O serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe	62
4.3.	Topologia e Dados Hidráulicos e Hidrológicos adotados no Modelo QUAL2E	63
4.4.	Resultados do Modelo QUAL2E para o Cenário ZERO (atual)	64
4.5.	Valorando o serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe no Cenário ZERO (atual)	71
4.6.	Impactos das Mudanças Climáticas	72
<u>5.</u>	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	<u>81</u>
<u>6.</u>	<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>83</u>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Localização da Bacia do Rio Jaguaribe em relação ao Estado do Ceará e ao Brasil.....	16
Figura 2.1 - Curva de Poluição Ótima.....	26
Figura 2.2 - Curva de Kuznets Ambiental.....	27
Figura 2.3 - Fontes de valor.....	31
Figura 2.4 - Biosfera finita em relação ao crescente subsistema econômico .....	32
Figura 2.5- Métodos de Valoração Ambiental .....	37
Figura 2.6- Curva genérica de demanda.....	38
Figura 2.7 - Estrutura conceitual de um modelo de circulação global oceânico-atmosférico acoplado.....	48
Figura 3.1 - Localização das sedes municipais ao longo do Rio Jaguaribe à jusante do Açude Castanhão .....	53
Figura 3.2 - Diagrama unifilar com a topologia do sistema modelado .....	54
Figura 3.3 - Relação entre os custos de implantação e a vazão de projeto de ETE para o estado do Ceará.....	61
Figura 4.1 - Metodologia de avaliação dos serviços ambientais no Rio Jaguaribe.....	63
Figura 4.2 - Análise comparativa das Situações A, B e C no Rio Jaguaribe.....	73
Figura 4.3 – Análise Comparativa dos Valores de DBO (em mg/litro) ao longo dos trechos analisados do Rio Jaguaribe estimados para o Cenário Atual (2010) e Cenários Futuros, utilizando os Modelos HadGEM2-AO e CanESM2 .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Municípios com Sistema de Esgotamento Sanitário na Bacia do Jaguaribe (1999) .....	15
Tabela 1.2 - Cidades com Sistema de Esgotamento Sanitário na Bacia do Jaguaribe (2010) .....	17
Tabela 2.1 - Métodos para valoração monetária do meio ambiente .....	34
Tabela 2.2 - Classificação das Técnicas de Valoração de Custos e Benefícios para avaliar as conseqüências sobre a qualidade ambiental .....	35
Tabela 2.3 - Classificação dos Métodos de Valoração Monetária .....	35
Tabela 2.4 - Classificação de Técnicas e Métodos de Valoração.....	37
Tabela 2.5 - Modelos de Circulação Geral do IPCC e os centros de desenvolvimento de cada modelo.....	49
Tabela 3.1 - População residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, em números absolutos e relativos, com indicação da área total e densidade demográfica, segundo os municípios - Ceará - 2010.....	56
Tabela 3.2 - Coeficientes utilizados na simulação .....	57
Tabela 3.3 - Dados meteorológicos de entrada no modelo QUAL2E para 2010 .....	58
Tabela 3.4 - Custo de implantação de ETE por vazão nos municípios pesquisados no estado do Ceará.....	61
Tabela 4.1 – Geração de esgoto doméstico pela população das sedes municipais no trecho do rio Jaguaribe analisado .....	62
Tabela 4.2 - Dados de entrada para o Programa QUAL2E (rio principal – Rio Jaguaribe) 65	
Tabela 4.3 - Dados de entrada para o Programa QUAL2E (tributário – Rio Banabuiú).....	66
Tabela 4.4 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação A (sem autodepuração e sem ETE) .....	67
Tabela 4.5 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação B (com autodepuração e sem ETE) .....	68
Tabela 4.6 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação C (sem autodepuração e com ETE).....	70
Tabela 4.7 - Custos de Tratamento dos Esgotos (por lagoa de estabilização) lançados pelas sedes municipais .....	72
Tabela 4.8 - Modelos do CMIP5 analisados .....	74
Tabela 4.9- Parâmetros de entrada em nos modelos HadGEM2-AO e CanESM2 – (ano 2020 – 2099).....	74
Tabela 4.10 - Resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo HadGEM-AO - (ano 2020 – 2099) .....	75
Tabela 4.11 - Resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo CanESM2 (ano 2020 – 2099).....	77

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

AR4 - FOURTH ASSESSMENT REPORT

AR5 - FIFTH ASSESSMENT REPORT

CMIP5 - COUPLED MODEL INTERCOMPARISON PROJECT PHASE 5

CAGECE – COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ

DBO – DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO

FAR - FIRST ASSESSMENT REPORT

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE

GEE - GASES DO EFEITO ESTUFA

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT PANEL

MCG - MODELOS DE CIRCULAÇÃO GERAL

MCR - MODELOS CLIMÁTICOS REGIONAIS

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS

SAR - SECOND ASSESSMENT REPORT

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO

SRH – SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ

TAR - THIRD ASSESSMENT REPORT

WCC - PRIMEIRA CONFERÊNCIA MUNDIAL SOBRE O CLIMA

WMO - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA

## RESUMO

A poluição dos recursos hídricos, principalmente, decorrente do lançamento de esgotos domésticos sem tratamento ou de sistema de coleta deficitário, gera graves prejuízos ao desenvolvimento sócioeconômico, afetando significativamente a qualidade de vida da população. No Brasil, a coleta e tratamento de esgoto sanitário são considerados precários. O Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe (SRH, 1999) apontou o esgoto doméstico como uma das principais fontes poluidoras da bacia, dado que poucas cidades na bacia possuem sistema público de coleta e tratamento de esgoto. Sendo assim, pode-se afirmar, sem sombra de dúvida, que os centros urbanos na Bacia do Jaguaribe são potenciais poluidores dos seus corpos hídricos por esgotos domésticos, em virtude da não existência de sistema adequado de coleta, tratamento e despejo final de seus efluentes nos corpos receptores. Observa-se, portanto, a importância fundamental do serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe e seus afluentes na diluição e na autodepuração das cargas orgânicas que a eles são destinadas. A precificação deste serviço ambiental induzirá os agentes econômicos a calcularem a relação custo-benefício, caso queiram utilizá-lo. Nesta pesquisa, o custo do serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe foi estimado pelos custos com a instalação de estações de tratamento de esgotos (lagoas de estabilização), implantadas no Estado do Ceará, entre os anos de 2008 e 2010. Foi realizada simulação com o modelo numérico QUAL2BR. O valor total do tratamento estimado para o cenário atual (2010) foi de R\$ 5.658.365,92. Este é o custo que, teoricamente, é fornecido, gratuitamente, pelo Rio Jaguaribe pelos serviços ambientais de autodepuração e de diluição das cargas poluidoras dos efluentes. Outra análise que se fez, foi analisar o impacto das mudanças climáticas na autodepuração do corpo hídrico (em termos de DBO) usando dois modelos de mudança climática: o HadGEM2-AO e o CanESM2.

**Palavras-Chave:** Serviços Ambientais, Valoração Ambiental, Autodepuração, Rio Jaguaribe, Mudanças Climáticas.

## ABSTRACT

The pollution of water resources, mainly arising from the release of untreated domestic sewage collection system or deficit, raises serious damage to the socio-economic development, significantly affecting the quality of life. In Brazil, the collection and treatment of sewage are considered precarious. The Management Plan Basin Water Jaguaribe (SRH, 1999) pointed domestic sewage as a major pollution sources in the basin, given that few cities in the basin have public collection system and wastewater treatment. Thus, one can say without a doubt that urban centers in Jaguaribe Basin are potential polluters of their water bodies by domestic sewage, because of lack of adequate system of collection, treatment and final disposal of their effluents in receiving bodies. There are, therefore, the fundamental importance of the environmental service provided by Jaguaribe River and its tributaries dilution and self-purification of organic loads that they are intended. The pricing of this service environment will induce economic agents to calculate the cost-benefit, if they want to use it. In this research, the cost of the environmental service provided by Jaguaribe River was estimated costs for the installation of sewage treatment plants (stabilization ponds), implemented in the State of Ceará, between the years 2008 and 2010. Simulation was performed with the numerical model QUAL2BR. The total estimated remediation costs for the current scenario (2010) was R\$ 5.658.365,92. This is the cost that theoretically is provided free of charge by Jaguaribe River the environmental services of self-purification and dilution of the pollutant effluent. Another analysis that was done, was to analyze the impact of climate change in the self-purification of the water body (in terms of BOD) using two models of climate change: the HadGEM2-AO and CanESM2.

**Keywords:** Environmental Services, Environmental Valuation, Depuration, Jaguaribe River, Climate Change

## 1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas terrestres vêm sendo modificados pelo homem ao longo de toda a sua história. Entretanto, nunca este processo se deu de uma forma tão rápida e abrangente como nos últimos 50 anos.

Tais transformações, sem dúvida, contribuíram para a melhoria do bem estar da coletividade e para o desenvolvimento econômico das nações. Porém, o modelo de desenvolvimento adotado foi alicerçado fortemente na apropriação dos recursos naturais, gerando externalidades negativas não internalizadas aos custos de produção.

Apenas recentemente, os custos associados a essas mudanças se tornaram aparentes e percebidos pela sociedade. A preservação dos ecossistemas e, conseqüentemente, dos serviços ambientais, não é um caminho economicamente atrativo à primeira vista. No entanto, ao se computar os custos de recuperação ou de despoluição, percebe-se claramente que vale a pena investir na manutenção dos serviços que a natureza presta gratuitamente.

Dentre os vários serviços ambientais, um que adquire cada vez mais importância na percepção da sociedade é a assimilação de dejetos pelos corpos hídricos. A qualidade da água (ou melhor, a falta dela) nos últimos 30 anos vem entrando na pauta dos problemas ambientais a serem priorizados, seja pela mobilização da sociedade, seja pela questão da falta de mananciais de qualidade para abastecer a demanda crescente por água, para os mais variados usos.

A deterioração da qualidade da água dos corpos hídricos se dá, fundamentalmente, por causas antropogênicas, ameaçando ecossistemas aquáticos e destruindo o equilíbrio normalmente apresentado.

A poluição é definida como qualquer alteração provocada em um meio ambiente que venha a prejudicar um uso benéfico que se teria para o mesmo (Política Nacional do Meio Ambiente - Lei nº 6.938/1981). A poluição de um recurso hídrico, por sua vez, equivale a qualquer alteração de suas características, de modo a torná-lo prejudicial às formas de vida que ele normalmente abriga ou que dificulte ou impeça um uso benéfico definido para ele, sendo as suas principais fontes, as que se seguem (MOTA, 2008):

- De origem natural – decomposição de vegetais, erosão das margens, salinização, etc;
- De esgotos domésticos - a partir de fossas negras ou de efluentes de estações de tratamento de esgoto (ETE), no caso de centros urbanos com sistema público de coleta e tratamento de esgotos;
- De origem industrial - provenientes de esgotos industriais ou resíduos dos processos de fabricação que constituem a atividade fim da indústria;
- Das águas de escoamento superficial - que carregam impurezas, detritos orgânicos e inorgânicos para os corpos d'água, tais como sedimentos, lixo, entulhos resultantes de obras civis, etc;
- De origem agro-pastoril - através do carreamento de excrementos de animais, de pesticidas e de fertilizantes para os corpos hídricos;
- Do lixo – através de lixiviados, produzidos nos lixões e depósitos de lixo, que podem alcançar os reservatórios e corpos d'água superficiais, nas suas proximidades, bem como os aquíferos.

### **1.1. Formulação do Problema**

A poluição dos recursos hídricos, principalmente, decorrentes do lançamento de esgotos domésticos sem tratamento ou sistema de coleta deficitário, gera graves prejuízos ao desenvolvimento sócio-econômico, afetando significativamente a qualidade de vida da população. No Brasil, a coleta e tratamento de esgoto sanitário são considerados precários.

Segundo o Sistema Nacional de Informação de Saneamento (SNIS, 2010), já atualizado pelo último censo no país, o índice de atendimento com rede de água no Brasil é alto: 81,1%, sendo de 92,% nas zonas urbanas. Entretanto, o nível de coleta de esgotos cai para cerca da metade: 46,2% do total e 53,5% nas zonas urbanas. Do total de esgoto coletado, apenas 37,9% é tratado.

Na região Nordeste, o índice de atendimento com rede de esgoto é ainda menor que a média brasileira – 19% do total e 26,1% nas zonas urbanas. Do total de esgoto coletado, apenas 32% tem tratamento (SNIS, 2010).

O elevado déficit relacionado aos serviços de esgotamento sanitário explica-se, em parte, pela ausência das companhias estaduais de saneamento na grande maioria dos municípios brasileiros. Enquanto tais companhias atuam com serviços de água em cerca de

81% do total de municípios brasileiros, em relação aos serviços de esgotos, cai para apenas 46,2% do total de domicílios do país.

No Estado do Ceará, este desempenho não é diferente. Isto pode ser inferido pelo Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe (SRH, 1999), a maior bacia do Estado, onde vivia cerca de 30% de sua população (Figura 1.1).

O Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe (SRH, 1999) identificou, pelo menos em nível global, as fontes potenciais de poluição dos recursos hídricos. E apontou o esgoto doméstico como uma das principais fontes poluidoras da bacia, dado que poucas cidades na bacia possuem sistema público de coleta e tratamento de esgoto (Tabela 1.1). Os números apontam que apenas quatro sedes municipais possuem sistema de esgotamento sanitário. E mesma aquelas que o possuem, à exceção feita a São João do Jaguaribe, atendem um percentual muito pequeno da população do município.

Tabela 1.1 - Municípios com Sistema de Esgotamento Sanitário na Bacia do Jaguaribe (1999)

Localidade	População Urbana (hab)	População Atendida (hab)	Nível de Atendimento (%)	Quantidade de Ligações	Órgão Responsável
Iguatu	50.355	1.863	3,69	414	FUNASA
Juazeiro do Norte	179.345	24.374	13,59	5.253	CAGECE
Limoeiro do Norte	25.918	1.989	7,67	442	FUNASA
São João do Jaguaribe	2.642	1.452	54,95	324	FUNASA

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde  
CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará  
Fonte: SRH (1999)

Analisando-se o SNIS (2010), observou-se que o número de municípios que contam com coleta e/ou tratamento de esgotos cresceu, desde 1999, de 4 para 25 (Tabela 1.2). Observa-se que, mesmo com o aumento significativo no número de municípios atendidos, o índice de atendimento da população total ainda é muito pequeno. No que se refere às zonas urbanas, a grande maioria dos municípios atende menos de 10% da população. Observa-se também o baixo índice de tratamento dos esgotos coletados.

Sendo assim, pode-se afirmar, sem sombra de dúvida, que os centros urbanos na Bacia do Jaguaribe, são potenciais poluidores dos seus corpos hídricos por esgotos domésticos, em virtude da não existência de sistema adequado de coleta, tratamento e despejo final de seus efluentes nos corpos receptores.

Figura 1.1- Localização da Bacia do Rio Jaguaribe em relação ao Estado do Ceará e ao Brasil



Fonte: O Autor (2013)

Observa-se, portanto, a importância fundamental do serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe e seus afluentes na diluição e na autodepuração das cargas orgânicas que a eles são destinadas. Sabe-se que há um limite máximo que este serviço pode prestar e que a poluição e a degradação da qualidade da água têm que deixar de ser vistas como uma mera “externalidade”, com a socialização dos prejuízos.

Há que se ressaltar ainda o fato do Rio Jaguaribe estar localizado no semiárido brasileiro, a região mais seca do país, caracterizada pela alta variabilidade anual das precipitações e dos deflúvios superficiais. É um rio intermitente, perenizado por reservatórios considerados estratégicos para o abastecimento de água de todo o Estado. Sua água escassa é disputada para os mais variados usos, com seu padrão de qualidade sendo deteriorado continuamente pelo recebimento de cargas poluidoras ao longo de todo o seu percurso, principalmente pela falta de percepção por parte da sociedade do valor do serviço ambiental prestado pelo rio.

Tabela 1.2 - Cidades com Sistema de Esgotamento Sanitário na Bacia do Jaguaribe (2010)

Sedes Municipais/ Distritos	Índice de Atendimento com rede esgoto		Índice de Tratamento de Esgoto
	População Total (%)	População Urbana (%)	Esgoto gerado (%)
Acopiara	6,5	13,3	26,2
Altaneira	6,1	8,5	19
Aracati	0,8	1,2	3,6
Altaneira	6,1	8,5	19
Aurora	5,6	11,7	19,3
Barbalha	6,6	9,6	15,2
Barro	5,3	8,6	13,6
Aracati	0,8	1,2	3,6
Aurora	5,6	11,7	19,3
Campos Sales	6,9	9,6	24,7
Catarina	9	19,4	38
Cedro	3,7	6	9,6
Granjeiro	8,7	29,3	54,8
Jaguaretama	1,5	3,1	4,5
Jaguaribara	27,9	40,7	89,1
Juazeiro do Norte	22,5	23,4	32
Mauriti	3	5,7	16,9
Missão Velha	1	2,2	3,9
Porteiras	2,2	5,4	13,6
Quixadá	7,5	10,5	14,7
Russas	13,1	20,4	40,3
Saboeiro	1	1,9	4,9
Taboleiro do Norte	5,6	8,6	17
Tarrafas	1,2	4,2	10,3
Tauá	3,9	6,8	10,3

Fonte: SNIS (2010)

A mensuração deste valor pode vir a ser um instrumento extremamente útil para a formulação de políticas ambientais e de recursos hídricos, vez que fornece um dado concreto e objetivo sobre parte do valor do recurso ambiental, antes ignorado.

A precificação deste serviço ambiental induzirá os agentes econômicos a calcularem a relação custo-benefício, caso queiram utilizá-lo. O custo total dessa utilização será composto pelos custos com a instalação e manutenção de sistemas de tratamento de resíduos (custo de controle) e pelos custos referentes ao pagamento pelo uso do serviço de diluição e autodepuração (custo da poluição).

Um complicador adicional que vem amplificar sobremaneira a complexidade do problema descrito na bacia é o aquecimento global e as decorrentes mudanças do clima. Questão das mais relevantes para a sociedade moderna é, talvez, o grande desafio a ser enfrentado no século 21.

Quantificar os impactos das mudanças climáticas não é tarefa fácil. Muitas são as incertezas envolvidas no processo. Pode-se citar pelo menos duas: incertezas quanto às emissões futuras e como o clima irá reagir a estas emissões. No que se refere às primeiras, adotam-se projeções climáticas supondo-se cenários de população futura, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas. Para incorporar as últimas, utilizam-se modelos que procuram representar o sistema climático.

Sendo assim, a presente pesquisa pretende analisar os impactos das mudanças climáticas nos serviços ambientais prestados pelo principal rio do Estado do Ceará – o rio Jaguaribe. Para tanto, serão selecionados cenários de emissão de gases de efeito estufa recém divulgadas em 2013 pelo IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, no seu quinto relatório (Fifth Assessment Report - AR5). Até o momento, a avaliação deste serviço tem sido baseada nos dados hidrológicos históricos, assumindo a estacionaridade do clima e das vazões. No entanto, as mudanças climáticas previstas já não permitem tais pressupostos. O impacto da mudança climática neste corpo hídrico poderá ser significativo, o que torna urgente e necessário avaliar suas consequências e estabelecer, com a devida antecedência, instrumentos para enfrentar este novo e grande desafio.

## **1.2. Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo propor metodologia de avaliação do valor dos serviços ambientais associado ao processo de diluição e autodepuração dos corpos de água, incorporando os cenários de mudanças climáticas, tendo como estudo de caso o Rio Jaguaribe, no Estado do Ceará.

## **1.3. Objetivos específicos**

- Avaliação da capacidade de autodepuração (matéria orgânica) de hidrossistemas no cenário atual;
- Avaliar os custos de tratamento de efluentes domésticos no cenário atual e apresentar um indicativo do preço do serviço ambiental prestado gratuitamente pelo Rio Jaguaribe;

- Analisar o impacto das prospectivas mudanças climáticas no serviço ambiental de autodepuração do Rio Jaguaribe.

#### **1.4. Organização do Trabalho**

O trabalho foi organizado em cinco capítulos. O presente capítulo trata da formulação do problema, do escopo do trabalho e discorre sobre a maneira como o documento foi organizado.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os bens ambientais, a autodepuração de corpos d'água, a forma que a Economia vem tratando o Meio Ambiente, os métodos de valoração ambiental e uma breve revisão sobre mudanças climáticas

O Capítulo 3 descreve o procedimento que foi seguido ao longo da pesquisa, descrevendo a área estudada, a topologia adotada, a forma de estimar as cargas poluidoras e uma descrição sobre o modelo QUAL2E, utilizado na pesquisa.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e o Capítulo 5, as conclusões desta pesquisa e faz algumas sugestões de estudos complementares. E finalmente, o Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A base conceitual deste estudo compõe-se de dois grandes blocos. No primeiro, descreve bens e serviços ambientais, apresenta aspectos teóricos da teoria econômica no que se refere ao modo de envolver as questões ambientais, a valoração ambiental e seus principais métodos. São apresentados ainda alguns trabalhos de valoração de serviços ambientais em ambientes fluviais. No segundo, descreve os aspectos teóricos e metodológicos do sistema climático, assim como os cenários de emissões.

### **2.1. Bens e Serviços Ambientais**

Segundo Daly e Farley (2003), são oito os tipos de bens e serviços fornecidos pela natureza, sejam eles bióticos e abióticos: combustíveis fósseis, minerais, água, solo, energia solar, recursos renováveis (biológicos), serviços ecossistêmicos e absorção de resíduos.

O oitavo item da classificação é, na verdade, um tipo de serviço ecossistêmico, mas por suas características econômicas, o autor defende sua inclusão em separado. É evidente que qualquer classificação é simplificada, tendo em vista a enorme complexidade de bens e serviços fornecidos pela natureza. Entretanto, tal tentativa é de fundamental importância para sua aplicação na teoria econômica.

