

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**INTERFACES DA GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS E  
DA ZONA COSTEIRA:  
UMA APLICAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TRAMANDAÍ.**

**ESTER LOITZENBAUER**

Oceanóloga

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador: Prof. Dr. Carlos André Bulhões Mendes**

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Luiz Emilio de Sá Brito de Almeida	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Jr	GEO/UFRGS
Prof. Dr. Paulo Tagliani	FURG

PORTO ALEGRE, ABRIL DE 2010.

*Water is more critical than energy.  
We have alternative sources of energy.  
But with water there is no other choice.*

Eugene Odum

# AGRADECIMENTOS

- ✓ Agradeço primeiramente a Jesus por me dar força e inspiração para realizar todas as atividades do mestrado, desde as disciplinas até a elaboração da dissertação.
- ✓ A minha mãe, pelas tentativas de correção, além do amor e apoio incondicionais.
- ✓ Também ao meu pai e meu irmão, sempre ao meu lado, preocupados e carinhosos.
- ✓ Ao Jeremias querido, pelo “apoio moral”, incentivo e amor. Te amo muito!
- ✓ Amigos da sala de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos que sempre me ajudaram em qualquer questão levantada: Angélica, Fausto, Thiago, Fabiano, Rosane e Josiane.
- ✓ Outros colegas do IPH, pela amizade e disposição para ajudar em qualquer problema que surgisse: Fabrício, Leandro, Fred, Adriano, Magui, Fede, Dayana, Ibraim, Rodrigo, Diogo, Fernando, Chico.
- ✓ Ao pessoal da secretaria da Pós-Graduação: Andreas e Nadir, sempre atenciosos.
- ✓ E ao meu orientador, Carlos André, sem o qual não este trabalho não seria possível.

## RESUMO

Como um ambiente de transição e de grande concentração de atividades humanas, a zona costeira é uma das áreas de maior estresse ambiental do mundo. Esta concentração gera demanda por água para os mais diversos usos. A principal fonte de água na zona costeira é a bacia hidrográfica. O oceano, o estuário e as bacias hidrográficas interagem, formando um contínuo fluvial-marinho costeiro. Quando as atividades antrópicas retiram água doce da bacia, podem estar limitando a disponibilidade hídrica numa região costeira, pois a diminuição da afluência de água doce aos estuários aumenta a área de influência da salinidade. Esta dinâmica da salinidade em função da afluência de água doce pode ser compreendida através de um modelo de balanço de massa. Após compreender esta dinâmica, subsídios podem ser propostos para a gestão de um ambiente costeiro, visando prevenir possíveis limitações da disponibilidade de água doce devido à salinização das águas. Com base no artigo 3º da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que prevê que a gestão dos recursos hídricos deve ser integrada com a das zonas costeiras e dos sistemas estuarinos, propõem-se a compreensão do balanço de salinidade como uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos na zona costeira. Utilizando um modelo matemático integrado com geoprocessamento, como método de compreensão da dinâmica da salinidade, realiza-se um estudo de caso na bacia do Rio Tramandaí. Assim, subsídios para a gestão são discutidos, utilizando os instrumentos da PNRH e do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), para a bacia em questão. Com o modelo foram testados três cenários: dois de mudanças climáticas, seca e cheia, e um de aumento da área irrigada de arroz, visto que é a principal atividade econômica da bacia, juntamente com o abastecimento público. O resultado dos cenários atesta que a influência da salinidade é sentida até a Lagoa do Passo, limite interior do estuário. Observa-se que para os cenários de escassez hídrica, de seca e aumento na demanda de água, a salinidade do estuário aumenta, principalmente na Lagoa do Passo. No cenário de cheia, a salinidade diminuiu. Com o modelo de balanço de salinidade, observou-se a aplicabilidade dos instrumentos da PNRH e do zoneamento ecológico-econômico costeiro (ZEEC) do PNGC. O enquadramento, a salinidade pode ser introduzida como parâmetro a ser monitorado, pois compromete o uso dos recursos hídricos, além de ser integrada com o ZEEC que já existe na bacia. A outorga pode ser estabelecida, para manter uma vazão mínima que impeça a intrusão salina indesejada. A cobrança pode ser usada como meio de induzir os orizicultores a utilizar métodos de irrigação mais eficientes. A dinâmica da salinidade se mostrou uma ferramenta eficaz para gestão de recursos hídricos na zona costeira, por funcionar como um indicador da disponibilidade hídrica. No caso específico da bacia do Rio Tramandaí, esta ferramenta deve ser utilizada no nível do comitê de bacia (já existente), para resolver questões ligadas com a intrusão salina e a interação bacia – oceano.