Segundo Dailey (1970), há que se diferenciar os “serviços ecossistêmicos” dos “serviços ambientais”. O autor define serviços ecossistêmicos como aqueles prestados pelos ecossistemas naturais e as espécies que os compõem, na sustentação e preenchimento das condições para a permanência da vida humana na Terra. Já os serviços ambientais, são mais relacionados aos resultados desses processos, quando se relacionam as ações antrópicas à restauração e à manutenção dos serviços ecossistêmicos, enquanto as funções dos ecossistemas são mais associados à sua origem.

Esta distinção é também compartilhada por Helal (2000), quando afirma que os serviços ambientais seriam os responsáveis pela infraestrutura necessária para o estabelecimento das sociedades humanas.

A percepção da deterioração dos serviços ambientais pela sociedade é um fenômeno recente. A primeira iniciativa no sentido de avaliar os danos causados aos ecossistemas e seus impactos na vida humana foi a Millennium Ecosystem Assessment Panel (MEA, 2005), da Organização das Nações Unidas - ONU, iniciada em 2001.

O objetivo do MEA foi a avaliação das consequências das alterações nos ecossistemas e criar o arcabouço científico para as medidas necessárias para a melhoria da conservação e do uso sustentável desses ecossistemas e da sua contribuição para o bem-estar humano. Este gigantesco esforço realizado por uma rede de milhares de cientistas entre 2001 e 2005 concluiu que mais de 60% dos ecossistemas do mundo têm sido utilizados de forma não sustentável.

O MEA classifica os serviços derivados dos ecossistemas naturais em quatro principais conjuntos, a saber: provisionamento, regulação, suporte e cultural, os quais garantem aspectos de bem estar das sociedades humanas. Entre os serviços, podem ser citados:

- A purificação do ar e da água;
- A mitigação das enchentes e da seca;
- A desintoxicação e a decomposição dos dejetos;
- A geração e a renovação do solo e de sua fertilidade;
- A polinização das culturas e da vegetação natural;
- O controle da maioria das potenciais pragas agrícolas;
- A dispersão das sementes e a transferência dos nutrientes;
- A manutenção da biodiversidade, da qual depende a humanidade para sua alimentação, seus medicamentos e para o desenvolvimento industrial;
- A proteção dos raios ultravioletas;
- A participação na estabilização do clima;
- O suporte das diversas culturas da civilização humana, e
- O estímulo estético e intelectual para o espírito humano.

Segundo HäsnerShiki (2004), os serviços ambientais já contam com um reconhecimento na OMC desde 1991, sendo classificados segundo o Acordo Geral de Comércio de Serviços (GATS) por meio de uma Lista de Classificação Setorial de Serviços (W/120) baseada na classificação de produtos das Nações Unidas.

A classificação da OMC apenas indica os tipos de serviços e não chega a ser uma lista exaustiva nem definitiva; baseia-se, sobretudo, no grau de contaminação ou poluição.

A classificação abrange quatro setores relacionados à infraestrutura de:

- Tratamento de águas residuais ou esgoto;
- Tratamento e disposição de resíduos;
- Saneamento e similares; e
- Outros setores relacionados à proteção ambiental.

A maior limitação da classificação da OMC é que esta não representa o estado atual das indústrias ambientais, ao considerar unicamente o controle da poluição e não contemplar serviços de prevenção. Ademais, existe sobreposição nas classificações de serviços ambientais com outros setores de serviços do GATS (como a educação), além de outros que se encontram inseridos na classificação de setores profissionais do GATS (tais como serviços de engenharia, inspeção e auditoria).

## **2.2. A autodepuração em corpos de água**

O lançamento de esgotos sem tratamento promove uma série de danos ao meio ambiente poluindo-o e até contaminando os corpos d'água quando essa poluição for perigosa ao aproveitamento humano. A poluição dos corpos hídricos por lançamento de esgotos pode gerar vários impactos ao meio ambiente, como será visto a diante, e como consequências aos usos desses recursos ou áreas às suas margens pode-se citar (MOTA, 2012):

- Avarias ao abastecimento humano;
- Prejuízos aos diversos usos da água como: agricultura, indústria, recreação, pesca etc.;
- Elevação do custo do tratamento de água para o consumo;
- Agravamento dos problemas de escassez de água, principalmente, no nordeste;
- Assoreamento dos rios, contribuindo para inundações e piorando o uso em transportes;
- Prejuízos aos ecossistemas dependentes do corpo hídrico.

Em relação aos impactos do lançamento de esgotos “in natura” em recursos hídricos, pode-se apontar, principalmente: consumo de oxigênio gerado pela DBO presente nos esgotos, descarga de nutrientes nos corpos hídricos e a contaminação com microorganismos patogênicos indicados pelos coliformes fecais. A carga orgânica presente nos esgotos ao ser lançada no corpo receptor, será consumida majoritariamente pelas bactérias aeróbias existentes no manancial e minoritariamente como resultado da nitrificação. Essas bactérias, ao receberem a carga extra de matéria orgânica, se

multiplicam, gerando maior consumo de oxigênio. A concentração deste tenderá a cair até um mínimo onde, a partir dele, o corpo hídrico poderá se recompor gradativamente, aumentando sua concentração de oxigênio dissolvido e diminuindo a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). A DBO é a necessidade extra de oxigênio para estabilização da matéria orgânica pelas bactérias e é um parâmetro de poluição dos esgotos. Quanto maior for a DBO de um esgoto, maior o impacto gerado pelo seu lançamento. A capacidade de recuperação das características do manancial hídrico após uma interferência externa, como um lançamento de esgotos, é chamado de Autodepuração.

Todo corpo hídrico é capaz de se autodepurar. Entretanto, dependendo das suas peculiaridades, podem ter maior ou menor eficiência nesse aspecto. Há alguns fatores que aumentam a capacidade de autodepuração de um corpo hídrico, entre os quais: diluição; turbulência da água, reações de oxidação e redução, predatismo e aglutinação.

O consumo de oxigênio dissolvido pelas bactérias gera redução de oxigênio dissolvido no corpo hídrico, o que pode ser prejudicial às diversas comunidades de seres vivos presentes nos ambientes lóticos ou lênticos, causando sérios impactos a esses meios. O consumo da matéria orgânica por organismos aeróbios pode até extinguir o oxigênio, o que pode fazer desaparecer esses e gerar outros anaeróbios, que consomem a DBO mais demoradamente e produzem gases e maus odores (MOTA, 2012).

A capacidade ambiental para diluir e autodepurar as cargas orgânicas em um ecossistema aquático descreve uma propriedade inerente do ambiente, que é fornecer bens ambientais para assimilar os resíduos e assim minimizar o impacto de quaisquer atividades naturais ou antrópicas (SOUTHALL *et al.*, 2004). A autodepuração dos corpos d'água é um fenômeno que promove o restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após as alterações induzidas pelos despejos afluentes (VON SPERLING, 1996).

Mesmo em número limitado, as tentativas dos economistas ecológicos e outros pesquisadores para avaliar o valor monetário dos vários serviços ambientais fornecidos por rios estão aumentando. Vários pesquisadores têm estimado o valor ambiental das vazões ecológicas para os mais diversos fins ambientais (LOOMIS *et al.*, 2000; HOLMES *et al.*, 2004; MORRISON; BENNETT, 2004 *apud* OJEDA *et al.*, 2008), incluindo, entre eles, o valor ambiental do processo de autodepuração em rios.

### **2.3. A Teoria Econômica e as Questões Ambientais**

Os atuais níveis de consumo e a sua pressão sobre os recursos naturais, seja como fatores de produção ou sumidouros dos resíduos decorrentes da produção, tornam cada vez mais evidente que é preciso repensar sobre os limites para a utilização dos recursos naturais pela sociedade.

Quando a teoria econômica aborda o meio ambiente, duas análises de pensamento se apresentam: a primeira, tratada no âmbito da economia neoclássica, denominada de Economia Ambiental e a segunda, chamada de Economia Ecológica. As duas são correntes metodológicas da economia, que buscam interpretar o problema ambiental e determinar ações que busquem resultados eficientes, partindo de interpretações acerca das características de tais recursos.

#### **2.3.1. A Economia Ambiental**

A Economia Ambiental tem como pressuposto que o meio ambiente não representa, no longo prazo, entraves à expansão da economia. A economia trabalha sem recursos naturais. Esse esquema neoclássico, que traz implícito uma visão de que os recursos naturais são infinitos, foi objeto de crítica pioneira e sistemática por Georgescu-Roegen (1971), que descreveu o sistema econômico como uma dinâmica de elevação da entropia.

Com o passar do tempo, os recursos naturais passaram a ser incluídos nas representações da função de produção, porém, podendo ser substituídos pelo capital (K) e pelo trabalho (T), partindo da suposição de que as limitações impostas pelos estoques dos recursos naturais (RN), poderiam ser indefinidamente superados pela tecnologia, que os substitui por capital ou trabalho. O sistema econômico passa a ser visto, então, com uma dimensão tal, que a restrição imposta pela disponibilidade de recursos naturais (RN) à sua expansão é apenas relativa, superável indefinidamente pelo progresso científico e tecnológico.

À medida que um recurso natural é esgotado, o progresso científico e tecnológico garante sua substituição por outro recurso, não trazendo este processo de substituição limitação à expansão da economia. A idéia central é o capital (K) compensar a substituição do capital natural (KN), sendo assim as gerações futuras não seriam prejudicadas. Este posicionamento tem sido criticado, uma vez que alguns serviços vitais

fornecidos por algumas categorias de recursos naturais não podem ser substituídos pelo capital gerado pelo homem (ROMEIRO e MAIA, 2011).

Para a Economia Ambiental, os mecanismos de mercado são os mais apropriados para a ampliação indefinida dos limites ambientais. Em se tratando de bens ambientais negociados no mercado (matérias primas como madeira, carvão, petróleo, etc.), a escassez crescente de um determinado bem acarretaria a elevação de seu preço, o que, por sua vez, induziria a novos processos que permitiriam poupá-lo ou mesmo substituí-lo por outro recurso mais abundante.

No caso de bens ambientais não transacionados no mercado, devido a sua natureza de bens públicos (ar, água, ciclos bioquímicos globais de sustentação da vida, capacidade de assimilação de rejeitos, entre outros), o mecanismo de mercado falha, se configurando o que a economia denomina de “externalidade negativa”. Ou seja, mesmo que um agente econômico tenha sofrido o efeito negativo da degradação ambiental provocada por outro agente econômico, aquele não pode ser compensado pelo dano, dado que o bem não é privado.

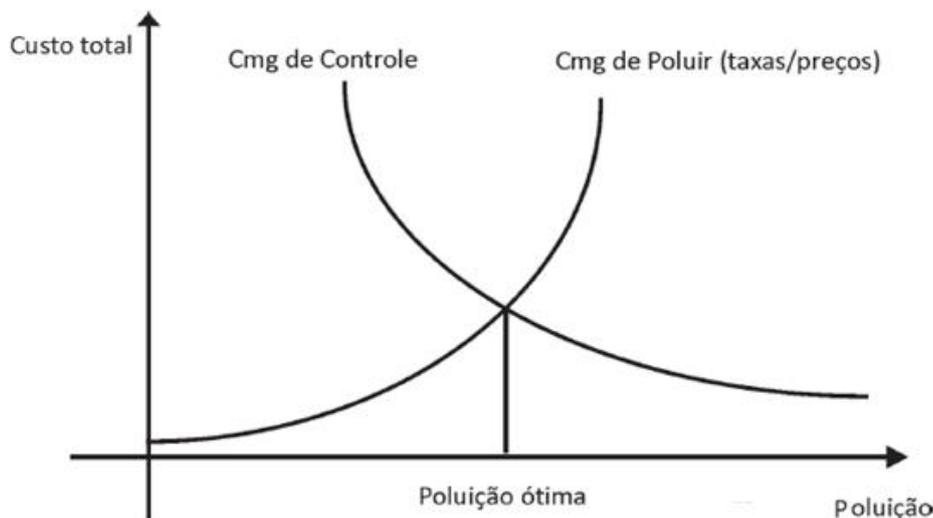
Segundo esta corrente, os problemas da degradação ambiental podem ser resolvidos baseando-se nos mesmos princípios e motivações que levam ao crescimento econômico e ao desenvolvimento. Partindo da premissa que “negócio de todos é negócio de ninguém”, a Economia Ambiental defende que a poluição do ar, da água e destruição das florestas, por exemplo, ocorre porque os mesmos constituem propriedade de todos, e nenhum indivíduo tem motivação financeira para protegê-los.

Assim, o tipo de direito de propriedade atribuído ao meio ambiente –público ou privado - seria o principal determinante para a quantidade de degradação a ser produzida, uma vez que os direitos de propriedade afetam o modo como os recursos são utilizados.

Sendo assim, as soluções podem ser de dois tipos: ou elimina-se o caráter público desses bens e serviços (definição de direitos de propriedade sobre eles) ou faz-se a valoração econômica desses bens, através da imposição de taxas (preços) pelo Estado. Segundo Romeiro e Maia (2011), a primeira solução é de difícil execução, uma vez que esbarraria em custos de transação elevados devido aos inúmeros processos de negociação, envolvendo centenas ou mesmo milhares de agentes. A segunda pressupõe o cálculo dos valores a partir de uma curva marginal de degradação ambiental.

A Figura 2.1 apresenta a evolução dos custos marginais de controle da poluição (equipamentos/tecnologia) e dos custos marginais de poluir (taxas pagas ao Estado).

Figura 2.1 - Curva de Poluição Ótima



Fonte: Romeiro e Maia (2011)

O ponto ideal considerado como “ponto de poluição ótimo” seria aquele no qual as duas curvas se encontram, indicando que os custos totais estão no menor nível possível. Há que se observar que o “ponto de poluição ótimo” tem o viés econômico e não ecológico, pois, como observa Godard (1992), não se pode falar em equilíbrio, do ponto de vista ecológico, quando a capacidade de assimilação do meio ambiente é ultrapassada, uma vez que a poluição permanece.

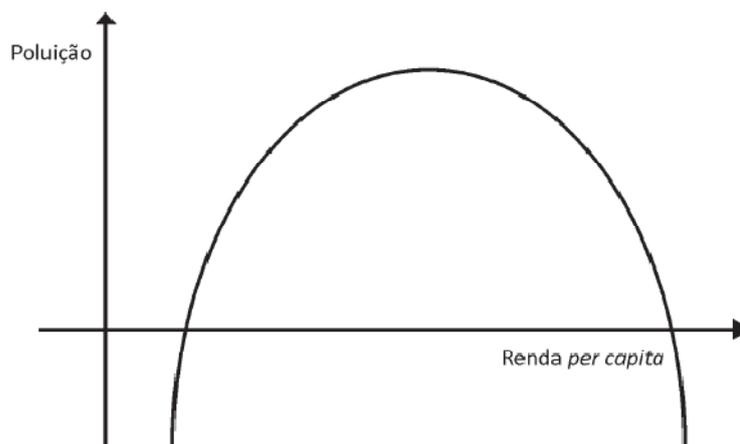
De acordo com a Economia Ambiental, a política ambiental mais eficiente é aquela através da qual os agentes econômicos internalizem os custos da degradação provocada (externalidade negativa), através do pagamento de taxas. Como aponta Romeiro e Maia (2011), a precificação do meio ambiente seria a condição necessária e suficiente de política pública capaz de resolver o problema ambiental.

Segundo Fonseca e Ribeiro (2004), o que se precisa saber, de fato, é se existe uma relação inversa entre crescimento e poluição, ou se é possível almejar um amadurecimento das economias sem que o meio ambiente seja por isto degradado. Nesse contexto, foi desenvolvida uma relação que passaria a ser chamada de Curva de Kuznets Ambiental (CKA), na qual algumas medidas de degradação ambiental aumentariam nos

momentos iniciais do crescimento econômico, porém, eventualmente, diminuiriam quando certo nível de renda fosse alcançado (Stern, 2004).

O conceito da CKA surgiu na década de 1990 para descrever a trajetória temporal da poluição vs. desenvolvimento econômico de um país. Observa-se na Figura 2.2 que, quando o crescimento ocorre em um país extremamente pobre, a poluição inicialmente cresce devido aos aumentos na produção de poluentes, bem como a baixa prioridade que é dada ao controle da degradação ambiental. Uma vez que o país atinge níveis sócio-econômicos mais elevados, sua prioridade muda para a proteção da qualidade ambiental. Se esse efeito renda é forte o suficiente, causará o declínio da poluição. Segundo Deacon e Norman (2004), tal raciocínio sugere que a melhoria ambiental não pode vir sem crescimento econômico.

Figura 2.2 - Curva de Kuznets Ambiental



Fonte: Romeiro e Maia (2011).

De acordo com essa idéia, os países passariam por vários estágios de desenvolvimento. Inicialmente, o processo é marcado pela transição de uma economia agrícola para uma industrializada, resultando na criação do parque industrial, implicando numa pressão cada vez maior sobre o meio ambiente. O próximo estágio caracteriza-se pela maturação da sociedade e da infraestrutura industrial. Este estágio caracteriza-se pelo atendimento das necessidades básicas da sociedade, a qual passa a priorizar o crescimento de setores menos intensivos em recursos e poluição, e o desenvolvimento tecnológico permite a redução de matéria /energia, bem como os rejeitos da produção. No terceiro estágio de desenvolvimento, ocorre o “descolamento” entre o crescimento econômico e a

pressão sobre o meio ambiente, a partir de quando o primeiro não mais implica em um aumento do segundo (GROSSMAN e KRUEGER, 1995; SHAFIK e BANDYOPADHYAY, 1992; SELDEN e SONG, 1994).

Segundo Selden e Song (1994), são vários os fatores responsáveis pela inversão da trajetória positivamente inclinada para uma negativamente inclinada: i) uma elasticidade renda positiva para a qualidade ambiental, ou seja, conforme aumenta a renda, as pessoas tendem a querer mais qualidade ambiental; ii) mudanças na composição da produção e do consumo; iii) níveis maiores de educação ambiental e conscientização das consequências das atividades econômicas sobre o meio ambiente; e iv) sistemas políticos mais abertos. Aumento na rigidez da regulação ambiental, melhorias tecnológicas e a liberalização comercial também são apontados como possíveis causadores do “descolamento” (COLE, 2004; STERN, 2004).

### **2.3.2. A Economia Ecológica**

Segundo Fernandez (2011), a Economia Ecológica é um dos mais recentes ramos da ciência econômica. Apesar de suas motivações remontarem à crítica ambiental nos anos 1960, essa abordagem só veio a se consolidar como corrente no final da década de 1980, com a fundação da International Society for Ecological Economics (ISEE). A Economia Ecológica defende que a atual problemática ambiental não pode ser devidamente compreendida utilizando-se apenas a economia ou a ecologia convencionais. Propõe, portanto, uma análise baseada na relação de interdependência dos dois sistemas.

Essa corrente reconhece que o progresso tecnológico promove a superação de limites circunstanciais, através de duas vertentes: pela maior eficiência no uso dos recursos e pela substituição de recursos exauríveis por outros, renováveis. Reconhece, principalmente, que essa dinâmica esbarra em restrições biofísicas insuperáveis.

A Economia Ecológica defende que a taxa de utilização dos recursos renováveis não pode exceder a sua taxa de regeneração, bem como recomenda a utilização dos recursos não-renováveis a uma taxa não superior à sua taxa de substituição por recursos renováveis. Nesse sentido, a quantidade de resíduos gerada não deve extrapolar a capacidade de suporte do meio ambiente, conservando-se ao mesmo tempo a diversidade biológica (CONSTANZA, 1991).

Segundo Constanza (1994), a Economia Ecológica é uma nova abordagem transdisciplinar que contempla toda a gama de inter-relacionamento entre os sistemas econômico e ecológico. Sendo assim, a diferença primordial entre a Economia Ambiental e a Economia Ecológica, é que a segunda entende a economia como um subsistema do meio ambiente, interagindo e dependendo dele intensamente em dois sentidos, ora como fonte de matéria-prima (insumos), ora como depósito para os resíduos (DALY, 1999). Outro fundamento da economia ecológica é seu comprometimento explícito com um posicionamento valorativo (FERNANDEZ, 2011).

Esta questão também é enfatizada por Ribeiro e Maia (2011), que apontam que a questão central da Economia Ecológica é fazer com que a economia funcione considerando a existência desses limites. A Economia Ambiental neoclássica, por definição, desconsidera a existência de tais limites, supondo a possibilidade de substituição ilimitada dos recursos.

Segundo Daly e Farley (2003), os recursos naturais apresentam algumas das características que dificultam sua alocação de maneira eficiente. A primeira é decorrente da exclusividade, ou seja, a possibilidade de se excluir usuários do uso do bem. Os bens públicos são não-exclusivos, o que dificulta a adoção de medidas que visem à preservação dos mesmos e sua alocação eficiente e em escala sustentável.

A segunda característica é a rivalidade, ou seja, bens considerados rivais são aqueles em que a utilização de uma unidade por uma pessoa proíbe o uso da mesma unidade por outra pessoa. Tal característica é importante e deve ser observada no processo de decisão. Se a utilização de um recurso constituir fonte de impedimento para seu uso posterior, tem-se o problema de quem poderá usufruir desses recursos. Assim, devem ser incluídas, na discussão, as gerações futuras, que também podem ser prejudicadas pela escassez dos recursos caso os mesmos sejam exauridos pela geração presente.

Outras características fontes de falhas de mercado são a congestionabilidade e irreversibilidade. Bens congestionáveis são aqueles que se comportam como não rivais até o ponto em que esgotam sua carga comportando-se, depois disso, como rivais. Como irreversíveis têm-se aqueles recursos que, após sua utilização e degradação, o retorno às condições anteriores é lento, podendo ser até impossível.

Segundo Ribeiro e Maia (2011), no caso dos bens ambientais transacionados no mercado (insumos materiais e energéticos), o esquema analítico convencional pressupõe que a escassez crescente de determinado bem eleva seu preço, induzindo novos processos industriais que permitam poupá-lo e, no limite, substituí-lo por outros recursos mais abundantes, cujos estoques os agentes econômicos supõem conhecer. Entretanto, conforme alerta Daly (1996), os preços refletem a disponibilidade de cada recurso, independentemente do estoque total de recursos, o que impede que eles possam servir para sinalizar um processo de extração ótimo sob o ponto de vista da sustentabilidade.

No caso de bens e serviços ambientais não transacionados no mercado (bens públicos, tais como ar, água, regulação do clima, etc.), o mecanismo de ajuste proposto na Figura 2.1 não leva em conta princípios ecológicos fundamentais para garantir a sustentabilidade. Isto se dá devido a utilização dos recursos ser fundamentalmente vista pelo viés econômico, visto que o objetivo final é minimizar o custo total (alocação eficiente de recursos entre investimentos em controle da poluição e pagamento de taxas para poluir).

#### **2.4. Valoração do Meio Ambiente**

Segundo Romeiro e Maia (2011), sob a perspectiva da Economia Ambiental, valorar o meio ambiente implica unicamente em atribuir-se um valor monetário aos recursos ambientais. O valor econômico total de um bem (VET) é dado pelo somatório do seu valor de uso (VU) e seu valor de não-uso (VNU) (Equação 2.1).

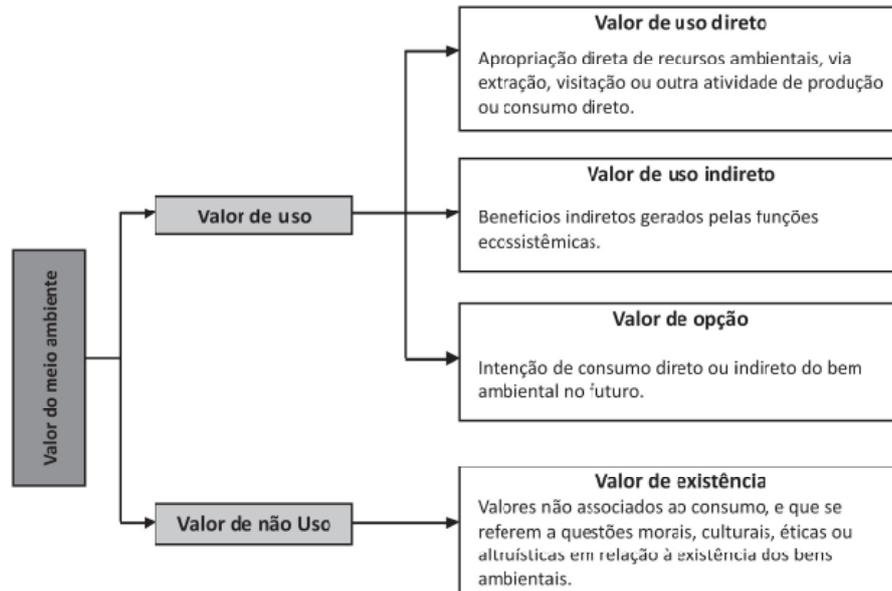
$$\text{VET} = \text{VU} + \text{VNU} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

O valor de uso (VU) pode ainda ser subdividido em: valor de uso direto (VUD), valor de uso indireto (VUI) e valor de opção (VO) (valor de uso potencial) (Equação 2.2).

$$\text{VET} = (\text{VUD} + \text{VUI} + \text{VO}) + \text{VNU} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

O valor de não-uso está relacionado àqueles recursos ambientais que não possuem, aparentemente, um “valor de uso”, porém os agentes econômicos ainda assim estão dispostos a pagar por eles, tendo, portanto, um “valor de existência” (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Fontes de valor



Fonte: Romeiro e Maia (2011).

Para a Economia Ambiental, pode-se avaliar o meio ambiente do mesmo modo como se faz com as demais mercadorias. Perdas irreversíveis não são relevantes, uma vez que os recursos naturais são substituíveis por capital. Esses pressupostos tornam o processo de valoração ambiental bastante simples.

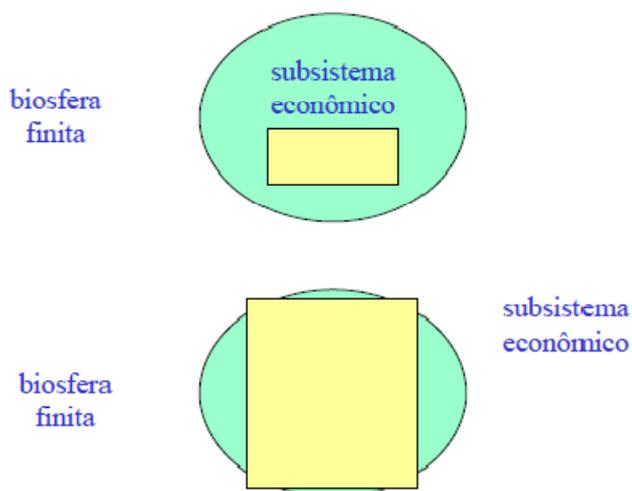
Na perspectiva da Economia Ecológica, os bens e serviços ecossistêmicos possuem uma dimensão de valor, além da econômica puramente simples, as quais seriam a dimensão ecológica e socioambiental, cujas valorações não podem ser reduzidas apenas à métrica monetária. Esta é uma diferenciação bastante relevante entre as duas correntes, tendo consequências importantes do ponto de vista metodológico e das políticas públicas. Em outras palavras, a valoração busca levar em conta a sustentabilidade econômica, ecológica e social da manutenção e (ou) uso dos recursos naturais

De acordo com Merico (1996), a microeconomia é parte de um sistema maior - a macroeconomia - e esta também é parte de um sistema ainda maior, a biosfera. A macroeconomia é um subsistema aberto da biosfera e totalmente dependente dela, tanto como fonte de matéria/energia como depósito de matéria/energia; desta forma, as trocas físicas que cruzam a fronteira entre o sistema ecológico total e o subsistema econômico constituem objeto de estudo da Economia Ecológica.

Ainda segundo o autor, a economia necessita de uma escala adequada relativa ao ambiente natural. A definição desta escala é fundamental, pois a biosfera, da qual a

economia é um subsistema, não cresce (Figura 2.4). Sendo a biosfera finita, é evidente que o subsistema econômico não pode romper e degradar o ambiente natural indefinidamente. E como a biosfera é a fonte de todos os materiais que alimentam a economia e o lugar de despejo de seus rejeitos, a economia tem que manter um tamanho que seus ecossistemas possam sustentar.

Figura 2.4 - Biosfera finita em relação ao crescente subsistema econômico



Fonte: MERICO (1996)

Caso o subsistema econômico ultrapasse a capacidade de sustentação dos ecossistemas, os processos de manutenção da vida no planeta podem se romper. Como não há a possibilidade de internalizar essa externalidade generalizada, representada pela destruição dos ecossistemas básicos do planeta, uma alternativa é a incorporação da destruição (externalidades) nos preços dos produtos e serviços.

A imposição de limites biofísicos sustentáveis é que determinará uma escala adequada para a economia e evitará o rompimento desses ecossistemas.

Segundo Mattos *et. al.*, a capacidade de sustentação dos ecossistemas será garantida quando forem seguidos os seguintes pressupostos:

- Não retirar dos ecossistemas mais que sua capacidade de regeneração;
- Não lançar aos ecossistemas mais que sua capacidade de absorção.
- Um processo econômico é verdadeiramente sustentável quando três funções ambientais críticas não são desrespeitadas (CAVALCANTI, 1996):
- Provisão de recursos;
- Absorção e neutralização dos dejetos da atividade econômica;

- Manutenção da oferta de serviços ambientais, desde as condições de amenidade propiciadas pelo “verde” a funções como a de estabilidade climática.

Sendo assim, o sistema econômico tem que ser compatível com o sistema ecológico que a natureza oferece. Quando esta compatibilidade passa a não mais existir, as relações entre o Homem e a Natureza necessitam ser reavaliadas.

É neste contexto que surge a avaliação econômica do meio ambiente. Os custos da degradação ambiental e do consumo de recursos naturais não têm sido computados nos processos econômicos. Segundo Figueroa (1996), não pretendem dar um “preço” ao meio ambiente e sim mostrar o seu valor econômico e os prejuízos, talvez irrecuperáveis, da sua degradação, pois não há dinheiro ou tecnologia capaz de substituir serviços ambientais proporcionados pela biodiversidade, regulação climática, ciclo hidrológico, proteção da camada de ozônio e por tantos outros (MÉRICO, 1996).

Segundo Pearce e Turner (1991), se algo é proporcionado a preço zero, sua demanda será maior do que se tivesse um preço positivo. Portanto, é fundamental valorar corretamente o ambiente natural e integrar esses valores corretos às políticas econômicas, para assegurar uma melhor alocação de recursos. Se não se proceder desta forma, corre-se um risco muito grande de exauri-lo, ou manejá-lo insustentavelmente.

O valor monetário pode ser utilizado, portanto, como padrão de medida, indicando ganhos e perdas em utilidade e bem-estar e as variações dos preços poderão atuar no sentido de evitar o desperdício de recursos em via de esgotamento relativo. Mas não se deve tudo deixar ao sabor das leis de mercado, pois as empresas em geral seguem a máxima “capitalizar os lucros e socializar os prejuízos”.

## **2.5. Métodos de Valoração dos Serviços Ambientais**

Não existe uma classificação universalmente aceita sobre as técnicas de valoração econômica do meio ambiente. Bateman e Turner (1992) propõem uma classificação dos métodos de valoração econômica distinguindo-os pela utilização ou não das curvas de demanda marshalliana ou hicksiana (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Métodos para valoração monetária do meio ambiente

Tipo de Abordagem	Tipos de Métodos	Observações
A) Abordagens com Curva de Demanda	1) Métodos de Preferências Expressas 1.1) Método de Valoração Contingente (MVC) 2) Métodos de Preferências Reveladas 2.1) Método de Custos de Viagem(MCV) 2.2) Método de Preços Hedônicos (MPH)	a) Curva de Demanda de Renda Compensada (hicksiana) . Medida de bem-estar de Variação Compensatória. . Medida de bem-estar de Variação Equivalente b) Curva de Demanda Não-Compensada (marshalliana) . Medida de bem-estar de Excedente do Consumidor
B) Abordagens sem Curva de Demanda	3) Método Dose-Resposta (MDR) 4) Método de Custos de Reposição(MCR) 5) Métodos de Comportamento Mitigatório (MCM)	c) Não se obtém Curva de Demanda (apenas estimativas de dose de valor) . Medidas de bem-estar não confiáveis

Fonte: Nogueira et. al. (data), adaptado de Bateman e Turner (1992)

Já Hufschmidt *et. al.* (1983) fazem suas divisões de acordo com o fato de a técnica utilizar preços provenientes:

- Mercados reais;
- Mercados substitutos;
- Mercados hipotéticos.

Nessa classificação, as variações na qualidade de um recurso ambiental são mensuradas pelo lado dos benefícios ou dos custos resultantes dessas mesmas variações. É uma avaliação da situação com a mudança no recurso ambiental e sem a mudança (Tabela 2.2).

Observando a metodologia em uso corrente na economia ambiental, Pearce (1993) afirma que existem quatro grandes grupos de técnicas de valoração econômica desenvolvidos a um nível sofisticado.

O primeiro grupo é denominado “Abordagens de Mercado Convencional” e abrange as técnicas que utilizam os preços de mercado ou preços sombra como aproximação, semelhantemente aos métodos dos mercados reais de Hufschmidt *et al.* (1983). O segundo grupo é chamado de “funções de produção doméstica (ou familiar)”. O terceiro, os “métodos de preços hedônicos”. E, por fim, o quarto e último grupo são os “métodos experimentais” (Tabela 2.3).

Tabela 2.2 - Classificação das Técnicas de Valoração de Custos e Benefícios para avaliar as conseqüências sobre a qualidade ambiental

Preços obtidos a partir de:	Método ou Técnica de Valoração	Equivalente
Mercados Reais	1) Valoração dos Benefícios	1) Valoração dos Benefícios
	1.1) Mudanças no Valor da Produção	1.1) MDR
	1.2) Perda de Salários/Lucros	1.2) MCE
	2) Valoração dos Custos	2) Valoração dos Custos
	2.1) Gastos Preventivos	2.1) MCE
	2.2) Custos de Reposição	2.2) MCR
	2.3) Projeto Sombra	2.3) MCR
	2.4) Análise Custo-Eficiência	2.4) MPM
Mercados Substitutos	3) Valoração dos Benefícios	3) Valoração dos Benefícios
	3.1) Bens de Mercado como Substitutos	3.1) MPM
	3.2) Abordagem do Valor de Propriedade	3.2) MPH
	3.3) Outras Abordagens do Valor da Terra	3.3) MPH
	3.4) Custos de Viagem	3.4) MCV
	3.5) Abordagem do diferencial de Salário	3.5) MPH
	3.6) Aceitação de Compensação	3.6) MVC
Mercados Hipotéticos	4) Questionamento Direto de Disposição a Pagar	4) Questionamento Direto de Disposição a Pagar
	4.1) Jogos de Leilão	4.1) MVC
	5) Questionamento Direto de Escolha de Quantidade( para estimar indiretamente a Disposição a Pagar)	5) Questionamento Direto de Escolha de Quantidade( para estimar indiretamente a Disposição a Pagar)
	5.1) Método da Escolha Sem Custo	5.1) Escolha Sem Custo (Sem Equivalente)

Fonte: Hufschmidt *et al.* (1983)

Tabela 2.3 - Classificação dos Métodos de Valoração Monetária

Grupos de Técnicas	Métodos	Equivalente
Abordagens de Mercado Convencional	1) Abordagem Dose-Resposta	1) MDR
	2) Técnica de Custos de Reposição	2) MCR
Funções de Produções Domésticas	3) Gastos Evitados	3) MCE
	4) Método de Custos de Viagem	4) MCV
Métodos de Preços Hedônicos	5) Preços de CASAS ( ou Terras )	5) MPH
	6) Salários pelo Risco	6) MPH
Métodos Experimentais	7) Método de Valoração Contingente	7) MVC
	8) Método de Ordenação Contingente	
	(ou de Preferência Estabelecida/Fixa	8) Sem Equivalente

Fonte: Pearce (1993)

Já Hanley e Spash (1993) fazem apenas uma distinção dos métodos de valoração econômica ambiental em dois grupos:

- Forma direta, como o método de valoração contingente (MVC);
- Forma indireta, como o método de preços hedônicos (MPH), o método dos custos de viagem (MCV) e as abordagens da função de produção, como o método dos custos evitados (MCE) e o método dose-resposta (MDR).

Observa-se, de modo geral, que os métodos de valoração não possuem uma classificação rígida, podendo-se utilizar diversos enfoques na aplicação dos mesmos, dependendo dos propósitos.

No entanto, do ponto de vista didático, torna-se interessante uma abordagem maleável desses métodos que permita as alterações que se fizerem necessárias durante suas aplicações (MERICCO, 1996). Assim, os métodos de valoração ambiental podem ser divididos em:

- Diretos;
- Indiretos.

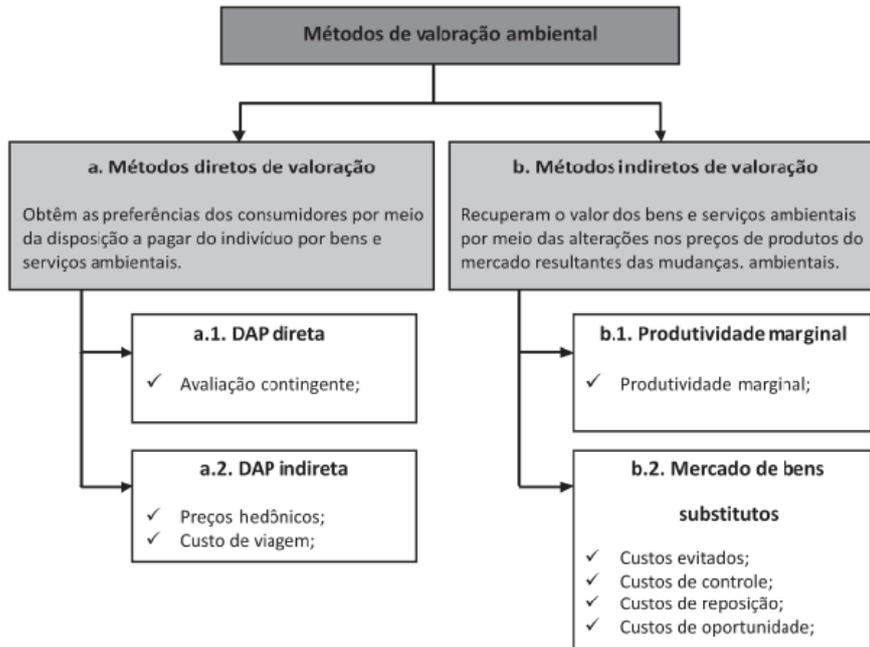
Segundo Merico (1996), os métodos de valoração diretos relacionam-se diretamente aos preços de mercado ou à produtividade. Podem ser aplicados quando uma mudança na qualidade ambiental ou na quantidade de recursos naturais afeta a produção ou a capacidade produtiva do processo econômico. São exemplos de métodos diretos de valoração ambiental: preço líquido, mudanças na produtividade, custo de oportunidade, custo de doenças, custo de reposição, entre outros.

Já segundo Romeiro e Maia (2011), os métodos existentes, que captam a disposição a pagar dos agentes econômicos, podem ser classificados em duas categorias:

(a) métodos que avaliam diretamente a disposição a pagar (DAP) dos indivíduos por este ou aquele recurso natural e que se dividem em dois subtipos: subtipo (a1) que avalia a DAP diretamente junto aos agentes econômicos por meio de um mercado hipotético, e subtipo (a2) que avalia a disposição a pagar por meio de mercados reais;

(b) métodos que avaliam indiretamente a disposição a pagar dos indivíduos por um dado recurso natural, seja pelo valor de mercado dos bens, ou pelos serviços ecossistêmicos produzidos (Figura 2.5).

Figura 2.5- Métodos de Valoração Ambiental



Fonte: Romeiro e Maia (2011)

A classificação adotada por May (2010) é formada por sete grupos (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Classificação de Técnicas e Métodos de Valoração

Grupo de Técnicas	Método
Mercado de Bens Substitutos	Método do Custo de Reposição
	Método do Custo de Controle ou Custo Evitado
	Método do Custo de Oportunidade
	Método do Custo de Irreversível
	Método do Custo Evitado
	Método de Produtividade Marginal
Métodos de Preferência Revelada	Método de Produção Sacrificada
	Método do Custo de Viagem
Métodos de Preferência Declarada	Método do Preço Hedônico
	Método da Valoração Contingente
Método de Função Efeito ou Método Dose-Resposta	Método de Análise Conjunta
Métodos de Multicritérios	
	Teoria de Utilidade Multiatributo
Método de Valoração do Balanço dos Fluxos de Matéria e de Energia	Método da Análise Hierárquica

Fonte: Romeiro e Maia (2011)

### 2.5.1. Método Custos de Viagem (MCV)

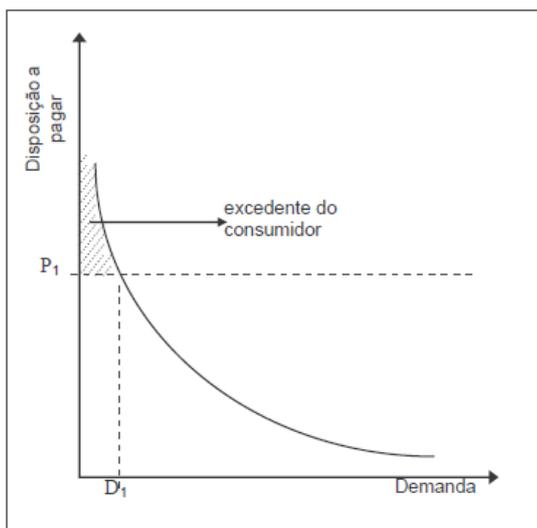
Segundo May (2010), o Método do Custo de Viagem (MCV) remonta a 1947, quando o economista Harold Hotelling sugeriu ao Serviço Nacional de Parques dos EUA que os custos incorridos pelos seus visitantes fossem utilizados como medida de valor de uso recreativo dos parques visitados. A sua introdução formal na literatura, no entanto, deve-se a Clawson e Knetsch (1966).

A idéia do MCV é que os gastos efetuados pelas famílias para se deslocarem a um lugar, podem ser utilizados como uma aproximação dos benefícios proporcionados por essa recreação (PEARCE, 1993). Esses gastos de consumo incluem as despesas com a viagem e preparativos, bilhetes de entrada e despesas no próprio local (HANLEY e SPASH, 1993). Em geral, o MCV é utilizado na abordagem por zona, ou na abordagem individual. A abordagem por zona caracteriza-se pela hipótese de homogeneidade entre os indivíduos moradores de uma mesma região ou zona. Com os dados disponíveis estima-se uma curva de demanda por visitas recreativas, relacionando-se os custos médios de viagem por zona e as variáveis sócio-econômicas com as taxas de visita por zona (MAY, 2010).

### 2.5.2. Métodos de Preferência Revelada

Uma vez estimada a curva de demanda por visitas recreativas calcula-se o excedente do consumidor obtido no período estudado, que é a diferença entre o preço que o indivíduo estaria disposto a pagar e o valor efetivamente pago (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Curva genérica de demanda



Fonte: Tavares, Ribeiro e Lanna (1996)

### **2.5.3. Método de Preços Hedônicos (MPH)**

O método de preços hedônicos estima um preço com base em atributos ambientais característicos de bens comercializados no mercado. É um dos métodos de valoração econômica mais utilizado no mercado imobiliário. Quando um imóvel passa pelo processo de compra/venda, suas características, locacional e ambiental, também são consideradas, fazendo com que elas sejam levadas em conta na precificação do mesmo.