**Palavras chave:** *Gestão Integrada de Recursos Hídricos, Gerenciamento Costeiro, Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí.*

## ABSTRACT

As a transition environment of great human activities concentration, the coastal zone is an area of major environmental stress in the world. This merger creates a demand of water for different uses. The main source of water in this area is the river basin. The ocean, the estuary and the watersheds interact forming a continuous freshwater – coastal environment. When human activities remove freshwater from the basin they may be limiting the availability of water in a coastal region, since reduced freshwater inflow to estuaries increases the area of influence of the salinity. This dynamic function of salinity and fresh water inflow can be understood through a mass balance. Technical inputs can be proposed to manage a coastal environment, preventing possible limitations on the availability of fresh water due to the salinity. The article 3 of the National Water Resources Policy (PNRH) said that the management of water resources must be integrated with the coastal and estuarine systems. Based on this assumption a methodology is proposed: the understanding of salinity balance as a tool for management of water resources in the coastal zone. Using a mathematical model integrated with GIS for understanding the salinity dynamics a case study is done on the Tramandaí river basin. For this basin, management practices and technical inputs are discussed using the tools of PNRH and the National Coastal Management Plan (PNGC). With the model we tested three scenarios: two climate change, drought and flood, and an increased area of irrigated rice, as it is the main economic activity of the basin along with public provision. The result of the scenarios shows that the influence of salinity is felt unto the Passo Lagoon, the inner edge of the estuary. It is observed that in the water scarcity scenarios, drought and increased demand for water, the salinity of the estuary rises, especially in the Passo Lagoon. In the scenario of flood the salinity decreased. Using the salinity balance model, it was observed the applicability of the tools of PNRH and the coastal ecological-economic zoning (ZEEC) of the PNGC. In the classification of water bodies the salinity may be introduced as a parameter to be monitored, because it jeopardizes the use of water resource. Also it can be integrated with the ZEEC that already exists in the basin. The grant of water resources use can be established to maintain a minimum flow to prevent the unwanted salt intrusion. The water use charges can be used as a mean of inducing rice farmers to use more efficient methods of irrigation. The dynamics of salinity proved to be an effective tool for managing water resources in the coastal zone, acting as an indicator of water availability. In the specific case of Tramandaí river basin, this tool should be used in the basin committee level to solve issues related to salt intrusion and basin - ocean interaction.

**Key words:** *Integrated Management of Water Resources, Coastal Management, and Tramandaí River Basin.*

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	iv
Abstract.....	v
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xii
Lista de Siglas.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Justificativa .....	2
1.2 Hipótese .....	4
1.3 Objetivo.....	4
1.4 Estrutura Geral da Dissertação.....	4
2. Fundamentação Teórica.....	6
2.1 Definições .....	6
2.1.1 Zona Costeira.....	6
2.1.2 Estuário e seus Processos .....	8
2.1.3 Bacia Hidrográfica.....	9
2.2 Classificação dos estuários .....	10
2.3 A Gestão Integrada no Brasil .....	14
2.3.1 Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC).....	16
2.3.2 Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) .....	17
2.3.3 Integração PNRH e PNGC .....	19
2.3.4 Câmara Técnica de Integração da Gestão das Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e da Zona Costeira (CTCOAST) .....	21
2.1.1 Gestão Integrada no Rio Grande do Sul .....	25
2.2 Processos Internacionais de Gestão Integrada .....	26
2.3 Geoprocessamento .....	30
2.3.1 MNT .....	34
2.4 Representação Matemática da Região Estuarina .....	35
2.5 Modelos de Qualidade de Água.....	40

2.6	Integração Modelos de Qualidade de Água e SIG .....	47
2.6.1	BALANCE .....	49
3.	Metodologia.....	53
3.1	Aplicação do Balanço de Massa em um Estuário .....	54
3.2	Descrição do Sistema.....	59
3.3	Cenários .....	61
3.3.1	Variação das condições meteorológicas .....	62
3.3.2	Variação na Demanda de Uso dos Recursos Hídricos .....	63
3.4	Medidas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos na Zona Estuarina .....	64
4.	A Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí.....	66
4.1	Características Gerais.....	66
4.2	Características Climáticas .....	68
4.3	Características Hidrológicas .....	69
4.4	Conflitos pelo uso da água.....	71
4.5	Instrumentos de Gestão.....	72
4.6	Modelo de Santos (2007).....	76
5.	Resultados e discussão.....	79
5.1	Cenário de Marco Referencial .....	79
2.1	Cenário de Mudanças Climáticas.....	80
2.2	Cenário de Aumento da Demanda de Água para Irrigação .....	85
2.3	Discussão dos Resultados .....	87
2.4	Medidas para a gestão dos recursos hídricos na bacia do Rio Tramandaí.....	96
2.4.1	Aplicação dos Instrumentos de Gestão.....	97
3.	Considerações Finais .....	108
3.1	Conclusão.....	108
3.1.1	Em Relação à Metodologia.....	108
3.1.2	Em Relação à Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí .....	109
3.2	Limitações do Estudo.....	111
3.3	Propostas para estudos futuros.....	112