Ridker (1967) vislumbrou a possibilidade de usar os dados dos valores de propriedade residenciais para estimar os benefícios de mudanças nos parâmetros de qualidade ambiental. Esse foi o início do que viria a se chamar no futuro o MPH. As evidências empíricas obtidas nesse e em outro trabalho do mesmo autor estimularam a vasta literatura atual sobre a relação poluição do ar e valor de propriedade (FREEMAN III, 1993).

A teoria do preço hedônico fundamentou a explosão de estudos teóricos e empíricos sobre valoração monetária de características ambientais ou locacionais na segunda metade da década de 1970 e durante toda a década de 1980.

Atualmente, é largamente aceita a idéia de que os diferenciais de preço de residências refletem (também) as diferenças na intensidade de suas várias características e que essas diferenças têm relevância para análise de bem-estar aplicada. Os objetos de exploração mais recente na literatura sobre o assunto são: a) a especificação adequada e estimação do modelo que relacionem os preços das residências às características ambientais, e b) o desenvolvimento de medidas de mudança de bem-estar que façam o melhor uso dos dados disponíveis e que sejam consistentes com a teoria econômica subjacente (FREEMAN III, 1993). A fim de avaliar o efeito da poluição do ar em cidades selecionadas dos EUA, Pearce e Turner (1990) usaram este método para estimar o preço das residências em função do aumento dos níveis de enxofre.

### **2.5.4. Método Custo de Reposição (MCR)**

Este método é talvez o mais fácil de ser compreendido, uma vez que mensura os efeitos de um prejuízo, qual seja, a reparação por um dano provocado. Assim, o MCR se baseia no custo de reposição ou restauração de um bem danificado e entende esse custo como uma estimativa de repor ou restaurar o recurso ambiental danificado (MAY, 2010).

Pearce (1993) afirma que o MCR é frequentemente utilizado como uma medida do dano causado. Essa abordagem é correta nas situações em que é possível argumentar que a reparação do dano deva acontecer por causa de alguma outra restrição, por exemplo, de ordem institucional. É o caso do padrão de qualidade da água: os custos para alcançá-lo são uma medida dos benefícios que esse padrão proporciona à sociedade. A operacionalização desse método é feita pela agregação dos gastos efetuados na reparação dos efeitos negativos provocados por algum distúrbio na qualidade ambiental de um recurso utilizado numa função de produção.

#### **2.5.5. Método de Custos Evitados (MCE)**

A idéia inerente a este método de custo é a de que gastos com produtos substitutos para alguma característica ambiental podem ser utilizados como aproximação para mensurar monetariamente a “percepção dos indivíduos” das mudanças ocorridas nesta característica ambiental (PEARCE, 1993).

Um exemplo clássico seria o de um indivíduo comprar água mineral engarrafada e/ou ferver a água encanada para se proteger de uma contaminação na água servida à população do local onde reside. No exemplo citado, os custos são adicionados conjuntamente de maneira a englobar todos os possíveis gastos efetuados pelo indivíduo para proteger sua saúde.

Assim, ao tomar a decisão de comprar estes bens substitutos, ele estará “valorando” esta perda na qualidade do recurso água potável em termos de: valor de comprar a água engarrafada, o custo de ferver a água encanada, despesas médicas e o aborrecimento inerente por contrair uma doença.

Modernamente, estuda-se o MCE como uma técnica descrita na teoria econômica por uma Função de Produção Doméstica. Esta abordagem segue um raciocínio similar ao adotado por firmas quando do seu processo produtivo. Enquanto firmas produzem bens ou serviços, famílias produzem serviços que proporcionam utilidade positiva. Em ambas, o uso de “insumos” obedecem a critérios para sua aplicação no processo produtivo. Dentre eles, está o critério qualitativo do recurso ou insumo.

Assim, a característica dessa abordagem é que a motivação para os gastos é a necessidade de substituir por outros insumos (ou melhorar os existentes) devido à mudança na qualidade do recurso anteriormente utilizado no processo produtivo (HANLEY e

SPASH, 1993). A operacionalização do método é feita por meio de modelagem econométrica, e daí a necessidade do manuseio dos dados por técnicos qualificados (PEARCE, 1993). As aplicações mais comuns do MCE estão na avaliação da mortalidade e morbidade humanas, e estudos relacionados com poluição e suas implicações sobre a saúde humana (PEARCE, 1993; HANLEY e SPASH, 1993).

#### **2.5.6. Método de Valoração Contingente (MVC)**

O MVC foi inicialmente proposto por Davis (1963) e sofreu um grande desenvolvimento, tanto em nível empírico como teórico, tornando-se bastante utilizado pelos economistas nos dias atuais (HANLEY e SPASH, 1993).

Consiste em se coletar informações referentes ao valor de uso (uso ativo do bem), ao valor de opção e ao valor de existência (referem-se ao uso passivo do bem), ou seja, qual seria a disposição das pessoas a pagar para usar estes bens no presente ou pela disponibilidade de uso futuro ou, ainda, para simplesmente garantir sua existência.

A operacionalização do MVC consiste na aplicação de pesquisas cuidadosamente elaboradas a fim de obter das pessoas os seus valores de DAP (disposição a pagar) ou a aceitar compensação (DAC) (PEARCE, 1993). Existem várias maneiras de fazer isso: jogos de leilão, escolha dicotômica (sim/ não), jogos de trade-off, etc. (HUFSCHMIDT *et al.*, 1983). Após a aplicação desses questionários, os resultados são tabulados e submetidos a uma análise econométrica de maneira a derivar valores médios dos lances de DAP ou DAC. A familiaridade com o objeto de mensuração apresenta resultados mais razoáveis (PEARCE, 1993).

O MVC é mais aplicado para mensuração de:

- Recursos de propriedade comum ou bens cuja exclusão do consumo não possa ser feita, tais como a qualidade do ar ou da água;
- Características paisagística, cultural, ecológica, histórica ou singularidade ou outras situações em que dados sobre preços de mercado estejam ausentes (HUFSCHMIDT *et al.*, 1983).

#### **2.5.7. Método Dose-Resposta (MDR) ou Função Efeito**

O Método Dose-Resposta (MDR), também conhecido por Função Efeito, fornece a estimativa de uma relação de causa (dose) e efeito (resposta) de fenômenos, especialmente os relacionados ao aspecto ambiental.

O MDR é bem exemplificado nas culturas agrícolas, onde os impactos do aparecimento de pragas (dose) são ilustrados através da diminuição dos níveis de produtividade agrícola (resposta), sendo mensurados pela utilização de defensivos os quais restituirão os níveis de produção das culturas. Os gastos na aquisição destes defensivos fornecerão um valor monetário dos prejuízos decorrentes do aparecimento das pragas.

Por este motivo, o MDR se caracteriza por utilizar preços de mercado como aproximação. Pearce (1993) afirma que o método é teoricamente correto, porém ele identifica que a “incerteza” está, sobretudo, nos possíveis erros dos relacionamentos da dose-resposta.

#### **2.5.8. Método de Produtividade Marginal**

Este método é aplicável quando o recurso natural objeto da análise é fator de produção ou insumo na produção de algum bem ou serviço comercializado no mercado.

Sinisgalli (2005) observa que o recurso natural afeta diretamente a função de produção de um determinado bem ou serviço. Por este motivo, este método também pode ser conhecido por Método de Função Produção, ou seja, avalia como a produtividade marginal pode ser impactada pela diminuição do recurso natural utilizado.

Esta idéia vai de encontro ao pensamento clássico que considerava o fator recursos naturais fixo, ou seja, invariáveis e, portanto, não tendo impacto nas variações da produção. Ortiz (2003) afirma que “este método visa encontrar uma ligação entre uma alteração no fornecimento de um recurso ambiental e a variação na produção de um bem ou serviço de mercado” que necessite deste recurso. Nogueira *et. al.* (2000) complementam que este método ressalta a relação técnica entre a aplicação de uma dose de poluição e a resposta na diminuição da quantidade produzida de um determinado produto.

#### **2.5.9. Método do Custo de Controle**

Neste método são representados os gastos necessários para evitar a variação do bem ambiental e garantir a qualidade dos benefícios gerados à população. É o caso do tratamento de esgotos para evitar a poluição dos rios e um sistema de controle de emissão de poluentes para impedir a contaminação do ar atmosférico por uma planta industrial. Por limitar o consumo presente do capital natural, o controle da degradação contribui para melhorar a capacidade de resposta dos ativos naturais em decorrência dos efeitos da

degradação, aumentando a sustentabilidade dos mesmos e preservando-os para a fruição pelas gerações futuras.

As maiores dificuldades deste método estão relacionadas à estimativa dos custos marginais de controle ambiental e dos benefícios gerados pela preservação. Os investimentos de controle ambiental tendem a gerar benefícios diversos, sendo necessário um estudo rigoroso para determinação de todos eles. Como não há consenso quanto ao nível adequado de sustentabilidade, as pessoas encontram sérias dificuldades para ajustar os custos aos benefícios marginais e determinar o nível ótimo de provisão do recurso natural. Este método vem tendo aplicação nas análises de tomada de decisão sobre problemas globais associados com a mudança climática (STERN, 2007).

#### **2.5.10. Método do Custo de Oportunidade**

Embora desejável do ponto de vista ambiental, a preservação gera um custo social e econômico que deve ser compartilhado entre os diversos agentes que usufruem dos benefícios da conservação.

Toda conservação traz no seu bojo um custo de oportunidade das atividades econômicas que poderiam estar sendo desenvolvidas na área de proteção, representando, assim, as perdas econômicas da população em virtude das restrições de uso dos recursos ambientais. A base de cálculo para a estimativa do dano é expressa como a melhor alternativa para o uso do recurso natural, pois além da perda econômica, há também a restrição ao consumo e a privação da fruição de outras espécies com relação ao recurso natural (MAY, 2010).

No caso de um parque ou reserva florestal com exploração restringida, por exemplo, o custo de oportunidade de sua preservação seria dado pelos benefícios de uma possível atividade de exploração de madeira. Em contrapartida, os benefícios ecológicos da preservação poderiam ser expressos pela renda gerada em atividades sustentáveis como o ecoturismo e a exploração de ervas medicinais.

Alguns cuidados especiais devem ser tomados na estimativa. Atividades insustentáveis irão gerar danos irreversíveis e reduzir a oferta do bem ou serviço ambiental ao longo do tempo – e este fato não pode ser desconsiderado na estimativa dos custos de oportunidade dessas explorações. Este método tem sido aplicado no nordeste do estado do Pará, onde o conceito de custo de oportunidade para a estimação da captura de carbono e

conservação da biodiversidade tem sido aplicado em sistemas de produção de agricultura familiar (MAY, 2010).

## **2.6. Mudanças Climáticas**

Após ser descrito originalmente pelo matemático francês Jean Batista Fourier, em 1827, o efeito estufa começou a ser tratado como uma ameaça real no final dos anos 1950. Nos anos seguintes, o aquecimento global e as mudanças climáticas passaram a ser relacionadas a atividades antrópicas.

O interesse pelas mudanças climáticas intensificou-se na década de 1970. A Primeira Conferência Mundial sobre o Clima (WCC), em 1979, apontou que a expansão das atividades antrópicas sobre a terra poderia levar a significativas mudanças dos climas regionais e até mesmo globais. Apesar de não ter apresentado conclusões ou proposto ações políticas sobre mudança climática em caráter internacional, a WCC chamou atenção para o tema, sendo seguida pela Conferência de Villach (Áustria), em 1985.

Tal conferência teve como finalidade avaliar o papel do gás carbônico e outros gases do efeito estufa (GEE) nas variações climáticas e nos impactos associados. Segundo Pachauri (2004), foi possível concluir que o aumento dos gases do efeito estufa levaria a uma elevação da temperatura média global na primeira metade do século XX, jamais vista na história do homem. Observou ainda que os dados climáticos do passado já não eram confiáveis para se projetar o futuro a longo prazo. E que esse aquecimento podia ser profundamente afetado pelas políticas públicas de emissões GEE.

Em 1987, a Organização Mundial de Meteorologia (WMO) reconheceu a necessidade de um estudo coordenado sobre as concentrações de gases de efeito estufa (GEE) sobre o clima e seus impactos sobre os padrões socioeconômicos. Dessa forma, a WMO e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) solicitaram o estabelecimento de um mecanismo intergovernamental para proporcionar avaliações científicas da mudança climática. É criado então, em 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), com o apoio do PNUMA e da WMO, as seguintes responsabilidades (PAUCHARI, 2004):

- Identificar as incertezas e falhas no conhecimento científico no que diz respeito às mudanças climáticas e seus potenciais impactos, a fim de elaborar um plano para reduzi-los;

- Identificar as informações necessárias para avaliar as implicações políticas e as estratégias de resposta à mudança climática;
- Rever as políticas nacionais e internacionais de emissão dos GEE;
- Transferir as avaliações e informações relacionadas às emissões GEE aos governos e organizações intergovernamentais, a fim de promoverem suas políticas de desenvolvimento ambiental e socioeconômico.

Segundo Agrawala (1997), a missão do IPCC seria a de reunir o maior número possível de cientistas de diversos países para a coleta e avaliação da literatura disponível sobre o aquecimento global e consolidar relatórios sobre a ciência, possíveis impactos e políticas de resposta às mudanças climáticas.

Em cumprimento a sua missão, o IPCC gerou seu Primeiro Relatório de Avaliação (First Assessment Report - FAR), publicado em 1991. Nesse relatório, o Grupo de Trabalho I (GTI) apresentou sua avaliação científica sobre os GEE e aerossóis e concluíram que as emissões ocasionadas pelas atividades humanas estariam aumentando substancialmente as concentrações atmosféricas de GEE e que isso aumentaria o efeito estufa, acarretando um aquecimento adicional da superfície da Terra. Apontou, ainda, diversas incertezas sobre as variações, as concentrações de GEE e o papel das nuvens, oceanos e calotas polares no sistema climático (PACHAURI, 2004).

O Grupo de Trabalho II (GTII) avaliou a compreensão científica dos impactos das mudanças climáticas sobre a agricultura e silvicultura, ecossistemas naturais terrestres, hidrologia e recursos hídricos, assentamentos humanos, oceanos e zonas costeiras e cobertura de neve e destacou importantes incertezas em relação à magnitude, tempo e padrões regionais de mudança climática. Observou que os impactos seriam sentidos mais fortemente nas regiões que já estão sob tensão, especialmente nos países em desenvolvimento.

O Grupo de Trabalho III (GTIII) propôs estratégias de mitigação e adaptação nas áreas de energia e indústria, agricultura, silvicultura e outras atividades humanas, e gestão da zona costeira. Abordou cenários de emissões e a implementação de medidas de mitigação. Na sua síntese para os decisores políticos o relatório apresentou uma abordagem flexível e progressiva composta de medidas de mitigação e adaptação em curto prazo e propostas para uma ação mais intensa e longo prazo. A comissão especial dos países em

desenvolvimento apresentou propostas para promover, o mais rapidamente, a participação dos países em desenvolvimento nas atividades do IPCC (PACHAURI, 2004).

No Segundo Relatório de Avaliação (Second Assessment Report - SAR), publicado pelo IPCC, em 1995, o GT I destacou o progresso considerável na compreensão das mudanças climáticas desde 1990, apesar de ainda existirem muitas incertezas. Apontou dentre algumas descobertas o contínuo aumento das concentrações de GEE e a expectativa de contínua mudança do clima. O GT II ampliou o escopo de sua avaliação e acrescentou informações sobre a viabilidade técnica e econômica das potenciais estratégias de adaptação e mitigação. O GT III apresentou diversas percepções que podem ser úteis aos decisores políticos. Segundo o GT III uma maneira prudente de lidar com as mudanças climáticas seria através de um portfólio de ações voltadas para a mitigação, adaptação, e melhoria de conhecimentos.

O Terceiro Relatório de Avaliação (Third Assessment Report – TAR), publicado pelo IPCC em 2001, além de expor o aumento das concentrações de GEE devido às atividades humanas e aumento da temperatura média global, apresentou as implicações das alterações climáticas para o desenvolvimento sustentável, inserindo a necessidade de se vislumbrar a sustentabilidade como ferramenta de combate ou amenização ao aquecimento global. Afirma ainda que os países em desenvolvimento seriam os mais vulneráveis a alterações do clima. E com a confirmação dos cenários previstos, aumentarão as desigualdades em qualidade de saúde, acesso a alimentos, água potável e outros recursos. Isto ocorre, principalmente, porque estes países estão mais próximos das margens de tolerância para mudanças de temperatura e de precipitação (secas e inundações), têm uma vulnerabilidade costeira maior, apresentam uma maior dependência de setores dependentes do clima (agricultura) e possuem uma menor capacidade de adaptação tecnológica, institucional, educacional e financeira (ESPARTA e MOREIRA, 2002).

Entre o terceiro (2001) e quarto relatórios (2006), o IPCC elaborou um relatório especial sobre “Mudança Climática e Água” que, segundo Bates *et al* (2008), teve o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre os processos e regimes hidrológicos, e sobre os recursos de água doce - a sua disponibilidade, qualidade, usos e gestão, levando em consideração suas principais vulnerabilidades e perspectivas de adaptação, questões estas ainda não devidamente consideradas nas análises de mudanças climáticas e nas formulações de políticas climáticas.

No Quarto Relatório de Avaliação (Fourth Assessment Report – AR4), as áreas mais atingidas pela mudança do clima serão as situadas em países menos desenvolvidos e em desenvolvimento. Nesse relatório, estimou-se que os custos da adaptação às mudanças climáticas para os países menos desenvolvidos seriam ainda mais altos do que para os demais, uma vez que aqueles serão os mais atingidos (NOGUEIRA, 2007).

O relatório AR4 enfatiza ainda a vulnerabilidade às alterações climáticas das comunidades mais pobres, uma vez que vivem em áreas de risco e sem infraestrutura, além de terem limites menores na capacidade de adaptação. As projeções futuras contemplam, desde a escassez de água à possível falta de alimentos. A agricultura seria intensamente atingida pelas mudanças no regime das chuvas, na elevação da temperatura média e na diminuição das áreas agriculturáveis, devido ao crescimento das áreas em risco de desertificação encontradas em diferentes regiões do Planeta (NOGUEIRA, 2007).

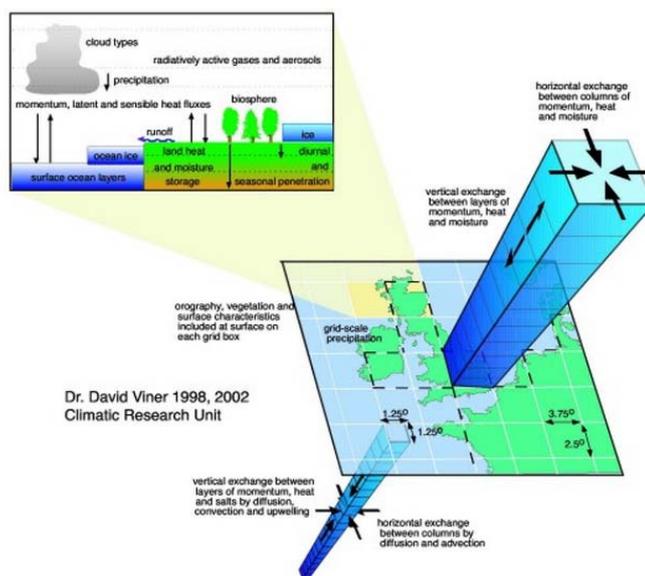
O Quinto Relatório de Avaliação (Fifth Assessment Report- AR5) será finalizado em 2013-2014 e proporcionará uma atualização do conhecimento científico e técnico e dos aspectos sócio-econômicos das mudanças climáticas. Embora ainda não esteja finalizado, alguns resultados de cenarização de gases estufa já foram divulgados.

### **2.6.1. Os Modelos Climáticos do IPCC**

Os Modelos de Circulação Geral (MCG) são modelos numéricos que representam os processos físicos na atmosfera, nos oceanos, na criosfera e na superfície terrestre. Atualmente, são as ferramentas disponíveis mais avançadas para simular a resposta do sistema climático global às crescentes concentrações de gases do efeito estufa (Carter *et.al.*, 2007). Segundo os autores, modelos mais simples têm sido utilizados para fornecer estimativas globais ou regionais da resposta do clima. No entanto, apenas os MCGs, possivelmente, em conjunto com os modelos regionais, apresentam o potencial de fornecer estimativas geográficas e fisicamente consistentes da mudança do clima regional.

Os MCGs descrevem o clima utilizando uma grelha tridimensional ao longo do globo (Figura 2.5), tendo tipicamente uma resolução horizontal entre 250 a 600 km, 10 a 20 camadas verticais na atmosfera, e até 30 camadas nos oceanos. No entanto, apresentam resolução bastante grosseira em relação à escala da maioria dos trabalhos de avaliação de impactos (Carter *et. al.*, 2007).

Figura 2.7 - Estrutura conceitual de um modelo de circulação global oceânico-atmosférico acoplado.



Fonte: IPCC (2012)

Em simulações de mudanças climáticas, os modelos são utilizados para projetar possíveis e futuras mudanças de muitas décadas, para as quais não há precisão em analogia com o passado (Randall *et. al.*, 2007). Os autores salientam que a confiança em um modelo pode ser adquirida através de simulações de registros históricos. E que essa confiança é maior para a estimativa de algumas variáveis, como a temperatura.

O IPCC (2007) projetou mudanças de temperatura, entre 2090 e 2099, a partir dos dados de temperatura entre os anos 1980 e 1999, utilizando vinte e cinco (25) Modelos de Circulação Geral (MCG), apresentados na Tabela 2.5.