4. Referências Bibliográficas.....	113
Anexo A: Relação dos Municípios Abrangidos pela Faixa Terrestre da Zona Costeira.....	118
Anexo B: Anexo I do Decreto Federal Nº. 5300/2004.....	123
Anexo C: Dados da Validação do Modelo BALANCE para a Bacia do Rio Tramandaí .....	126

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Definição da zona costeira; continente, estuários, bacias hidrográficas e mar. ....	7
Figura 2.2 – Diagrama esquemático de um estuário. As isohalinas mostram a estratificação horizontal da salinidade média, de montante à jusante (oceano). ....	9
Figura 2.3 – Representação de um estuário do tipo cunha salina.....	11
Figura 2.4 – Representação de um estuário do tipo estratificado.....	12
Figura 2.5 – Diagrama de um estuário parcialmente estratificado.....	12
Figura 2.6 - Representação de um estuário do tipo verticalmente bem misturado.....	13
Figura 2.7 – Diagrama de um estuário inverso.....	14
Figura 2.8 – Representação de um estuário intemitente.....	15
Figura 2.9 – Locais do mundo onde foram feitos os estudos da ICARM .....	28
Figura 2.10 – Informação geográfica generalizada .....	31
Figura 2.11 – MNT da bacia do Rio Tramandaí, RS, malha de discretização contínua 30x30m. ....	34
Figura 2.12 – Estimativa da área acumulada segundo etapas consecutivas, de (a) até (c). A célula marcada indica aquela cujo valor está sendo calculado.....	36
Figura 2.13 – Representação unidimensional do estuário. $x = -L$ e $x = 0$ correspondem ao limite interior e a boca do estuário, respectivamente. $U$ é a velocidade média da coluna d'água. ....	37
Figura 2.14 – Representação do estuário, o perfil vertical deste e a segmentação do estuário.....	41
Figura 2.15 – Notação de um segmento do estuário, como utilizado em modelos de qualidade de água. Em cinza os fatores que não são considerados quando a substância é a salinidade... ..	43
Figura 2.16 – Os segmentos utilizados num modelo de qualidade de água. ....	45
Figura 2.17 – Resumo do processo de integração entre os modelos de qualidade de água e o SIG.....	49
Figura 2.18 – Exemplo de linhas, polígonos e nós utilizados no programa BALANCE. O polígono $i$ com as linhas que o definem: 2 e 4 delimitação do corpo hídrico com a terra, 1 e 3 linhas de fronteira entre os polígonos. Em vermelho a linha que representa a entrada de um rio, e em amarelo a linha que representa uma captação de água. ....	50
Figura 3.1 – Fluxograma geral do trabalho, da metodologia proposta aos resultados. ....	54
Figura 3.2 – Modelo de estuário, para o programa BALANCE.....	55
Figura 3.3 – Parâmetros de entrada utilizados no programa BALANCE. ....	57

Figura 3.4 – Modelo BALANCE e o resultado do balanço de salinidade de uma linha qualquer. No fundo está um estuário colorido conforme a salinidade modelada.....	58
Figura 3.5 – Representação de uma célula (em cinza) com as oito células vizinhas a esta. ....	60
Figura 3.6 – Metodologia de modificação do <i>MNT</i> para conexão com o arquivo vetorial dos segmentos do estuário e cálculo da direção do fluxo e fluxo acumulado, como utilizado por HELLWEGER (1997). .....	60
Figura 3.7 – Para alterar a demanda antrópica, basta modificar o valor do fluxo ( <i>flow</i> ) na linha do BALANCE. ....	61
Figura 4.1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Tramandaí no estado do RS. ....	66
Figura 4.2 – A bacia hidrográfica do Rio Tramandaí, os subsistemas norte e sul e as principais lagoas. ....	67
Figura 4.3 – Foto da barra do Rio Tramandaí, canal de ligação da bacia com o oceano. ....	68
Figura 4.4 – Localização das bacias e dos rios Três Forquilhas e Maquiné na bacia do Rio Tramandaí.....	70
Figura 4.5 – Enquadramento dos corpos de água da bacia do Rio Tramandaí.....	74
Figura 4.6 – Zoneamento ecológico-econômico do Litoral Norte do RS. ....	75
Figura 4.7 – Bacia hidrográfica do Rio Tramandaí, RS conforme a segmentação utilizada por Santos (2007).....	78
Figura 5.1 – Representação do marco referencial, situação padrão na bacia do Rio Tramandaí. ....	81
Figura 5.2 – Modelagem do cenário de mudanças climáticas gerando aumento da vazão afluente ao sistema estuarino em 20%.....	83
Figura 5.3 – Modelagem do cenário de mudanças climáticas gerando a diminuição da vazão afluente ao sistema estuarino em 20%.....	84
Figura 5.4 – Modelagem do cenário de aumento da demanda de irrigação (aumento da área plantada de 2292ha para 4585ha). ....	86
Figura 5.5 – Subdivisão do estuário do Rio Tramandaí e a localização da foz.....	87
Figura 5.6 – Salinidade dos corpos hídricos do subsistema norte do estuário do Rio Tramandaí.....	88
Figura 5.7 – Salinidade dos corpos hídricos do subsistema sul do estuário do Rio Tramandaí. ....	88
Figura 5.8 – Diferença entre a salinidade medida e a simulada para o subsistema norte.....	89
Figura 5.9 – Diferença entre a salinidade medida e a simulada para o subsistema sul. ....	90