Os MCGs, no entanto, não têm conseguido resolver diversos processos físicos do sistema climático, especificamente de meso e micro escala. Sendo assim, surge então o downscaling (ROADS *et. al.*, 2003), implementado nos últimos anos em diversos centros internacionais de meteorologia, com resultados promissores, cuja função é reduzir a escala de centenas de quilômetros para algumas dezenas. Essa técnica utiliza Modelos Climáticos Regionais (MCR), que admitem um maior detalhamento espacial e temporal das variáveis do sistema climático em relação aos MCGs, tornando-se uma ferramenta útil para estudar as mudanças e flutuações climáticas em escala regional (ALVES, 2007).

Com a propagação e a recente demonstração da previsibilidade de eventos climáticos, em particular o evento El Niño - Oscilação Sul e seus impactos de longo prazo

(CANE *et. al.*, 1986; BARNSTON *et. al.*; 1999; MASON *et. al.*, 1999), tem existido um grande interesse pelo uso das previsões climáticas resultantes dos Modelos de Circulação Geral – MCGs (RAJAGALOPAN *et. al.*, 2002).

Tabela 2.5 - Modelos de Circulação Geral do IPCC e os centros de desenvolvimento de cada modelo.

Designação do Modelo	País	Instituição ou Agência
BCC-CM1	China	Beijing Climate Center
BCCR-BCM2	Noruega	Bjerknes Centre for Climate Research, Universidade de Bergen
CCCMA-CGCM3 1-T47	Canadá	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CCCMA-CGCM3 1-T63	Canadá	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
CNRM-CM3	França	Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo France
CONS-ECHO-G	Alemanha/ Coréia do Sul	Meteorological Institute of the University of Bonn (Alemanha), Institute of KMA, and Model, and Data Group
CSIRO-MK3	Austrália	CSIRO
CSIRO-MK3.5	Austrália	CSIRO
GFDL-CM2.0	Estados Unidos	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA
GFDL-CM2.1	Estados Unidos	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA
INM-CM3.0	Rússia	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science
INGV-SXG2005	Itália	National Institute of Geophysics and Volcanology
IPSL-CM4	França	Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)
LASG-FGOALS-G1.0	China	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, P.O. Box 9804, Beijing 100029
MPIM-ECHAM5	Alemanha	Max Planck Institute for Meteorology
MRI-CGCM2.3.2	Japão	Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency
NASA-GISS-AOM	Estados Unidos	Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS)
NASA-GISS-EH	Estados Unidos	Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS)
NASA-GISS-ER	Estados Unidos	Nasa Goddard Institute for Space Studies (NASA/GISS)
NCAR-CCSM3	Estados Unidos	National Center for Atmospheric Research (NCAR)
NCAR-PCM	Estados Unidos	National Center for Atmospheric Research (NCAR), NSF, DOE, NASA, e NOAA
NIES-MIROC3.2-HI	Japão	CCSR/ NIES/ FRCGC
NIES-MIROC3.2-MED	Japão	CCSR/ NIES/ FRCGC
UKMO-HADCM3	Reino Unido	Hadley Centre for Climatic Prediction and Research, Met Office
UKMO-HADGEM1	Reino Unido	Hadley Centre for Climatic Prediction and Research, Met Office

Fonte: Cysne (2011)

Esses modelos acoplados oceano-atmosfera através do ciclo hidrológico global, oceano-continente-atmosfera formam um sistema complexo acoplado com inter-relações múltiplas, compondo um conjunto de ferramentas imprescindíveis ao estudo do clima, sua variabilidade e mudança (NOBRE *et. al.*, 2011). Randall *et. al.* (2007) ressaltam que, com

as projeções realizadas pelo IPCC, os avanços na modelagem da mudança do clima, atualmente, permitem melhores estimativas e prováveis faixas de incerteza avaliadas para o aquecimento projetado para diferentes cenários de emissões.

A capacidade dos modelos em reproduzir características regionais do clima foi vastamente testada, mediante simulações em diversas regiões do mundo, com diferentes regimes climáticos (LIU *et. al.*, 1994; KATO *et. al.*, 1999; SUN *et. al.*, 1999; SMALL *et. al.*, 1999; HUDSON *et. al.*, 2002; JONES *et. al.*, 2004; ALVES, 2007; SALES, 2012).

Para o Semiárido Brasileiro ressaltam-se, dentre outros os estudos de Nobre *et. al.* (2001), Robertson *et. al.* (2004), Souza Filho e Porto (2003) e Sun *et. al.* (2005). De modo geral, os resultados mostraram que o desempenho do modelo varia de acordo com a estação do ano, topografia e localização da região de estudo, em relação às circulações que determinam as variáveis prognósticas.

Diversos modelos climáticos têm sido utilizados para avaliar a variabilidade entre os modelos e assim, conhecer e interpretar todos os possíveis cenários, levando-se em conta a dispersão entre suas saídas, fornecendo uma noção de incerteza das projeções. Desta forma, poder-se-ia tentar reduzir as incertezas das previsões considerando-se não só um, mas vários cenários de modelos diferentes (AMBRIZZI *et. al.*, 2007).

Segundo Nobre *et. al.* (2011), a vantagem do emprego de modelos regionais climáticos para o estudo das mudanças climáticas sobre encontra-se na possibilidade de detalhar os cenários climáticos fornecidos pelos modelos globais, que geralmente apresentam baixa resolução espacial, a menor custo computacional.

### **2.6.2. As Incertezas nas Mudanças Climáticas**

Segundo Jones *et. al.* (2004), existem incertezas nas principais etapas de avaliação dos impactos das mudanças climáticas e na aplicação de diferentes cenários. Tais incertezas devem ser consideradas nas opções de avaliação de impactos e vulnerabilidade, assim como de adaptação às mudanças climáticas.

Embora ainda não possam ser quantificadas, as fontes dessas incertezas são elencadas a seguir (CYSNE, 2012):

- Incerteza nas emissões futuras: incertezas inerentes nas premissas sobre a relação entre população futura, desenvolvimento socioeconômico e mudanças tecnológicas que fazem a base dos cenários do IPCC. Este tipo de incerteza pode ser aceita,

fazendo-se projeções climáticas para uma gama de cenários de emissões que cubra maior parte da amplitude da incerteza. As emissões são consideradas como uma das duas maiores incertezas na projeção climática futura;

- Incertezas nas concentrações futuras: incertezas devido à compreensão imperfeita de alguns processos físicos no ciclo do carbono e reações químicas na atmosfera geram incertezas na conversão das emissões para concentrações de gases. Uma incerteza potencialmente importante é a relação entre o clima, o ciclo de carbono e a química atmosférica. Para que esta incerteza seja refletida nos cenários climáticos, torna-se necessário o uso de Modelos de Circulação Global Oceânico-Atmosférico (AOGCMs) que explicitamente simulem o ciclo do carbono e a química de todas as substâncias;
- Incertezas na resposta climática: incertezas decorrentes da falta de compreensão sobre o real funcionamento do sistema climático. Surgem em função da descrição incorreta ou incompleta dos principais processos e suas respectivas respostas aos modelos. Tal realidade é ilustrada pelo fato que, atualmente, os Modelos de Circulação Global – GCMs, contêm diferentes representações do sistema climático, projetando diferentes padrões e magnitudes de mudanças climáticas para o mesmo período futuro, quando aplicam o mesmo cenário de concentrações. Por isso, recomenda-se a utilização de diversos GCM, para tentar refletir, pelos menos em parte, essa incerteza científica.
- Incertezas devido à variabilidade natural: o clima varia nas escalas temporais de anos e décadas, devido às interações naturais entre atmosfera, oceano e terra. Mesmo com as atividades humanas, espera-se que tal variabilidade natural persista no futuro. Tal incerteza ainda não pode ser removida, mas pode ser quantificada, através de conjuntos de projeções climáticas futuras. Cada membro do conjunto usa o mesmo modelo e o mesmo cenário de emissão ou concentração, mas cada um é inicializado de um ponto de partida diferente no clima de controle. Os resultados do modelo para períodos de 10 a 30 anos fornecerá um leque de futuras possibilidades;
- Incertezas na mudança climática regional: todas as técnicas de regionalização carregam consigo eventuais erros nos campos dos GCMs. Diferentes técnicas de regionalização podem fornecer projeções locais distintas, mesmo quando baseadas na mesma projeção do GCM. Ainda que apresentem a mesma técnica, os diferentes

Modelos de Circulação Regional (RCMs) fornecerão projeções regionais distintas, baseando-se na mesma saída do GCM.

Devido às incertezas, pode se ter a impressão de que os modelos não produzem informações úteis e confiáveis. No entanto, é importante salientar que, apesar dessas limitações, tem-se verificado excelentes progressos no sentido de buscar reduzir às incertezas dos modelos.

É importante destacar que as incertezas não devem ser associadas ao erro, uma vez que as projeções de mudanças climáticas possuem, e sempre possuirão, um nível intrínseco de incerteza, de modo que considerações probabilísticas devam ser sempre levadas em consideração quando se analisam os cenários climáticos futuros.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O impacto causado pela poluição no ambiente e a avaliação de sua magnitude requerem: (1) a identificação de todos os locais afetados; (2) a estimativa da relação física entre as emissões de poluentes (incluindo fontes naturais) e o problema causado ao ambiente; (3) estimativa das possíveis causas no sentido de impedir ou amenizar alguma porção do problema e (4) a valoração monetária dos impactos (TEITENBERG, 2003).

#### 3.1. Área de Estudo

A área de estudo se restringe à bacia do Rio Jaguaribe, no Estado do Ceará, a jusante do Açude Castanhão, até sua foz, no município de Fortim. Observa-se, ao longo deste trecho, a existência de 12 sedes municipais: Fortim, Aracati, Itaiçaba, Jaguaruana, Quixeré, Russas, Morada Nova, Limoeiro do Norte, Tabuleiro do Norte, São João do Jaguaribe, Iracema e Alto Santo (Figura 3.1).

Figura 3.1 - Localização das sedes municipais ao longo do Rio Jaguaribe a jusante do Açude Castanhão

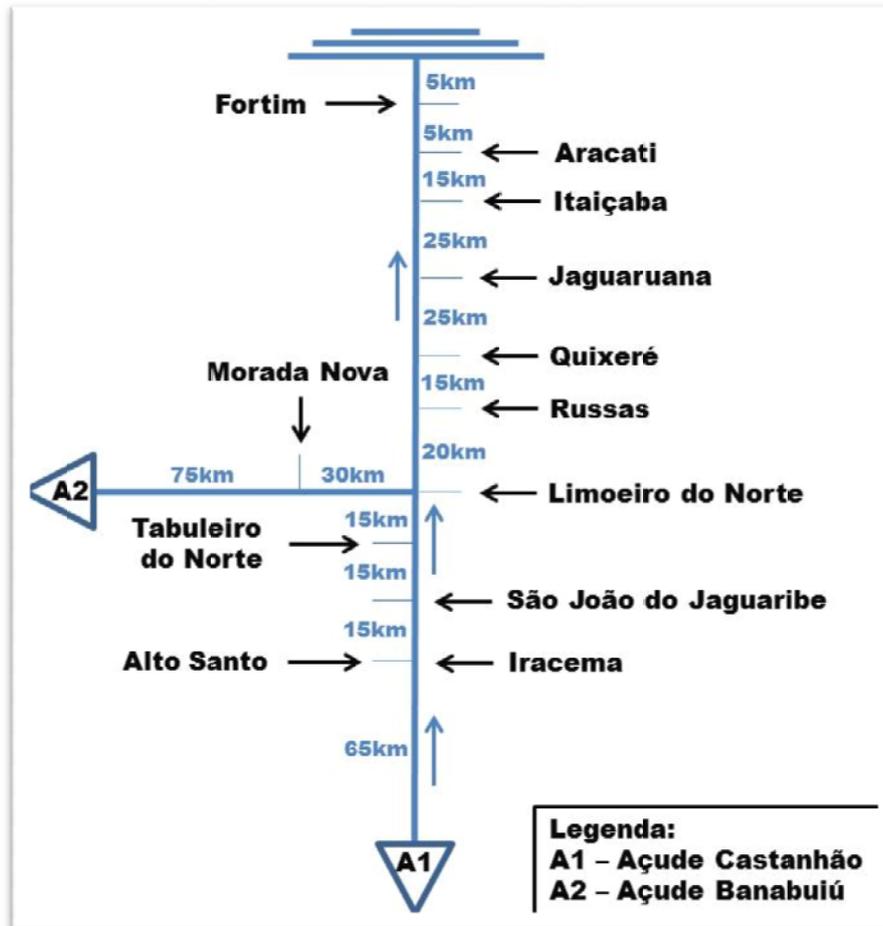


Fonte: o próprio autor (2013)

### 3.2. Definição da Topologia a ser simulada

A topologia simulada é mostrada na Figura 3.2. São colocadas, ao longo deste trecho, as 12 sedes municipais citadas. Os reservatórios simulados são o Açude Bananuiú e Açude Castanhão.

Figura 3.2 - Diagrama unifilar com a topologia do sistema modelado



Fonte: o próprio autor (2013)

### 3.3. Estimativa das vazões e da carga poluidora lançada no rio Jaguaribe por cada centro urbano

O clima, a geologia, os tipos de solos e o regime hidrológico são condicionantes naturais da qualidade das águas, entretanto, fatores antrópicos também condicionam a qualidade dessas águas, contribuindo para sua degradação, tais como: o uso e ocupação do solo de forma inadequada, esgotos domésticos e industriais, drenagem urbana e agrícola, dentre outros.

Existem basicamente duas formas em que as cargas poluidoras provenientes de determinada fonte de poluição podem atingir os sistemas hídricos superficiais e subterrâneos: as pontuais e as difusas (VON SPERLING, 2006).

Nas fontes pontuais, os poluentes atingem os sistemas hídricos de forma concentrada no espaço, enquanto que nas fontes difusas, os poluentes adentram os sistemas hídricos distribuídos ao longo de sua extensão. Para a avaliação do impacto da poluição proveniente de fontes pontuais ou difusas e da eficácia das medidas de controle, é necessária a quantificação dessas cargas poluidoras afluentes aos sistemas hídricos.

Na presente pesquisa consideraram-se apenas as fontes de poluição pontuais provenientes de esgoto doméstico e referentes à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

A quantificação e avaliação das cargas poluidoras provenientes do esgoto doméstico urbano foram realizadas com base nos dados de população urbana e da situação do saneamento dos municípios.

No que se refere à população rural, esta não foi considerada nesta quantificação. Foi admitido que os efluentes gerados na zona rural apresentam-se de forma difusa, decorrente da baixa densidade demográfica dessas zonas, configurando, predominantemente, uma contaminação pontual do solo (devido ao uso de fossa séptica, fossa rudimentar ou vala) do que propriamente dos recursos hídricos superficiais.

A Tabela 3.1 apresenta a população residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, em números absolutos e relativos, com indicação da área total e densidade demográfica, segundo os municípios - Ceará – 2010.

As estimativas da vazão lançada pelo esgoto doméstico ao longo do Rio Jaguaribe, desde o Açude Castanhão até sua foz, foram realizadas considerando a população urbana residente na sede municipal e o consumo de água per capita para o estado do Ceará, de 139,4 litros/hab.dia (SNIS, 2010).

A vazão do esgoto doméstico foi calculada em função do consumo médio diário de água de um indivíduo. Segundo o Manual de Saneamento Básico (FUNASA, 2007), estima-se que para cada 100 litros de água consumida, são lançados aproximadamente 80 litros de esgoto na rede coletora (Equação 3.1). Adotou-se para carga poluidora a concentração média de DBO de 350mg/L.

$$Q_{\text{esgoto}} (\text{litros/dia}) = 0,8 (\text{população urbana (hab)} \times 139,4 \text{ litros/hab.dia}) \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 - População residente, total, urbana total e urbana na sede municipal, em números absolutos e relativos, com indicação da área total e densidade demográfica, segundo os municípios - Ceará - 2010

Municípios	População residente						Área total (km <sup>2</sup> )	Densidade demográfica (hab/km <sup>2</sup> )
	Absoluta			Relativa (%)				
	Urbana			Urbana				
	Total	Total	Na sede municipal	Total	Total	Na sede municipal		
Alto Santo	16 359	8 041	6 059	100,0	49,2	37,0	1 338,2	12,22
Aracati	69 159	44 035	35 950	100,0	63,7	52,0	1 247,3	55,45
Fortim	14 817	9 608	4 541	100,0	64,8	30,6	282,1	52,53
Iracema	13 722	9 819	8 332	100,0	71,6	60,7	824,0	16,65
Itaiçaba	7 316	4 279	4 279	100,0	58,5	58,5	209,9	34,86
Jaguaruana	32 236	19 135	16 489	100,0	59,4	51,2	847,3	38,05
Limoeiro do Norte	56 264	32 483	31 972	100,0	57,7	56,8	751,8	74,84
Morada Nova	62 065	35 401	28 185	100,0	57,0	45,4	2 779,2	22,33
Quixeré	19 412	11 930	5 735	100,0	61,5	29,5	610,8	31,78
Russas	69 833	44 952	38 626	100,0	64,4	55,3	1 591,3	43,88
São João do Jaguaribe	7 900	3 169	3 169	100,0	40,1	40,1	280,5	28,17
Tabuleiro do Norte	29 204	18 806	16 827	100,0	64,4	57,6	861,8	33,89

Fonte: Censo Demográfico 2010 IBGE.

### 3.4. Modelo Numérico de Qualidade de Água Utilizado

No presente estudo foi utilizado o modelo QUAL2E, programa computacional capaz de calcular os mais diversos parâmetros de qualidade da água em rios, entre eles, a reação para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). O modelo assume que a variação da DBO é uma reação de primeira ordem. A função utilizada no modelo também considera a remoção da DBO por sedimentação, erosão e floculação, os quais não exercem demanda por oxigênio.

A DBO pode ser definida como a quantidade de oxigênio necessária para que os microrganismos presentes na amostra oxidem a matéria orgânica para uma forma inorgânica estável. Outro conceito importante a ser definido é o que se refere a DBO<sub>5</sub>, que consiste na quantidade de oxigênio dissolvido que será consumido pelos organismos aeróbios ao degradarem a matéria orgânica em um período de cinco dias e a uma temperatura de 20°C.

A equação diferencial usada no modelo matemático QUAL2E para descrever a taxa de variação da DBO é a mostrada pela Equação 3.2.

$$\frac{dL}{dt} = -K_1L - K_3L \quad (3.2)$$

Onde  $L$  é a concentração da última DBO, em  $\text{mg.L}^{-1}$ ;  $K_1$  é o coeficiente de decomposição, dependente da temperatura, em  $\text{dia}^{-1}$  e  $K_3$  é a taxa de perda de DBO devido à sedimentação, dependente da temperatura, em  $\text{dia}^{-1}$ . O valor aproximado da variável  $K_1$  pode ser determinado através das Equações 3.3 e 3.4 (BROWN e BARNWELL, 1987)

$$K_1 = 0.3 \left(\frac{H}{8}\right)^{-0.434} \text{ para } 0 \leq H \leq 8 \text{ pés} \quad (3.3)$$

$$K_1 = 0.3 \text{ para } H > 8 \text{ pés} \quad (3.4)$$

Já para a constante  $K_3$ , a equação aproximada do seu valor pode ser dada pela Equação 3.5 (CHAPRA, 1997):

$$K_3 = \frac{v_s}{H} \quad (3.5)$$

Onde  $v_s$  é a velocidade de sedimentação, em  $\text{m.dia}^{-1}$  e  $H$  a profundidade da água, em metros.

### 3.4.1. Parâmetros de entrada adotados para o Modelo QUAL2E

Para o Cenário ZERO (atual) foram considerados os parâmetros apresentados na Tabela 3.2. Os valores são constantes e representam uma média do que seria encontrado na realidade.

Tabela 3.2 - Coeficientes utilizados na simulação

N (rugosidade)	0,02
b0 (largura de fundo do canal)	5 m
s (declividade lateral do canal)	1
se (declividade de fundo do canal)	0,005
K1	0,3 dia-1
K3	0
Temperatura	28°
E (dispersão)	60 m2/s

Fonte: O autor (2013)

Para os cenários de mudança climática foram adotados outros valores de temperatura, os quais interferirão nos coeficientes de re-aeração e decaimento da DBO.

### 3.4.2. Vazões de diluição adotadas no Modelo QUAL2E

No Cenário ZERO considerou-se que a vazão regularizada do Açude Castanhão é de 30 m<sup>3</sup>/s e a do Açude Banabuiú é de 12,9 m<sup>3</sup>/s.

Nos cenários de mudanças climáticas adotou-se uma vazão média para o Rio Jaguaribe de 5 m<sup>3</sup>/s, valor adotado nestes modelos.

### 3.4.3. Dados climatológicos adotados no Modelo QUAL2E

Foi utilizada a estação climatológica de Morada Nova. Os dados climatológicos são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Dados meteorológicos de entrada no modelo QUAL2E para 2010

Data	Hora	Veloc. Vento Media (mps)	Nebulosidade Media (décimos)	Pressao Média (mbar)	Temp Máxima Media (°C)	Temp Mínima Media (°C)	Umidade Relativa Media (%)
31/1/2010	0	2,3	6,758	1006,3	34,3	22,5	82,2
28/2/2010	0	2,3	6,304	1006,3	35,4	22,9	77,2
31/3/2010	0	2,6	6,194	1006,3	36,4	23,6	77,5
30/4/2010	0	2,1	0,000	1006,3	33,7	24,0	86,1
31/5/2010	0	2,4	6,081	1006,3	34,6	23,0	81,0
30/6/2010	0	0,0	5,633	1006,3	0,0	23,0	73,2
31/8/2010	0	3,2	4,246	1006,3	34,8	22,1	66,0
30/9/2010	0	0,0	4,483	1006,3	35,4	21,7	68,2
31/10/2010	0	3,1	4,581	1006,3	35,5	22,8	75,1
30/11/2010	0	3,1	4,867	1006,3	35,5	22,4	73,8
31/12/2010	0	2,4	6,726	1006,3	33,7	23,1	82,4

Fonte: <[http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/form\\_mapas\\_mensal.php](http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/form_mapas_mensal.php)> acessado em 30.05.2013

### 3.5. Modelo de Valoração Ambiental adotado

Foi utilizado o modelo de valoração “Custo de Reposição”, por dar ao usuário e ao órgão gestor, uma estimativa muito próxima da real, de quanto custaria para a sociedade tornar a água do rio novamente de qualidade adequada, caso o corpo hídrico não mais prestasse este serviço.

Para tanto, foram definidas três situações:

- **Situação A** – o sistema Jaguaribe recebe todas as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) oriundas das sedes municipais e o rio não faz a autodepuração destas cargas.
- **Situação B** - o sistema Jaguaribe recebe todas as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) oriundas das sedes municipais e o rio faz a autodepuração destas cargas.
- **Situação C** – o sistema Jaguaribe recebe parte das cargas poluidoras brutas, ou seja, um percentual do volume de esgoto é tratado para ser lançado no rio, o qual não faz a autodepuração das cargas poluidoras.

O volume de esgoto tratado pelas ETEs em cada sede municipal procura replicar os resultados obtidos, em termos de concentração de DBO em cada trecho, com a autodepuração natural do rio, apresentada na Situação B. A estimativa do volume em cada sede se faz por tentativa.

Sendo assim, percebe-se que:

- O serviço ambiental prestado pelo rio Jaguaribe é dado, pois, pela passagem da Situação A para Situação B.
- A valoração deste serviço ambiental feito gratuitamente pelo rio Jaguaribe pode ser estimada pelos custos do tratamento de parte dos esgotos lançados pelas sedes no corpo hídrico, para a passagem da Situação A para o Situação C.

### **3.5.1. Método de Tratamento Adotado**

Neste trabalho, optou-se pelo método de tratamento em lagoas de estabilização para os esgotos das cidades da bacia do Rio Jaguaribe. Existem várias maneiras de tratar os resíduos líquidos domésticos, definidos caso a caso. Regiões de clima frio ou temperado necessitam de sistemas de tratamento específicos, distintos daqueles utilizados em regiões de clima quente.

No Brasil, predominam os tratamentos por lagoas de estabilização, reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), fossas sépticas e sistemas de lodos ativados.

Segundo Santos (2007), 70% dos sistemas de tratamento de esgotos no Estado de São Paulo são realizados por lagoas de estabilização; no Estado de Minas Gerais, a predominância é para os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB).

Ainda segundo este autor, no Nordeste Brasileiro, há a predominância de lagoas de estabilização, inclusive no interior dos estados, devido à facilidade de implantação, não necessidade de mão de obra qualificada, e de operação e manutenção simplificadas.

Segundo Von Sperling (2002), as principais características para a implantação e vantagens de estações de tratamento de esgotos com lagoas de estabilização são as que se seguem:

- Satisfatória disponibilidade de área em muitas regiões;
- Baixo custo de implantação (desde que não sejam necessárias excessivas movimentações de terra);
- Clima favorável;
- Baixo custo de manutenção e operação;
- Satisfatória eficiência para remoção de DBO;
- Eficiente na remoção de patógenos;
- Boa Resistência a variações de cargas;

### **3.5.2. Estimativas dos custos de tratamento**

Sales (2010) levantou os custos de doze obras, executadas entre 2008 e 2010 pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará – CAGECE. Todas foram construídas com sistemas de tratamento de esgotos através de lagoas de estabilização.

A Tabela 3.4. apresenta os custos de implantação de ETE por municípios no Estado do Ceará. A partir destes dados, o autor obteve uma equação para o cálculo dos custos médios de implantação de ETE no Estado.

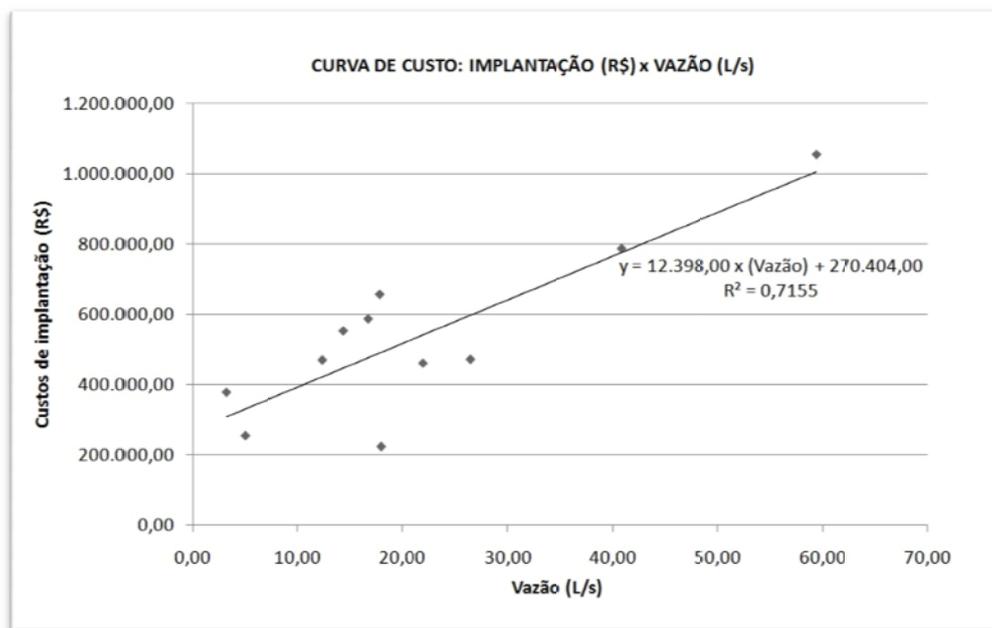
A Figura 3.3 apresenta a curva de custos de implantação de ETE versus vazão dos efluentes gerados, que pode ser utilizada para outros municípios do Ceará.

Tabela 3.4 - Custo de implantação de ETE por vazão nos municípios pesquisados no estado do Ceará.

Distrito	Total (R\$)	R\$/l/s	Eficiência (DBO (%))
Araquém em Coreau	833.090,12	118.390,88	98,80
Alcântaras	1.547.451,18	51.031,46	98,70
Porteiras	1.828.133,01	38.023,42	98,86
Catarina	2.000.636,46	38.510,22	98,86
Aurora	2.656.935,59	35.091,32	98,85
Frecheirinha	2.263.723,36	36.830,29	98,50
Coreau	2.146.454,13	12.487,21	98,61
Mucambo	2.549.975,88	20.970,62	98,85
Barro	3.458.073,67	17.836,34	99,00
Massapê	3.969.261,84	19.262,00	97,96
Tauá	6.842.878,32	17.759,66	92,09
Tianguá	3.152.185,84	6.814,29	-

Fonte: Sales (2010)

Figura 3.3 - Relação entre os custos de implantação e a vazão de projeto de ETE para o estado do Ceará.



Fonte: Adaptado de SALES (2010)

Sendo assim, o custo de tratamento do esgoto lançado por cada sede municipal no Rio Jaguaribe foi estimado através da Equação 3.6, a qual relaciona a vazão de esgoto tratada ao custo para seu tratamento por lagoa de estabilização:

$$\text{Custo de Tratamento} = 12.3908 \times Q_{\text{esg}} + 270.404,00 \quad (3.6)$$

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Definição das vazões de esgoto lançada no rio Jaguaribe por cada centro urbano

A Tabela 4.1 apresenta a vazão de esgoto (em litros/seg) produzida pela população urbana no trecho estudado, considerando-se o consumo de água per capita para o estado do Ceará, de 139,4 litros/hab.dia (SNIS, 2010) e que a vazão de esgoto representa 80% da vazão consumida pela população (FUNASA, 2007).

Tabela 4.1 – Geração de esgoto doméstico pela população das sedes municipais no trecho do rio Jaguaribe analisado

Sede	Nº habitantes na Sede Municipal (*)	Consumo de Água (litro/dia)	Vazão Esgoto (litro/dia)	Vazão Esgoto (litro/s)
Castanhão	-	-	-	-
Iracema	8.332,0	1.161.480,8	929.184,6	10,75
Alto Santo	6.059,0	844.624,6	675.699,7	7,82
S. J. Jaguaribe	3.169,0	441.758,6	353.406,9	4,09
Tabuleiro do Norte	16.827,0	2.345.683,8	1.876.547,0	21,72
Morada Nova	28.185,0	3.928.989,0	3.143.191,2	36,38
Limoeiro do Norte	31.972,0	4.456.896,8	3.565.517,4	41,27
Russas	38.626,0	5.384.464,4	4.307.571,5	49,86
Quixeré	5.735,0	799.459,0	639.567,2	7,40
Jaguaruana	16.489,0	2.298.566,6	1.838.853,3	21,28
Itaiçaba	4.279,0	596.492,6	477.194,1	5,52
Aracati	35.950,0	5.011.430,0	4.009.144,0	46,40
Fortim	4.541,0	633.015,4	506.412,3	5,86

Fonte: Autor (2013), a partir do Censo (2010) do IBGE.

As estimativas da carga orgânica poluidora pelo lançamento de esgotos domésticos foram realizadas considerando a população urbana residente na sede municipal, e concentração média de Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO de 350 mg/litro. Foram utilizados dados do Censo 2010 (IBGE) e do SNIS para identificar a população atendida por coleta de esgotos nos municípios.

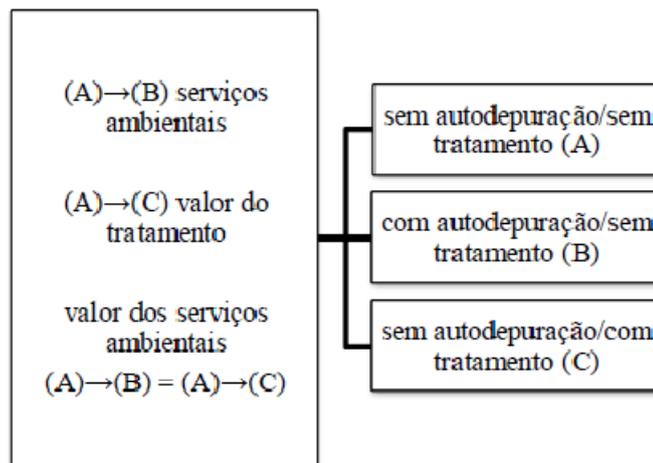
### 4.2. O serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe

O serviço ambiental prestado pelo rio Jaguaribe foi calculado conforme apresentado na Figura 4.1.

Primeiramente, simulou-se o sistema com todas as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) e o rio sem autodepuração (Situação A). Esta é a pior situação.

A seguir, simulou-se o sistema com todas as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) e o rio com autodepuração (Situação B). A seguir, por tentativa, procura-se, a cada trecho, o percentual de esgoto de cada sede municipal que deve ser tratado para reproduzir os mesmos resultados do Situação B, considerando que o rio Jaguaribe não realize o serviço de autodepuração destas cargas. Esta situação, denominado de C, corresponde a simular-se o sistema com todas as entradas com tratamento do esgoto e rio sem autodepuração (Situação C).

Figura 4.1 - Metodologia de avaliação dos serviços ambientais no Rio Jaguaribe



Fonte: O Autor (2013)

O serviço ambiental prestado pelo rio é dado, pois, pela passagem da Situação A para Situação B.

Os custos do tratamento do esgoto (feito pelo homem) são dados pela passagem da Situação A para a Situação C.

Caso este esgoto não seja tratado, e a natureza (rio) faça este trabalho, a passagem da Situação A para o B representa o valor dos serviços ambientais proporcionados pelo rio Jaguaribe.

#### 4.3. Topologia e Dados Hidráulicos e Hidrológicos adotados no Modelo QUAL2E

O modelo numérico de qualidade da água implementado no código computacional foi aplicado à bacia do Jaguaribe, a jusante do açude Castanhão. Neste

trecho, o rio recebe cargas poluidoras das sedes municipais situadas ao longo do rio principal e do rio Banabuiú (seu afluente)

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam o sistema completo onde foi realizada a modelagem. Cada cidade recebeu uma identificação por trecho, somando ao final um percurso total de 220 Km ao longo do rio Jaguaribe (principal) e 105 Km ao longo do rio Banabuiú (seu afluente). O início do percurso se deu a jusante do açude Castanhão; o final do trecho foi o oceano, após a cidade de Fortim. Para o modelo numérico, foram utilizadas simulações considerando os parâmetros apresentados na metodologia.

São apresentadas ainda as larguras do canal em cada trecho, a localidade, a distância, a identificação do trecho e a vazão regularizada adotada para os açudes Castanhão (30 m<sup>3</sup>/s) e Banabuiú (12,9 m<sup>3</sup>/s).

#### **4.4. Resultados do Modelo QUAL2E para o Cenário ZERO (atual)**

A Tabela 4.4 apresenta os resultados da simulação do sistema em termos de DBO para o Situação A, onde se têm as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) e o rio sem autodepuração. Esta é a pior situação, ocorrendo apenas a diluição pela água do rio, representada pelas vazões regularizadas do açude Castanhão (30 m<sup>3</sup>/s) e açude Banabuiú (12,9 m<sup>3</sup>/s). A título de exemplo, pode-se citar o caso do lançamento da sede municipal de Iracema (trecho 3). A concentração inicial da carga poluidora é de 350 mg/litro (DBO); ao adentrar no rio Jaguaribe, esta sofre o processo de diluição e é reduzida para 3,27 mg/litro. O trecho 11 representa a junção do rio Banabuiú com o rio Jaguaribe; no trecho do Jaguaribe a montante a este ponto (trecho 6), a DBO é de 4,5 mg/litro, reduzindo para 4,06. Os trechos 7 a 9 representam o processo no rio Banabuiú.

Observa-se que há um acúmulo de poluição ao longo do rio e, a partir do lançamento no trecho 14 (sede municipal de Jaguaruana) o rio Jaguaribe não apresenta mais o padrão de qualidade para as águas de Classe 2 (até 5 mg/l de DBO), conforme Resolução 357/2005, do Conama.

Tabela 4.2 - Dados de entrada para o Programa QUAL2E (rio principal – Rio Jaguaribe)

Largura canal (B) metros	Localidade	Distância	X (km)	Identificação Trecho	Nome trecho	Elemento tipo	Vazão regularizada (m3/s)
35	Castanhão	220	0	1	Castanhão_cabeça	1	30
		215	5			2	
		210	10			2	
		205	15			2	
		200	20			2	
		195	25			2	
		190	30			2	
		185	35			2	
		180	40			2	
		175	45			2	
		170	50			2	
		165	55			2	
		160	60			2	
50	Iracema	155	65	3	Iracema	6	
60	Alto Santo	150	70	4	Alto Santo	6	
		145	75			2	
		140	80			2	
65	São João do Jaguaribe	135	85	5	São João do Jaguaribe	6	
		130	90			2	
		125	95			2	
80	Tabuleiro do Norte	120	100	6	Tabuleiro do Norte	6	
		115	105			2	
		110	110			3	
	Juncao	105	115	10	Juncao	4	
100	Limoeiro do Norte	100	120	11	LimoeiroN	6	
		95	125			2	
		90	130			2	
120	Russas	85	135	12	Russas	6	
		80	140			2	
		75	145			2	
70	Quixeré	70	150	13	Quixeré	6	
		65	155			2	
		60	160			2	
		55	165			2	
		50	170			2	
125	Jaguaruana	45	175	14	Jaguaruana	6	
		40	180			2	
		35	185			2	
		30	190			2	
		25	195			2	
120	Itaiçaba	20	200	15	Itaiçaba	6	
		15	205			2	
165	Aracati	10	210	16	Aracati	6	
250	Fortim	5	215	17	Fortim	6	
		0	220			5	

Fonte: Autor (2013)

Tabela 4.3 - Dados de entrada para o Programa QUAL2E (tributário – Rio Banabuiú)

Largura canal (B) metros	Localidade	Distância	X (km)	Identificação Trecho	Nome trecho	Elemento tipo	Vazão regularizada (m3/s)
60	Banabuiú	105	0	7	Banabuiúcabeça	1	12,9
		100	5			2	
		95	10			2	
		90	15			2	
		85	20			2	
		80	25			2	
		75	30			2	
		70	35	8	Banabuiú	2	
		65	40			2	
		60	45			2	
		55	50			2	
		50	55			2	
		45	60			2	
		40	65			2	
35	70	2					
85	Morada Nova	30	75	9	MoradaN	6	
		25	80			2	
		20	85			2	
		15	90			2	
		10	95			2	
		5	100			2	
		0	105			2	

Fonte: Autor (2013)

Tabela 4.4 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação A (sem autodepuração e sem ETE)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
1	1	28,07	7,29	2,00
2	1	28,13	7,48	2,00
2	2	28,19	7,61	2,00
2	3	28,25	7,69	2,00
2	4	28,30	7,74	2,00
2	5	28,35	7,77	2,00
2	6	28,40	7,79	2,00
2	7	28,45	7,80	2,00
2	8	28,49	7,80	2,00
2	9	28,53	7,80	2,00
2	10	28,57	7,80	2,00
2	11	28,61	7,80	2,00
2	12	28,65	7,80	2,00
3	1	28,69	7,77	3,27
4	1	28,74	7,76	4,19
4	2	28,79	7,77	4,19
4	3	28,84	7,77	4,19
5	1	28,88	7,76	4,24
5	2	28,92	7,76	4,24
5	3	28,95	7,75	4,24
6	1	28,99	7,74	4,50
6	2	29,03	7,74	4,50
6	3	29,06	7,74	4,50
7	1	28,23	7,59	2,00
8	1	28,42	7,75	2,00
8	2	28,57	7,79	2,00
8	3	28,70	7,78	2,00
8	4	28,81	7,77	2,00
8	5	28,90	7,76	2,00
8	6	28,98	7,75	2,00
8	7	29,04	7,74	2,00
8	8	29,09	7,73	2,00
8	9	29,13	7,73	2,00
8	10	29,17	7,72	2,00
8	11	29,20	7,72	2,00
8	12	29,22	7,71	2,00
8	13	29,24	7,71	2,00
8	14	29,26	7,71	2,00
9	1	29,28	7,70	3,05
9	2	29,29	7,70	3,05
9	3	29,30	7,70	3,05
9	4	29,31	7,70	3,05
9	5	29,32	7,70	3,05
9	6	29,32	7,70	3,05
10	1	29,16	7,72	4,06
11	1	29,17	7,72	4,42
11	2	29,19	7,72	4,42
11	3	29,20	7,72	4,42
12	1	29,22	7,71	4,85
12	2	29,23	7,71	4,85
12	3	29,24	7,71	4,85
13	1	29,25	7,71	4,91
13	1	29,25	7,71	4,91
13	2	29,26	7,71	4,91
13	3	29,26	7,71	4,91
13	4	29,27	7,71	4,91
13	5	29,27	7,71	4,91

Tabela 4.4 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação A (sem autodepuração e sem ETE) (continuação)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
14	1	29,28	7,70	5,10
14	2	29,29	7,70	5,10
14	3	29,29	7,70	5,10
14	4	29,30	7,70	5,10
14	5	29,30	7,70	5,10
15	1	29,31	7,70	5,14
15	2	29,31	7,70	5,14
16	1	29,31	7,70	5,54
17	1	29,32	7,70	5,59

Fonte: Autor (2013)

A Tabela 4.5 apresenta os resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, onde se têm as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) e o rio com autodepuração. A passagem da Situação A para Situação B representa o serviço ambiental prestado pelo rio.

Tabela 4.5 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação B (com autodepuração e sem ETE)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
1	1	28,07	7,26	1,96
2	1	28,13	7,43	1,93
2	2	28,19	7,54	1,90
2	3	28,25	7,61	1,86
2	4	28,30	7,66	1,83
2	5	28,35	7,68	1,80
2	6	28,40	7,70	1,76
2	7	28,45	7,71	1,73
2	8	28,49	7,72	1,70
2	9	28,53	7,72	1,67
2	10	28,57	7,72	1,64
2	11	28,61	7,72	1,61
2	12	28,65	7,71	1,58
3	1	28,69	7,68	2,80
4	1	28,74	7,65	3,64
4	2	28,79	7,65	3,56
4	3	28,84	7,65	3,48
5	1	28,88	7,64	3,45
5	2	28,92	7,64	3,37
5	3	28,95	7,64	3,29
6	1	28,99	7,64	3,47
6	2	29,03	7,64	3,38
6	3	29,06	7,64	3,30
7	1	28,23	7,57	1,94

Tabela 4.5 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação B (com autodepuração e sem ETE) (continuação)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
8	1	28,42	7,72	1,88
8	2	28,57	7,75	1,82
8	3	28,70	7,75	1,77
8	4	28,81	7,74	1,71
8	5	28,90	7,73	1,66
8	6	28,98	7,72	1,61
8	7	29,04	7,71	1,56
8	8	29,09	7,70	1,51
8	9	29,13	7,70	1,46
8	10	29,17	7,69	1,42
8	11	29,20	7,69	1,37
8	12	29,22	7,69	1,33
8	13	29,24	7,69	1,29
8	14	29,26	7,68	1,25
9	1	29,28	7,67	2,22
9	2	29,29	7,67	2,14
9	3	29,30	7,67	2,07
9	4	29,31	7,67	1,99
9	5	29,32	7,67	1,92
9	6	29,32	7,67	1,85
10	1	29,16	7,65	2,81
11	1	29,17	7,63	3,09
11	2	29,19	7,63	3,02
11	3	29,20	7,62	2,95
12	1	29,22	7,62	3,30
12	2	29,23	7,62	3,21
12	3	29,24	7,62	3,13
13	1	29,25	7,61	3,12
13	2	29,26	7,60	3,06
13	3	29,26	7,59	2,99
13	4	29,27	7,59	2,93
13	5	29,27	7,59	2,87
14	1	29,28	7,60	2,98
14	2	29,29	7,61	2,90
14	3	29,29	7,62	2,83
14	4	29,30	7,63	2,75
14	5	29,30	7,63	2,68
15	1	29,31	7,63	2,66
15	2	29,31	7,63	2,59
16	1	29,31	7,62	2,91
17	1	29,32	7,64	2,86

Fonte: Autor (2013)

Observa-se que na Situação B, as cargas poluidoras sofrem processo de autodepuração, além da diluição. A título de exemplo, pode-se citar o caso do lançamento da sede municipal de Alto Santo (trecho 4). A concentração inicial da carga poluidora é de 350 mg/litro (DBO); ao adentrar no rio Jaguaribe, esta sofre o processo de diluição e é reduzida para 3,64 mg/litro. Antes de chegar à sede municipal de São João do Jaguaribe (trecho 5), ela vai sofrendo um processo de autodepuração pelo rio, sendo reduzida para

3,48 mg/litro. A jusante de Fortim, na foz do rio Jaguaribe, a concentração de DBO é reduzida para 2,86 (dentro dos padrões do CONAMA para Classe 2).