Figura 5.10 – Lagoa do Passo (em vermelho) nos cenários testados com as respectivas salinidades. A graduação da salinidade é representada pela cor azul: maior salinidade mais forte azul. ....	92
Figura 5.11 – Gráfico dos teores de cloretos encontrados no verão de 2005, na estação de captação de água da CORSAN, Lagoa do Passo. ....	93
Figura 5.12 – Localização dos pontos de amostragem do GERCO/FEPAM no limite do estuário do Rio Tramandaí. ....	94
Figura C.1 – Valores do subsistema sul utilizados para validação do modelo utilizado. ....	127
Figura C.2 – Relação entre a salinidade medida e a simulada para o cenário do marco referencial. ....	127
Figura C.3 – Dados do subsistema norte utilizados para validação do modelo utilizado. ....	128
Figura C.4 – Relação entre a salinidade medida e a simulada para o cenário do marco referencial. ....	128

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Instrumentos do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro. ....	17
Tabela 2.2 – Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos. ....	18
Tabela 2.3 – Zonas de gestão da proposta de resolução do CNRH. ....	23
Tabela 2.4 – Instrumentos de gestão do GERCO. ....	25
Tabela 2.5 – Estudos de caso da ICARM. ....	29
Tabela 2.6 – Parâmetros do estuário hipotético. ....	39
Tabela 2.7 – Variáveis de entrada utilizadas no software BALANCE e as unidades utilizadas para cada uma no sistema internacional (SI). ....	52
Tabela 2.8 – Dados de saída do BALANCE, separados por polígonos e linhas. ....	52
Tabela 3.1 – Descrição dos níveis de observação do usuário no BALANCE. ....	57
Tabela 4.1 – Etapas dos planos de bacia hidrográfica. ....	73
Tabela 5.1 – Vazão do Rio Três Forquilhas ( $m^3/s$ ) para diferentes valores de $\alpha$ e $\beta$ . Em negrito a vazão inicial, em vermelho a situação de maior seca e em azul a de maior cheia. Em amarelo a situação que representa a diminuição e o aumento de 20% da vazão afluente à bacia. ....	80
Tabela 5.2 – Vazão do Rio Maquiné ( $m^3/s$ ) para diferentes valores de $\alpha$ e $\beta$ . Em negrito a vazão inicial, em vermelho a situação de maior seca e em azul a de maior cheia. Em amarelo a situação que representa a diminuição e o aumento de 20% da vazão afluente à bacia. ....	82
Tabela 5.3 – Dados de salinidade (em ‰) do monitoramento de qualidade de água do GERCO/FEPAM. ....	95

## LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Proteção Permanente
BASIN	<i>Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources</i> (Melhor Avaliação Científica Integrando Fontes Pontuais e Não Pontuais)
CIRM	Comissão Interministerial para os Recursos do Mar
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Rio-grandense de Saneamento
CTCOST	Câmara Técnica de Integração da Gestão das Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e da Zona Costeira
CTPNRH	Câmara Técnica do Plano Nacional de Recursos Hídricos
CTPOAR	Câmara Técnica de Integração de Procedimentos, Ações de Outorga e Ações Reguladoras
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio medida após de 5 dias
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DRH/RS	Departamento de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Sul
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental)
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
GERCO	Programa de Gerenciamento Costeiro da FEPAM
GIS	<i>Geographic Information System</i> (Sistemas de Informação Geográfica)
ICAM	<i>Integrated Coastal Area Management</i> (Gerenciamento Integrado da Área Costeira)

ICARM	<i>Integrated Coastal Area and River Basin Management</i> (Gestão Integrada da Área Costeira e da Bacia Hidrográfica)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IWRM	<i>Integrated Water Resource Management</i> (Gestão Integrada de Recursos Hídricos)
NE	Nordeste
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAF	Plano de Ação Federal da Zona Costeira
PBH	Plano de Bacia Hidrográfica
PEGC	Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PMGC	Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro
PNGC	Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro
PNMA	Plano Nacional de Meio Ambiente
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RQA-ZC	Relatório de Qualidade Ambiental da Zona Costeira
SE	Sudeste
SEMA	Secretaria Estadual de Meio Ambiente do RS
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGERCO	Sistema de Informações do Gerenciamento Costeiro
SMA	Sistema de Monitoramento Ambiental da Zona Costeira
SW	Sudoeste

UNEP	<i>United Nations Environmental Programme</i> (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA)
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura.
ZC	Zona Costeira
ZCR	Zona Crítica
ZD	Zona Dinâmica
ZEEC	Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro
ZI	Zona de Influência

# 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira é uma das áreas de maior estresse ambiental em todo o mundo, sendo submetida à forte pressão devido à excessiva exploração de seus recursos naturais e uso desordenado do solo. Sendo um ambiente de transição e contrastes, constitui-se um grande desafio para a aplicação de estratégias de gestão ambiental (GRUBER *et al.*, 2003).

Estima-se que, no século XXI, 80% das atividades humanas estarão concentradas nesta zona (DUSSEN, 1999 *apud* GRUBER *et al.*, 2003), coincidindo processos de intensa urbanização, atividade portuária e industrial e exploração turística em larga escala.

As atividades humanas necessitam dos recursos hídricos para sua efetivação. A principal fonte destes recursos é proveniente da bacia hidrográfica. Na zona costeira, o oceano e as bacias hidrográficas interagem funcionalmente por meio de fluxos hidrológicos, sedimentos e substâncias dissolvidas, formando um contínuo fluvial-marinho costeiro (NICOLODI *et al.*, 2009).

Num ambiente costeiro, onde há um inerente contínuo em que vários fatores interagem, pode-se utilizar como indicador da dinâmica ambiental a salinidade, visando à gestão integrada de recursos hídricos. Desta forma, a ação do oceano nas águas continentais pode ser sentida através da salinidade, onde há maior influência há maior salinidade. Assim como a ação continental, diga-se da bacia hidrográfica, pode ser sentida no oceano através da diminuição da salinidade, através da diluição de suas águas. Através desta ferramenta, a compreensão da dinâmica da salinidade, pode-se gerenciar mais efetivamente os recursos hídricos na zona costeira, e as possíveis limitações nos usos devido ao aumento da salinidade dentro do continente.

Tradicionalmente, a gestão hidrográfica tem como enfoque conservação dos recursos hídricos, com exceção das águas estuarinas e marinhas, enquanto a gerenciamento costeiro visa à preservação de múltiplos recursos, como pesca, mangues, recifes de corais, através de planejamento físico e ordenamento do uso do solo e das águas costeiras. A inerente complexidade e inter-relação entre bacia hidrográfica e zona costeira demandam que a gestão destes sistemas deve ser integrada, visando à manutenção dos recursos naturais, especificamente os recursos hídricos.

Enfatize-se ainda que uma questão que surge com relação ao planejamento de recursos hídricos e da zona costeira é a etimologia utilizada. No caso da zona costeira usa-se o termo *gerenciamento*. Para recursos hídricos, utiliza-se o termo *gestão*. De acordo com Houaiss *et al.* (2001), *gestão* é ação de administrar, de dirigir, gerência; *gerenciamento* é ação ou efeito de gerenciar, gerência. Aparentemente não há diferença conceitual entre os termos. Neste trabalho, para manter a consonância com a legislação, quando tratar-se de Zona Costeira usa-se *Gerenciamento Costeiro*, e quando for tratado de Recursos Hídricos, utiliza-se o termo *Gestão*.

Há grandes desafios para a efetivação desta integração no âmbito brasileiro e mundial. Desde a década de 1990, legislações têm sido sancionadas com o intuito de normatizar a gestão ambiental integrada. No caso da integração zona costeira e bacia hidrográfica, o marco inicial foi criado com a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), Lei Federal Nº 9.433/1997, estabelecendo como diretrizes gerais a gestão integrada.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

No Brasil, 18% da população vive na zona costeira, o que significa aproximadamente 33 milhões de pessoas (BRASIL, 2008a). Grandes centros industriais, metrópoles e atividade portuária também se concentram nesta região, devido à proximidade com os mercados consumidores, transporte, etc. Esta concentração gera grande demanda por água para os mais diversos usos. Ainda assim, principalmente no sul, sudeste e nordeste, a população costeira aumenta consideravelmente no período do verão devido ao turismo, aumentando ainda mais a demanda por água durante esses meses.