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da simulação do sistema, em termos de DBO, para a Situação C, onde se procura reproduzir o serviço ambiental feito gratuitamente pelo rio, através do tratamento de parte do esgoto lançado nas sedes municipais. Considera-se que o rio Jaguaribe não realiza o serviço de autodepuração destas cargas, apenas o de diluição. O tratamento dos esgotos é feito por Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs. Observa-se que o processo é razoavelmente reproduzido. No trecho 17 (Fortim), a concentração de DBO é de 2,87 mg/litro.

Tabela 4.6 - Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação C (sem autodepuração e com ETE)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
1	1	28,07	2,00	0,00
2	1	28,13	7,48	2,00
2	2	28,19	7,61	2,00
2	3	28,25	7,69	2,00
2	4	28,30	7,74	2,00
2	5	28,35	7,77	2,00
2	6	28,40	7,79	2,00
2	7	28,45	7,80	2,00
2	8	28,49	7,80	2,00
2	9	28,53	7,80	2,00
2	10	28,57	7,80	2,00
2	11	28,61	7,80	2,00
2	12	28,65	7,80	2,00
3	1	28,69	7,77	2,31
4	1	28,74	7,76	2,53
4	2	28,79	7,77	2,53
4	3	28,84	7,77	2,53
5	1	28,88	7,76	2,54
5	2	28,92	7,76	2,54
5	3	28,95	7,75	2,54
6	1	28,99	7,74	2,61
6	2	29,03	7,74	2,61
6	3	29,06	7,74	2,61
7	1	28,23	7,59	2,00
8	1	28,42	7,75	2,00
8	2	28,57	7,79	2,00
8	3	28,70	7,78	2,00
8	4	28,81	7,77	2,00
8	5	28,90	7,76	2,00
8	6	28,98	7,75	2,00
8	7	29,04	7,74	2,00
8	8	29,09	7,73	2,00
8	9	29,13	7,73	2,00
8	10	29,17	7,72	2,00
8	11	29,20	7,72	2,00
8	12	29,22	7,71	2,00
8	13	29,24	7,71	2,00
8	14	29,26	7,71	2,00

Tabela 4.6 – Resultados do Programa QUAL2E (rio Jaguaribe) – Situação C (sem autodepuração e com ETE) (continuação)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
9	1	29,28	7,70	2,26
9	2	29,29	7,70	2,26
9	3	29,30	7,70	2,26
9	4	29,31	7,70	2,26
9	5	29,32	7,70	2,26
9	6	29,32	7,70	2,26
10	1	29,16	7,72	2,50
11	1	29,17	7,72	2,59
11	2	29,19	7,72	2,59
11	3	29,20	7,72	2,59
12	1	29,22	7,71	2,69
12	2	29,23	7,71	2,69
12	3	29,24	7,71	2,69
13	1	29,25	7,71	2,71
13	2	29,26	7,71	2,71
13	3	29,26	7,71	2,71
13	4	29,27	7,71	2,71
13	5	29,27	7,71	2,71
14	1	29,28	7,70	2,75
14	2	29,29	7,70	2,75
14	3	29,29	7,70	2,75
14	4	29,30	7,70	2,75
14	5	29,30	7,70	2,75
15	1	29,31	7,70	2,77
15	2	29,31	7,70	2,77
16	1	29,31	7,70	2,86
17	1	29,32	7,70	2,87

Fonte: Autor (2013)

A Figura 4.2 apresenta os resultados mostrados nas tabelas 4.4 a 4.6. Observe-se que o serviço ambiental prestado pelo rio é dado, graficamente, pela diferença entre a Situação A e a Situação B. Os custos do tratamento do esgoto (feito pelo homem) são dados pela diferença da Situação A para a Situação C.

#### 4.5. Valorando o serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe no Cenário ZERO (atual)

Calculou-se o custo do tratamento do esgoto lançado por cada sede municipal no rio Jaguaribe. Utilizou-se a curva definida por Sales (2010), a qual relaciona vazão de esgoto tratado ao custo para seu tratamento por lagoa de estabilização. A Tabela 4.7 apresenta a concentração inicial de DBO (350 mg/litro), a vazão de esgoto lançado em cada trecho pela sede municipal, o percentual deste esgoto que deve ser tratado para obter a concentração final de DBO (definida pela Situação B) e o custo de tratamento. Observa-se que, para replicar a Situação B, 75% do esgoto gerado em cada sede deve ser tratado e que o custo total do serviço ambiental prestado pelo rio Jaguaribe é de R\$ 5.658.365,92.

Tabela 4.7 - Custos de Tratamento dos Esgotos (por lagoa de estabilização) lançados pelas sedes municipais no Rio Jaguaribe/CE.

Localidade	DBO Concentração inicial (mg/l)	Vazão de esgoto lançado (l/s)	% Tratado da Vazão de Esgoto lançado	DBO Concentração final (mg/l)	Custo do Tratamento (R\$)
Castanhão	-	-	--	2,00	
Iracema	350,0	10,75	0,75	2,31	370.762,71
Alto Santo	350,0	7,82	0,75	2,53	343.215,22
São João do Jaguaribe	350,0	4,09	0,75	2,54	308.434,87
Tabuleiro do Norte	350,0	21,71	0,75	2,61	472.274,44
Limoeiro do Norte	350,0	41,85	0,75	2,59	661.621,65
Russas	350,0	49,85	0,75	2,69	735.788,35
Quixeré	350,0	7,40	0,75	2,71	339.304,65
Jaguaruana	350,0	21,28	0,75	2,75	468.276,08
Itaiçaba	350,0	5,52	0,75	2,77	321.800,16
Aracati	350,0	46,40	0,75	2,86	702.429,67
Fortim	350,0	5,86	0,75	2,87	324.965,86
Banabuiú	-	-	-	2,00	-
Morada Nova	350,0	36,37	0,75	2,26	609.492,28
Total:					<b>5.658.365,92</b>

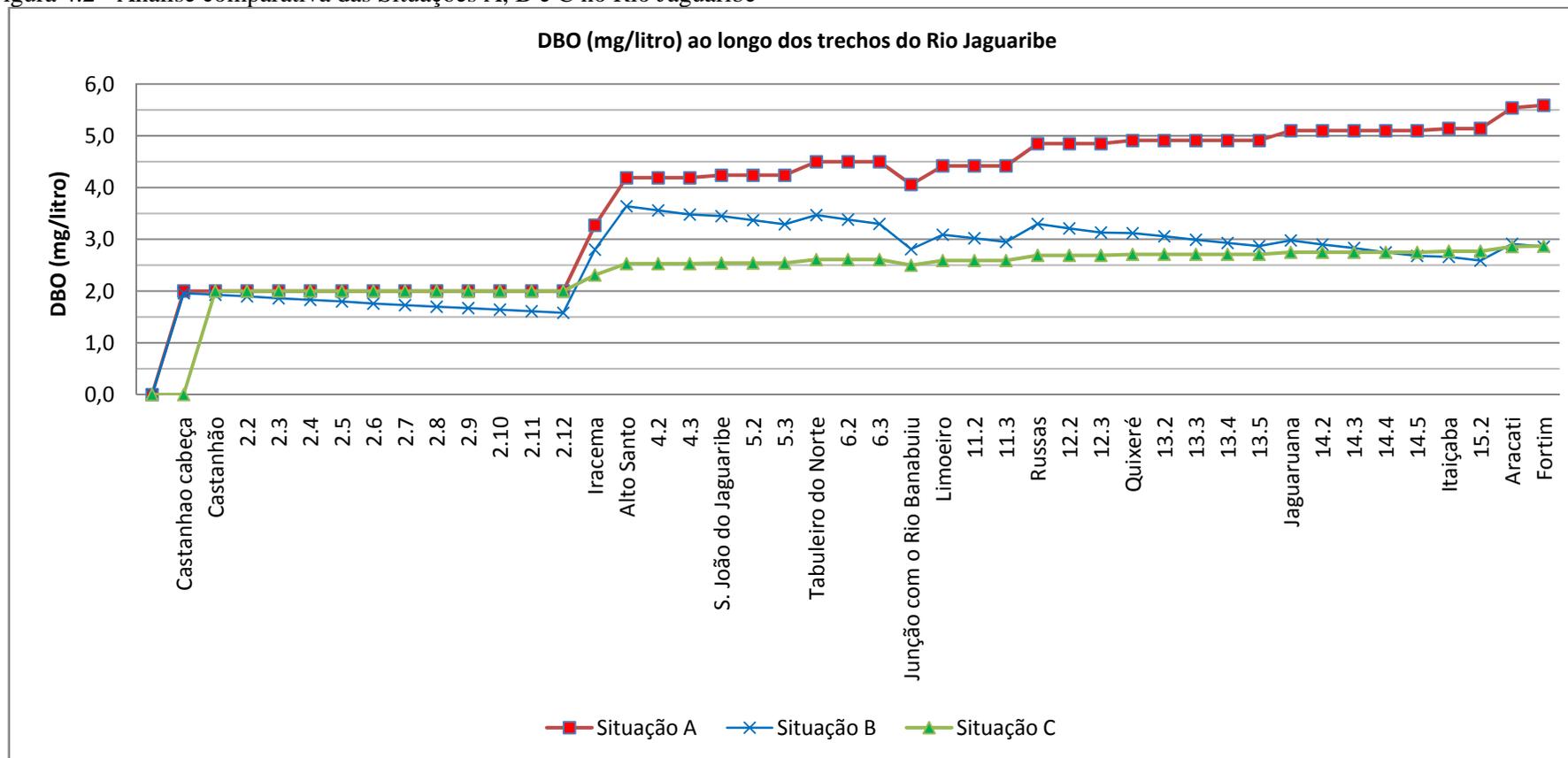
Fonte: Autor (2013)

#### 4.6. Impactos das Mudanças Climáticas

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas nos serviços ambientais prestados pelo Rio Jaguaribe, utilizou-se os modelos globais do “Coupled Model Intercomparison Project Phase 5” (CMIP5), que irão subsidiar a publicação do Quinto Relatório (AR5, prevista para publicação no final de 2013).

Os dados provenientes do CMIP5 são resultados de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que contribuem para confecção dos relatórios dos IPCC (Tabela 4.8), forçadas pelas concentrações observadas de gases de efeito estufa durante o século XX. Para cada modelo serão considerados diferentes membros, conforme disponibilizados pelo CMIP5.

Figura 4.2 - Análise comparativa das Situações A, B e C no Rio Jaguaribe



Fonte: Autor (2013)

Tabela 4.8 - Modelos do CMIP5 analisados

Modelo	Instituição
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Centre
GISS-E2-H	NASA Goddard Institute for Space Studies
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace
CCCMA/CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Centre National de Recherches Meteorologiques
CNRM-CM5	Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (CNRM/CERFACS)
INM_CM4	Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Science

Fonte: Silveira e Sousa Filho (2013)

No presente trabalho selecionaram-se dois modelos para analisar a sensibilidade dos serviços ambientais às mudanças climáticas: o Modelo CanESM2 que, segundo Silveira e Souza Filho (2013), obteve melhores resultados na avaliação de precipitação para o Nordeste Brasileiro e traz cenários mais secos para a Região, e o Modelo HadGEM-ES, desenvolvido pelo Met Office Hadley Centre for Climate Change, e utilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A Tabela 4.9 apresenta os parâmetros de entrada em ambos os modelos.

Tabela 4.9- Parâmetros de entrada nos modelos HadGEM2-AO e CanESM2 – (ano 2020 – 2099)

Modelo	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)	Temperatura mínima média (°C)	Temperatura máxima média (°C)	Umidade média (%)
HadGEM2-AO	5,1	22,0	34,2	57
CanESM2	5,4	23,1	36,1	72

Fonte: Silveira e Souza Filho (2013)

A Tabela 4.10 apresenta os resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo HadGEM-AO, onde se têm as entradas de cargas poluidoras brutas (sem tratamento do esgoto) e o rio com autodepuração.

Tabela 4.10 - Resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo HadGEM-AO - (ano 2020 – 2099), Rio Jaguaribe/CE.

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
1	1	27,84	7,68	1,93
2	1	27,72	7,84	1,87
2	2	27,63	7,89	1,80
2	3	27,55	7,91	1,74
2	4	27,50	7,92	1,68
2	5	27,46	7,93	1,63
2	6	27,42	7,94	1,57
2	7	27,40	7,94	1,52
2	8	27,38	7,94	1,47
2	9	27,36	7,95	1,42
2	10	27,35	7,95	1,37
2	11	27,34	7,95	1,33
2	12	27,34	7,95	1,28
3	1	27,37	7,85	8,26
4	1	27,38	7,82	12,86
4	2	27,36	7,84	12,34
4	3	27,34	7,85	11,84
5	1	27,33	7,86	11,60
5	2	27,33	7,87	11,11
5	3	27,32	7,87	10,65
6	1	27,33	7,87	11,58
6	2	27,32	7,88	11,06
6	3	27,32	7,89	10,56
7	1	27,77	7,77	1,92
8	1	27,61	7,90	1,84
8	2	27,51	7,93	1,76
8	3	27,44	7,94	1,69
8	4	27,40	7,95	1,62
8	5	27,37	7,95	1,55
8	6	27,35	7,96	1,49
8	7	27,34	7,96	1,43
8	8	27,33	7,96	1,37
8	9	27,32	7,96	1,31
8	10	27,32	7,96	1,26
8	11	27,32	7,96	1,21
8	12	27,32	7,96	1,16
8	13	27,31	7,96	1,11

Tabela 4.10 - Resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo HadGEM-AO (ano 2020 – 2099) (continuação)

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
8	14	27,31	7,97	1,06
9	1	27,33	7,94	3,54
9	2	27,32	7,95	3,37
9	3	27,32	7,95	3,21
9	4	27,32	7,95	3,06
9	5	27,31	7,95	2,92
9	6	27,31	7,95	2,79
10	1	27,31	7,92	6,56
11	1	27,32	7,89	7,69
11	2	27,32	7,89	7,40
11	3	27,32	7,89	7,12
12	1	27,33	7,88	8,51
12	2	27,32	7,89	8,17
12	3	27,32	7,90	7,84
13	1	27,32	7,88	7,80
13	2	27,32	7,87	7,54
13	3	27,32	7,87	7,30
13	4	27,32	7,87	7,06
13	5	27,31	7,88	6,82
14	1	27,32	7,88	7,29
14	2	27,32	7,90	6,99
14	3	27,32	7,91	6,70
14	4	27,31	7,91	6,43
14	5	27,31	7,92	6,16
15	1	27,31	7,92	6,10
15	2	27,31	7,92	5,85
16	1	27,32	7,91	7,14
17	1	27,32	7,93	6,97

Fonte: Autor (2013)

A Tabela 4.11 apresenta os resultados utilizando o Modelo CanESM2.

Tabela 4.11 - Resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo CanESM2 (ano 2020 – 2099), Rio Jaguaribe/CE.

Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
1	1	28,66	7,58	1,93
2	1	29,17	7,67	1,86
2	2	29,56	7,64	1,79
2	3	29,86	7,61	1,73
2	4	30,09	7,58	1,67
2	5	30,27	7,55	1,60
2	6	30,40	7,54	1,54
2	7	30,50	7,52	1,48
2	8	30,58	7,51	1,43
2	9	30,64	7,51	1,37
2	10	30,69	7,50	1,32
2	11	30,72	7,50	1,27
2	12	30,75	7,49	1,22
3	1	30,76	7,39	7,80
4	1	30,77	7,35	12,10
4	2	30,79	7,37	11,54
4	3	30,80	7,38	11,01
5	1	30,81	7,39	10,72
5	2	30,82	7,39	10,21
5	3	30,82	7,40	9,73
6	1	30,82	7,39	10,56
6	2	30,83	7,41	10,02
6	3	30,83	7,41	9,51
7	1	28,99	7,62	1,91
8	1	29,65	7,63	1,83
8	2	30,07	7,59	1,74
8	3	30,34	7,55	1,66
8	4	30,52	7,53	1,58
8	5	30,63	7,51	1,51
8	6	30,70	7,50	1,44
8	7	30,75	7,50	1,37
8	8	30,78	7,49	1,30
8	9	30,79	7,49	1,24
8	10	30,81	7,49	1,18
8	11	30,82	7,49	1,13
8	12	30,82	7,49	1,07
8	13	30,82	7,49	1,02
8	14	30,83	7,49	0,97

Tabela 4.11 - Resultados da simulação do sistema em termos de DBO para a Situação B, utilizando o Modelo CanESM2 (ano 2020 – 2099) (continuação)

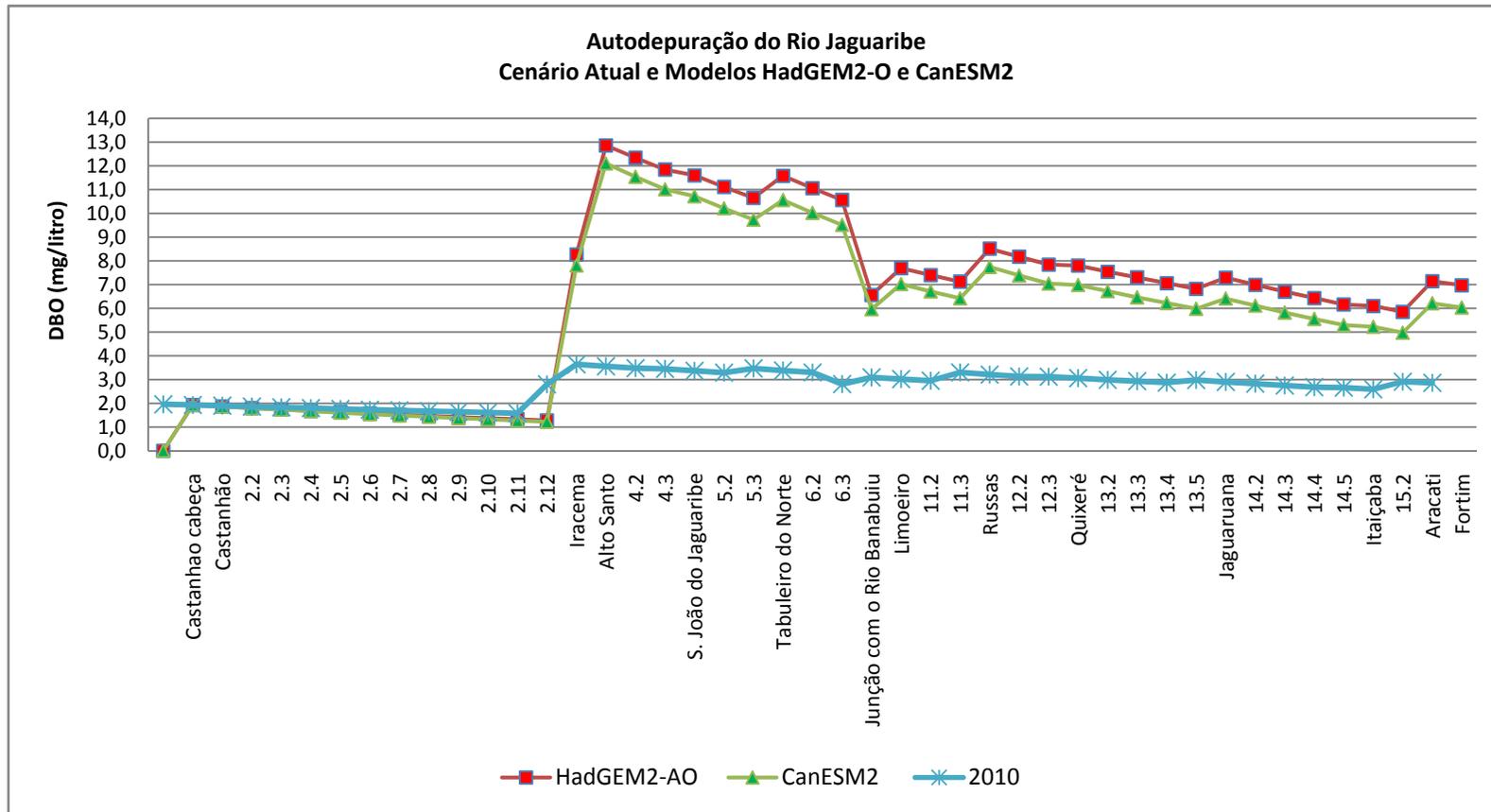
Trecho	Elemento	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)
9	1	30,82	7,47	3,38
9	1	30,82	7,47	3,38
9	2	30,83	7,47	3,20
9	3	30,83	7,48	3,02
9	4	30,83	7,48	2,86
9	5	30,83	7,48	2,71
9	6	30,83	7,48	2,56
10	1	30,83	7,44	5,96
11	1	30,83	7,41	7,02
11	2	30,83	7,42	6,71
11	3	30,83	7,42	6,42
12	1	30,83	7,41	7,74
12	2	30,83	7,42	7,38
12	3	30,83	7,42	7,04
13	1	30,83	7,41	6,98
13	2	30,83	7,4	6,72
13	3	30,83	7,4	6,46
13	4	30,83	7,4	6,22
13	5	30,83	7,4	5,98
14	1	30,83	7,41	6,41
14	2	30,83	7,43	6,11
14	3	30,83	7,44	5,82
14	4	30,83	7,44	5,55
14	5	30,83	7,44	5,29
15	1	30,83	7,44	5,22
15	2	30,83	7,45	4,97
16	1	30,83	7,44	6,21
17	1	30,83	7,45	6,03

Fonte: Autor (2013)

A Figura 4.3 apresenta a análise comparativa dos valores de DBO (em mg/litro) ao longo dos trechos analisados do Rio Jaguaribe, estimados cenários futuros, utilizando os Modelos HadGEM2-AO e CanESM2 para os anos de 2020 a 2099.

A título de comparação, colocaram-se os resultados da Situação B (autodepuração do Rio Jaguaribe e sem tratamento de esgoto) no Cenário atual.

Figura 4.3 – Análise Comparativa dos Valores de DBO (em mg/litro) ao longo dos trechos analisados do Rio Jaguaribe estimados para o Cenário Atual (2010) e Cenários Futuros, utilizando os Modelos HadGEM2-AO e CanESM2



Fonte: Autor (2013)

Observa-se, na Figura 4.3, que os modelos climáticos apresentam resultados muito semelhantes entre si. Apresentam, no entanto, altos valores de DBO em um cenário de mudanças climáticas, apontando para situações extremamente preocupantes. A partir de Iracema, por exemplo, o Rio Jaguaribe não mais atende os padrões da Classe 2, atingindo valores muito altos de DBO, próximos a 12 mg/litro, só decrescendo um pouco com o aporte das águas do Rio Banabuiú.

Há que se ter uma certa reserva em analisar tais resultados. Uma provável razão é a adoção da vazão média, em torno de 5,0 m<sup>3</sup>/s, para a Bacia do Jaguaribe, por todos os modelos climáticos. Este valor é muito inferior aos adotados no Cenário Atual, que considera a vazão liberada do Açude Castanhão de 30 m<sup>3</sup>/s e do Banabuiú, de 12,9 m<sup>3</sup>/s (suas vazões regularizadas de projeto).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve como principal objetivo mensurar o serviço ambiental prestado pelo Rio Jaguaribe na diluição e na autodepuração das cargas orgânicas que a ele são destinadas, tomando como área de estudo o trecho do rio a jusante do Açude Castanhão até sua foz. Sabe-se que os doze centros urbanos situados às suas margens, objeto deste estudo, são potenciais poluidores do corpo hídrico por esgotos domésticos, dada a não existência de sistema adequado de coleta, tratamento e despejo final de seus efluentes.

Utilizou-se o modelo de valoração “Custo de Reposição”, por dar ao usuário e ao órgão gestor, uma estimativa muito próxima da real, de quanto custaria para a sociedade tornar a água do rio novamente de qualidade adequada, caso o corpo hídrico não mais prestasse este serviço.

O modelo numérico utilizado foi o QUAL2E, programa computacional capaz de calcular os mais diversos parâmetros de qualidade da água em rios, e analisou-se o comportamento do Rio Jaguaribe, em termos de valores de DBO, em três situações: A, B e C.

Observou-se na Situação A (a mais crítica, vez que considera o lançamento do esgoto bruto e o rio sem autodepuração), que o decréscimo de DBO se dá unicamente pela diluição da água do rio, lançada pelo açude Castanhão (30 m<sup>3</sup>/s) e pelo Açude Banabuiú (12,9 m<sup>3</sup>/s). O Rio Jaguaribe tem, inicialmente, uma concentração de DBO de 2 mg/litro. No local de entrada dos esgotos da sede municipal de Iracema (concentração inicial da carga poluidora de 350 mg/litro), esta é reduzida para 3,27 mg/litro. O mesmo ocorre no trecho do rio que recebe o aporte das vazões regularizadas do Açude Banabuiú, passando de uma concentração de 4,5 mg/litro, para 4,06 mg/litro. Observa-se um acúmulo de poluição ao longo do rio e que, a partir do lançamento da sede municipal de Jaguaruana, o rio Jaguaribe não apresenta mais o padrão de qualidade para as águas de Classe 2 (até 5 mg/l de DBO), conforme Resolução 357/2005, do CONAMA. Na sua foz, a jusante de Fortim, a concentração de DBO é de 5,59 mg/litro

O serviço ambiental prestado pelo rio é observado na Situação B, onde as cargas poluidoras sofrem processo de autodepuração e de diluição. Ao longo do rio, a DBO

decrece continuamente, com redução média, em relação à Situação A, de 25% da carga poluidora, em cada ponto analisado, chegando a quase 50% na sua foz, a jusante de Fortim (2,86 mg/litro). A simulação da Situação C tentou reproduzir a Situação B, por tentativa.

Calculou-se o custo do tratamento do esgoto lançado por cada sede municipal no rio Jaguaribe, utilizando-se a curva definida por Sales (2010), a qual relaciona vazão de esgoto tratado ao custo para seu tratamento por lagoa de estabilização, baseado em 12 projetos realizados pela CAGECE, de 2008 a 2010. Observou-se que, para replicar a Situação B, 75% do esgoto gerado em cada sede deve ser tratado e que o custo total do serviço ambiental prestado pelo rio Jaguaribe, no Cenário ZERO, é de R\$ 5.658.365,92.

Para analisar a sensibilidade dos serviços ambientais às mudanças climáticas, utilizaram-se dois modelos globais do CMIP5 - o Modelo CanESM2 e o Modelo HadGEM-ES, os quais apresentaram resultados muito semelhantes entre si, com valores muito altos de DBO, apontando para situações extremamente preocupantes. A partir de Iracema, por exemplo, o Rio Jaguaribe não mais atenderia os padrões da Classe 2, atingindo valores muito altos de DBO, próximos a 12 mg/litro, só decrescendo um pouco com o aporte das águas do Rio Banabuiú. Há que se ter uma certa reserva em analisar tais resultados. Uma provável razão é a adoção da vazão média, em torno de 5,0 m<sup>3</sup>/s, para a Bacia do Jaguaribe, por todos os modelos climáticos. Este valor é muito inferior aos adotados no Cenário ZERO, que considera a vazão liberada do Açude Castanhão de 30 m<sup>3</sup>/s e do Banabuiú, de 12,9 m<sup>3</sup>/s (suas vazões regularizadas de projeto).

Sendo assim, recomenda-se que estudos posteriores efetuem correções necessárias nos modelos de mudanças climáticas no que diz respeito às vazões na bacia, que aparentemente, estão muito baixas.

## 6. REFERÊNCIAS

- AGRAWALA, S. Explaining the Evolution of the IPCC Structure and Process. ENRP Discussion Paper E-97-05, Kennedy School of Government, Harvard University, 1997.
- ALVES, L. M. Simulações da Variabilidade do Clima Presente sobre a América do Sul Utilizando um Modelo Climático Regional. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos; INPE, 92 p, 2007.
- AMBRIZZI, T., ROCHA, R., MARENGO, J. A., PISNITCHENKO, I., ALVES L.M. Cenários Regionalizados de Clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de Clima usando Três Modelos Regionais. Relatório 3, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS –SBF, DIRETORIA DE 169 CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio. Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade - Sub projeto: Caracterização do Clima Atual e definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília; Fevereiro, 2007
- BARNSTON, A .G et al. NCEP forecast for the El Niño of 1997-98 and its U.S. impacts. Bull. Amer. Meteor. Soc; 80, 1829-1852, 1999.
- BATEMAN, I.; TURNER, K. Valuation of the Environment, Methods and Techniques: the Contingent Valuation Method. In: TURNER, R. K., ed. Sustainable Environmental Economics and Management. Principles and Practice. London and New York: Belhaven, 1992.
- BATES, B. C., KUNDZEWICZ, Z.W.; WU, S.; e PALUTIKOF, J.P (Eds.): Climate Change and Water Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva; 210 pp, 2008.
- BROWN, L.C.; BARNWELL Jr., T.O. The Enhanced Stream Water Quality Modes QUAL2E and QUAL2E – UNCAS: Documentation and User Manual Environmental Research and Development U. S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, 189p., 1987.
- CANE, M.A., ZEBIAK, S.E., DOLAN, S.C. Experimental forecast of El Niño. Nature, 321, 827- 832. 1996.
- CARTER, T.R.; ALFSEN, K.; BARROW, E.; BASS, B.; DAI, X. DESANKER, P.; GAFFIN, S.R.; GIORGI, F.; HULME, M.; LAL, M.; MATA, L.J.; MEARNNS, L.O.; MITCHEL, J.F.B.; MORITA, T.; MOSS, R.; MURDIYARSO, D.; PABON-CAICEDO, J.D.; PALUTIKOF, J. PARRY, M.L.; ROSENZWEIG, C.; SEGUIN, B.; SCHOLE, R.J.; WHETTON, P.H. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment – Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessement (TGICA) – Intergovernmental Pannel on Climate Change. 66 p. 2007.
- CAVALCANTI, J. S. B. New Challenges for the Players in Global Agriculture and Food International Journal of Sociology of Agriculture and Food. Florida Atlantic University USA, 1996.

- CHAPRA, S. C. Surface Water-Quality Modeling, McGraw-Hill, New York, 844p., 1997.
- CLAWSON, M.; KNETSCH, J. L. Economics of Outdoor Recreation. Baltimore: the Johns Hopkins University Press, 1966.
- COLE, M. A. Trade, The Pollution Haven Hypothesis and the Environmental Kuznets Curve: Examining the Linkages. Ecological Economics, Birmingham, v. 48, 2004.
- CONSTANZA, R. (Org.). Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability. New York: Columbia University Press, 1991.
- CONSTANZA, R. Economia Ecológica: uma Agenda de Pesquisa. In: MAY, P. H.; MOTTA, R. S. Valorando a Natureza: Análise Econômica para o Desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: Campus, 1994. cap. 7. p.111- 144.
- CYSNE, A. P. Proposta de um Modelo Robusto de Governança Adaptativa para os Recursos Hídricos utilizando Cenários Climáticos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, 2012.
- DAILEY, G. C. (ed.). Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997.
- DALY, H. Ecological Economics and the Ecology of Economics. New York: Edward Elgar, 1999.
- DALY, H. e FARLEY, J. Ecological Economics: Principles and Applications. Island Press, Washington DC, 2003
- DAVIS, R. R. The Value of Outdoor Recreation: An Economic Study of the Maine Woods. Harvard University, 1963.
- DEACON, R.; NORMAN, C. S. Is the Environmental Kuznets Curve an Empirical Regularity? Scholarship Repository, University of California, Santa Barbara, 2004.
- ESPARTA, A.R.J. e MOREIRA, J.R. Principais Conclusões do Terceiro Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Apresentado no IX Congresso Brasileiro de Energia, 20 a 22 de maio de 2002, Rio de Janeiro - RJ; 2002.
- FERNANDEZ, B. P.M. Ecodesenvolvimento, Desenvolvimento Sustentável e Economia Ecológica: Em que sentido representam alternativas ao paradigma de desenvolvimento tradicional? Desenvolvimento e Meio Ambiente, n. 23, p. 109-120, Curitiba; Editora UFPR, jan./jun, 2011.
- FIGUEROA, F. E. V. Avaliação Econômica de Ambientes Naturais – O Caso das Áreas Alagadas - Uma proposta para a represa do lobo (Broa) – Itirapina - SP. São Carlos. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996.
- FONSECA, L. N.; RIBEIRO, E., P. Preservação Ambiental e Crescimento Econômico no Brasil. In: VII ENCONTRO DE ECONOMIA DA REGIÃO SUL, 2004. Preservação Ambiental e Crescimento Econômico no Brasil. Rio Grande do Sul, 2004.

- FREEMAN III, A. M. *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. Washington, DC; Resources for the Future, 1993.516 p.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA) *Manual de Saneamento Básico*, Brasília,2007
- GEORGESCU-ROEGEN, N.*The Entropy Law and the Economic Process* .Cambridge; Harvard University Press, 1971.
- GROSSMAN, G., KRUEGER, A. *Economic Growth and the Environment* *Quarterly Journal of Economics*, Massachusetts; vol. 110, n. 2, 1995.
- GODARD, O. *Environnement et Théorie Economique: de L'internalisation des Effets Externes au Développement soutenable*. In: SEMINAIRE Ecologie et Environnement, École Nationale de La Magistrature, Paris, 1992.
- HÄSNER, C. e SHIKI, S.*Bens e Serviços Ambientais no Brasil*. Revista Pontes. International Centre for Trade and Sustainable Development., 2004.Disponível em: [http://www.prospective.com.br/artigos/7/pontes4-4\\_Cecilia\\_e\\_Shigeo\\_2008.pdf](http://www.prospective.com.br/artigos/7/pontes4-4_Cecilia_e_Shigeo_2008.pdf). Acessado em 15.06.2013
- HANLEY, N. e SPASH, C. L. *Cost-Benefit Analysis and the Environment*.Hants, Inglaterra: Edward Elgar, 1993.
- HELAL, G. *Nature and the Market Place: Capturing the Value of Ecosystem Services*. Washington, DC; Island Press, 2000.
- HUDSON, D. A.; JONES, R. G. *Regional Climate Model Simulations of Present-Day and Future Climates of Southern Africa*. Bracknell: Met Office, p. (Note 39), 2002.
- HUFSCHMIDT, M. M.; JAMES, D. E.; MEISTER, A. D.; BOWER, B. T.; DIXON, J. A. *Environment, Natural Systems, and Development: an economic valuation guide*. Baltimore, EUA; Johns Hopkins University Press,1983.
- IPCC-TGICA: *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. Version 2.Prepared by T.R. Carter on behalf of the176 Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp, 2007.
- JONES, R.G.; NOGUER, M.; HASSELL, D.C.; HUDSON, D.; WILSON, S.S.; JENKINS,G.J; MITCHELL, J.F.B. *Generating High Resolution Climate Change Scenarios using PRECIS*. Exeter, UK: Met Office Hadley Centre, 2004.
- KATO, H.; HIRAKUCHI, H.; NISCHIZAWA, K.; GIORGI, F. *Performance of NCAR Reg CM in the Simulation of June and January Climates over Eastern Asia and the High Resolution Effect of the Model* *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. D6, p. 6455-6476, 1999.
- LIU, Y.; GIORGI, F.; WASHINGTON, W. M. *Simulation of Summer Monsoon Climate over East Asia with an NCAR Regional Climate Model* *Monthly Weather Review*, v. 122, n. 10, p. 2331-2348, 1994.

- LOOMIS J. Measuring the Total Economic Value of Restoring Ecosystem Services in an Impaired River Basin : Results from a Contingent Valuation Survey; Colorado State University, Fort Collins – CO , 2000.
- MASON, S.J.L. *et al.* The Iri Seasonal Climate Preipitation System and the 1997/98 El Niño Event. Bull. Amer. Meteor. Soc, 80, 1953-1973, 1999.
- MAY, P. H. (org).Economia do Meio Ambiente, Rio de Janeiro; Elsevier, 2010.
- MERICO, L. F. K. 1996. Introdução à Economia Ecológica. Blumenau; FURB, 1996
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT – MEA Ecosystem and Human Well-being: Synthesis ., Washington, DC;Island Press, 2005.
- MOTA, S. Gestão Ambiental de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro; Abes, 2008.
- MOTA, S. Introdução à Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro; Abes, 2012.
- NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN, L. Dynamical Downscaling of Seasonal Climate Prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP regional spectral model at IRI Bulletinofthe American Meteorological Society, v. 82, n. 12, p. 2787-2796, 2001.
- NOBRE, P.; SIN-CHAN, C.; CAVALCANTI, I.; SOARES, W.; COUTINHO, M.; PIMENTA,F.; SAMPAIO,G.; LONGO, K.; COSTA, M.; ALMEIDA, R. DE; FREITAS, S.; PEREIRA, E.; VALVERDE, M. Cap. 9 Projeções e Previsibilidade de Mudanças Climáticas. In: Painel Brasileiro de Mudança Climática – PBMC. Relatório de Avaliação Nacional: Base Científica das Mudanças Climáticas. GT1: Base Científica das Mudanças Climáticas, 2011.
- NOGUEIRA, J.M., MEDEIROS, M.A.A. e ARRUDA, F.S.T. Valoração Econômica do Meio Ambiente: Ciência ou Empiricismo? Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v.17, n.2, maio/ago. 2000.
- NOGUEIRA, J. L. M.; Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Cenários PUC Minas; Conjuntura Internacional, 2007.
- ORTIZ, R. A. Valoração Econômica Ambiental. In: MAY, P.H. ; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V., Economia do Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Campus, 2003. p. 81-99.
- PACHAURI, S., 2004, An Analysis of Cross-sectional Variations in Total Household Energy Requirements in India using Micro Survey Data, Energy Policy 32(15), 1723-1735.
- PEARCE, D.W.; TURNER, R.K. Economic of Natural Resources and the Environment. Baltimore; the Johns Hopkins University Press, 1990
- PEARCE, D. Economic Values and the Natural World. Londres; Earthscan Publications, 1993.
- RANDALL, D.A.; WOOD, R.A.; BONY,S.; COLMAN, R.; FICHEFET,T.; FYFE, J.;KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R.J.; SUMI A.; TAYLOR. K.E. Climate Models and their Evaluation In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Pannel on Climate Change [SOLOMON, S.; QIN,D.;

MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER H.L. (eds.]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, p. 589–622, 2007.

RAJAGOPALAN, B.; LALL, M.; ZEBIAK, S. E. Categorical Climate forecast through Regularization and Optimal Combination of Multiple GCM ensembles. Pg. 1-34. In. press.2002.

RIDKER, R. G. Economic Costs of Air Pollution. F. A. Praeger, New York, 1967.

ROADS, J. O., CHEN, S.C. e KANAMITSU, M. U.S. Regional Climate Simulations and Seasonal Forecasts. Journal of Geophysics. Res., 108, 8606, 2003.

ROBERTSON, A.W., KIRSHNER, S., SMYTH, P. Downscaling of Daily Rainfall Occurrence over Northeast Brazil Using a Hidden Markov Model. Journal of Climate, v. 17, 4407 - 4424, 2004.

ROMEIRO, A.R. e MAIA, A.G. Avaliação de Custos e Benefícios Ambientais. Brasília; ENAP, 1v. (Cadernos ENAP; 35), 2011.

SALES, D. C. Simulações de Downscaling de Mudanças Climáticas sobre as Américas Tropicais. Dissertação de Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará – UECE, 2012.

SALES, F. A. T. C. Avaliação Econômica de Estações de Tratamento de Esgotos. Monografia de Conclusão do Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará – UFC, 2010.

SANTOS, A. J., HIDELBRAND, E; PACHECO, C.H.P; PIRES, P.T.L. ROCHADELLI, R. TIETEMBERG, T. Environment and Natural Resources Economics. 15<sup>a</sup> ed. Addison–Wesley, 2000

SELDEN, T. M., SONG, D. Environmental Quality and Development: Is there a Kuznets Curve for Air Pollution Emissions? Journal of Environmental Economics and Management, New York; vol. 27, n.2, 1994.

SHAFIK, N., BANDYOPADHYAY, S. Economic Growth and Environmental Quality: a time series and cross-country evidence. Journal of Environmental Economics and Management. vol. 4, p.1-24, 1992.

SINISGALLI, P. A.A. Valoração de Danos Ambientais de Hidroelétricas: Estudos de Caso. 226f. Tese (doutorado em Economia) UNICAMP. Campinas; 2005.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO DE SANEAMENTO – SNIS. Ministério das Cidades. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 07 de março de 2013.

SMALL, E. E.; GIORGI, F.; SLOAN, L. C. Regional Climate Model Simulation of Precipitation in Central Asia: Mean and Interannual Variability. Journal of Geophysical Research, v. 104, n. D6, p. 6563-6582, 1999.

SOUZA FILHO, F. A. e PORTO, R. Acoplamento de Modelo Climático e Modelo Hidrológico. In: Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Curitiba/PR; 2003.

- SOUTHALL, T.; TREVOR, T.; HAMBREY, J. Environmental Capacity Modelling in Aquaculture Development. Tropeca Working Paper No. 1. Department for International Development Aquaculture and Fish Genetics Research Programme - UK, Jul., 113p.,2004
- SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS – SRH. Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe. Fortaleza: SRH/Governo do Estado do Ceará, 1999
- STERN, D.I. The Rise and the Fall of the Environmental Kuznets Curve. World Development, Troy, vol. 32, n. 8, p. 1419-1439, 2004.
- STERN, N. The Economics of Climate Change: The Stern Review. London; Cambridge University Press, 2007.
- SUN, L.; SEMAZZI, F. H. M.; GIORGI, F.; OGALLO, L. Application of the NCAR Regional Climate Model to Eastern Africa: 1- Simulation of the short rains of 1988. Journal of Geophysical Research, v. 104, n. D6, p. 6529-6548, 1999.
- SUN, L.; MONCUNILL, D. F.; LI, H.; MOURA, A.D.; FILHO, F.A.S. Climate Downscaling over Nordeste, Brazil, Using the NCEP RSM97. Journal of Climate, v. 18, n. 4, p. 551–567, 2005.
- TAVARES V. E. Q. , RIBEIRO M. M. R. , LANNA A. E. L. ; Valoração Monetária de Bens e Serviços Ambientais: Revisão do Estado-da-Arte sob a Ótica da Gestão das Águas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos RBRH, vol6, n 3, 97 -116, jul / set 1999.
- TIETENBERG, T. e FOLMER H. (Eds).The International Yearbook of Environmental and Resource Economics 2000/2001: A Survey of Current Issues
- VON SPERLING, M. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. Belo Horizonte; Editora UFMG,1996.