O ser humano pode modificar o movimento de água no ciclo hidrológico de diversas maneiras. A água é retirada de rios, lagos e dos aquíferos subterrâneos para múltiplos usos. Pode-se armazenar água em reservatórios para gerar energia elétrica, regular a vazão de um rio na época de seca, abastecer os usuários. Pode-se utilizá-la para abastecimento público nas cidades, na agricultura para irrigação, como insumo produtivo nas indústrias, diluição de esgotos, etc. Além de ser elemento importante para atividades de turismo de lazer. Estas modificações humanas no ciclo hidrológico afetam a quantidade, qualidade e a temporalidade dos fluxos de água doce dos rios até os estuários. Uma pequena mudança na afluência de água doce pode afetar o funcionamento fundamental de um estuário, que terá efeitos na biota (animais e plantas) e nas culturas humanas que estão ligadas a este.

Na gestão de estuários, a maior ênfase é dada à proteção dos ecossistemas especializados e sensíveis desta área. Não descartando a importância da preservação da biota, para que a gestão se torne efetiva deve-se considerar também a dinâmica socioeconômica do sistema estuarino-costeiro. A degradação dos ecossistemas pode gerar perdas econômicas consideráveis, como para a pesca ou o turismo. Porém outros fatores não ligados diretamente à degradação ambiental podem afetar as estruturas antrópicas na região costeira, sendo um deles a limitação quantitativa da água como um recurso hídrico.

O aproveitamento de recursos hídricos pelo homem pode afetar o fluxo de água doce aos estuários (OLSEN *et al.*, 2006). Na maioria das vezes, a ação antrópica diminui a afluência de água doce, aumentando os impactos gerados pela contaminação, sobre pesca e destruição de habitats, além de limitar a disponibilidade hídrica numa região costeira.

Ao diminuir o fluxo de água doce num estuário, a área de influência da salinidade aumenta, comprometendo a disponibilidade de água doce, através da dinâmica de interação dos sistemas estuarinos.

Essa diminuição de fluxo, devido à maior retirada de água à montante, é condicionante à maior intrusão do mar no continente. Quanto mais o mar adentra no continente, menor é a disponibilidade de água doce, que devido à mistura com a água do mar fica salgada – salobra. Se esse processo se tornar contínuo, danos permanentes podem ser causados, por exemplo, para a irrigação e para os ecossistemas especializados. Também o abastecimento de água das populações costeiras pode ficar comprometido.

Diante da forte influência dos sistemas hídricos continentais nos ambientes estuarinos, através da mistura entre a água salgada do mar e a água doce da drenagem continental, e como já previsto pela PNRH, art. 3º, item VI (BRASIL, 1997a), a gestão dos recursos hídricos deve ser integrada com a das zonas costeiras e dos sistemas estuarinos. Diante do exposto, propõe-se como a ferramenta para a compreensão desse sistema e gestão dos ambientes estuarinos, o entendimento da dinâmica da salinidade.

No planejamento e gestão de recursos hídricos na zona estuarina – costeira, a definição de macrodiretrizes para a implantação da integração de políticas é imprescindível, uma vez que os impactos relacionados a alterações indesejáveis na vazão e na carga de poluentes que aportam às zonas estuarinas não afetam apenas o meio biótico, mas também a estrutura socioeconômica local.

Este processo é complexo e exige mecanismos para integrar as políticas para a zona costeira e para o gerenciamento costeiro, além de medidas específicas para cada situação, cada estuário. Os usos da água doce devem ser geridos de maneira a não permitir um aumento da influência da salinidade adentro do continente. No presente trabalho a dinâmica da salinidade é expressa através de um modelo de balanço de massa, através do qual criam-se cenários possíveis para influência da salinidade num sistema estuarino. Com base nestes cenários, e utilizando os instrumentos previstos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e pelo Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), medidas de gestão são propostas, utilizando-se como caso de estudo a bacia hidrográfica do Rio Tramandaí.

## **1.2 HIPÓTESE**

Diante do exposto, levanta-se a seguinte hipótese: A compreensão do balanço de salinidade num ambiente estuarino é uma ferramenta útil para a gestão de recursos hídricos na zona costeira?

## **1.3 OBJETIVO**

Assim, o principal objetivo do presente estudo é propor subsídios técnicos que contemplem as particularidades de uma bacia hidrográfica costeira, visando à gestão desta, de maneira a garantir a disponibilidade dos recursos hídricos, utilizando a dinâmica da salinidade como principal ferramenta. O caso específico de estudo é a bacia do Rio Tramandaí, no Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

## **1.4 ESTRUTURA GERAL DA DISSERTAÇÃO**

Após a introdução no capítulo 1, juntamente com a justificativa deste trabalho, a hipótese a ser testada e o objetivo desta dissertação, segue, no capítulo 2 a fundamentação teórica. Neste segundo capítulo, primeiramente introduzindo as definições de zona costeira, estuário e bacia hidrográfica, em seguida comentando o processo de gestão integrada no Brasil, com a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), a tentativa de integração de ambos e a gestão integrada no estado do Rio Grande do Sul. Ainda no capítulo 2, são discutidos os processos internacionais de gestão integrada de recursos hídricos na zona costeira. Conceitos sobre geoprocessamento, a representação matemática de um estuário e os modelos de qualidade de água em uma região estuarina, também são colocados. Este capítulo termina apresentando os modelos integrados, que

utilizam o geoprocessamento para a representação espacial e equações matemáticas para a variação temporal, especificamente descrevendo o modelo BALANCE.

A metodologia aplicada nesta dissertação é mostrada no capítulo 3, com a descrição do modelo BALANCE, que é um modelo de qualidade de água integrado com geoprocessamento, que computa o balanço de massa num estuário. Também há a descrição dos cenários simulados: contemplando a situação atual, variações climáticas que geram escassez e abundância hídrica, e aumento da área de irrigação.

O capítulo 4 apresenta a área de estudo, a bacia hidrográfica do Rio Tramandaí, com suas características físicas, conflitos pelo uso da água e os instrumentos de gestão de recursos hídricos que estão sendo aplicados nesta região.

No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com o modelo de balanço de massa para a área de estudo e as medidas de gestão de recursos hídricos para o caso da bacia do Rio Tramandaí.

A conclusão e propostas para estudos futuros são contempladas no capítulo 6, seguido pelas referências bibliográficas.

No final da dissertação é apresentado o anexo A, com a Relação dos Municípios Abrangidos pela Faixa Terrestre da Zona Costeira, o anexo B, com o anexo I do Decreto Federal Nº 5.300/2004, e o Anexo C com os Dados de Validação do Modelo BALANCE para a Bacia do Rio Tramandaí.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem várias divergências conceituais no tangente a zona costeira e os sistemas hídricos associados. Numa tentativa de esclarecimento, primeiramente são introduzidos às principais definições. Posteriormente, observa-se a PNRH e o PNGC, com seus instrumentos e o papel do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) na gestão integrada dos recursos hídricos com a zona costeira. Também há menção das pesquisas em nível internacional que abordam o tema.

Em seguida, há a descrição básica dos sistemas de geoprocessamento, utilizados para analisar espacialmente a superfície terrestre, o que engloba o estuário. Em seguida, a representação matemática dos estuários é apresentada, como um método de contemplar temporalmente os processos estuarinos. A representação matemática é a base dos modelos de qualidade de água.

De forma a englobar tanto a representação geográfica como a espacial de um estuário, um subitem é dedicado à integração dos modelos de qualidade de água e o geoprocessamento (SIG), com exemplos de como é feita esta integração. No final deste capítulo, um modelo integrado de qualidade de água, o BALANCE, é descrito mais detalhadamente. O BALANCE é um modelo que pode ser utilizado numa região estuarina para compreensão da dinâmica da salinidade no local.

### 2.1 DEFINIÇÕES

A zona costeira é um ambiente de transição, em que é observada uma gradação de ambientes entre o mar e o continente, ou seja, Solo → Bacias Hidrográficas → Estuário → Oceano (Zona Costeira), estes todos interligados (Figura 2.1).

#### 2.1.1 ZONA COSTEIRA

O Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro – PNGC II (BRASIL, 1997b), define a zona costeira (ZC) como o *espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos ambientais, abrangendo uma faixa marítima e outra terrestre* (Figura 2.1).

A faixa marítima se estende mar a fora distando 12 *milhas marítimas* das *Linhas de Base* estabelecidas de acordo com a Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, compreendendo a totalidade do Mar Territorial. A faixa terrestre é formada pelos municípios que sofrem influência dos fenômenos ocorrentes na Zona Costeira, a saber:

- Os municípios defrontantes com o mar, assim considerados em listagem desta classe, estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE);
- Os municípios não defrontantes com o mar que se localizam nas regiões metropolitanas litorâneas;
- Os municípios contíguos às grandes cidades e às capitais estaduais litorâneas, que apresentem processo de *conurbação*;
- Os municípios próximos ao litoral, até 50 Km da linha de costa, que aloquem, em seu território, atividades ou infraestruturas de grande impacto ambiental sobre a Zona Costeira, ou ecossistemas costeiros de alta relevância;
- Os *municípios estuarinos-lagunares*, mesmo que não diretamente defrontantes com o mar, dada a relevância destes ambientes para a dinâmica marítimo-litorânea; e
- Os municípios que, mesmo não defrontantes com o mar, tenham todos os limites estabelecidos com os municípios referidos nas alíneas anteriores.

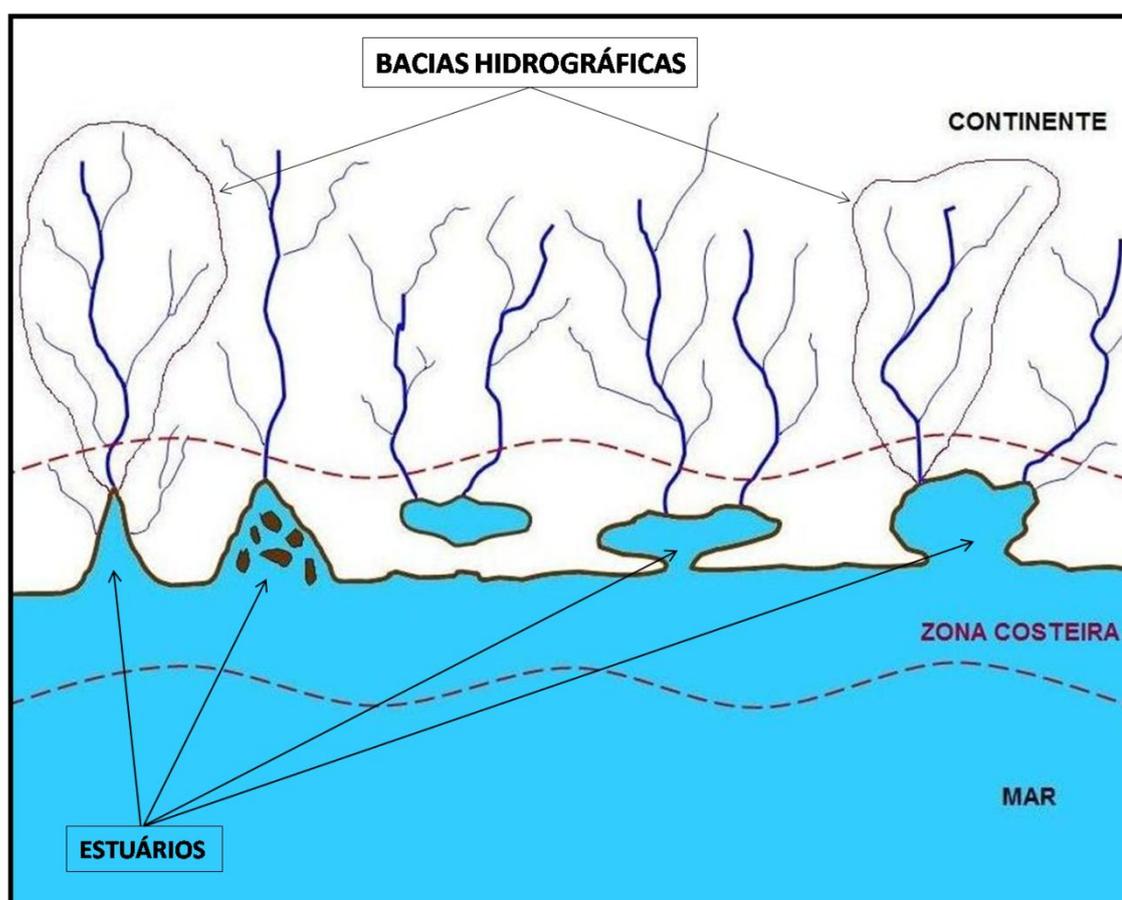


FIGURA 2.1 – DEFINIÇÃO DA ZONA COSTEIRA; CONTINENTE, ESTUÁRIOS, BACIAS HIDROGRÁFICAS E MAR.

Esta é uma definição ampla, que se complementa através da relação dos municípios abrangidos pela faixa terrestre da zona costeira, presente no Anexo B desta dissertação.

## 2.1.2 ESTUÁRIO E SEUS PROCESSOS

Como já mencionado, a ligação entre o oceano e a bacia hidrográfica estabelece o estuário. Existem várias definições de estuários. Dyer (1997) *apud* Miranda *et al.* (2002) adaptou a clássica definição proposta por Pritchard (1955) resultando na definição mais satisfatória:

*“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com ligação livre com o oceano aberto, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré, sendo que no seu interior a água do mar se dilui progressivamente com a água doce proveniente da drenagem continental”.*

A principal característica de um estuário é a mistura de água doce e salgada. A mistura é um processo complexo onde diferença de densidade (causada principalmente pela salinidade) e a turbulência são os principais condicionantes.

A circulação, os processos de mistura e a estratificação de salinidade no estuário são controlados pela sua geometria, descarga de água doce, maré, salinidade, circulação da região oceânica adjacente e pelo vento que atua sobre a superfície livre (PRITCHARD, 1967).

O efeito da descarga fluvial, proveniente da bacia hidrográfica, além de gerar um componente da circulação estuarina que naturalmente se desloca em direção ao mar (jusante), ao diluir a água do mar produz diferenças de densidade ao longo do estuário, gerando movimentos estuário acima forçados pelo gradiente de pressão. A interação das várias propriedades e processos – *descarga da bacia, correntes de maré, gradientes de pressão, entre outros* – produz a distribuição de salinidade que é característica de cada estuário (OFFICER, 1983).

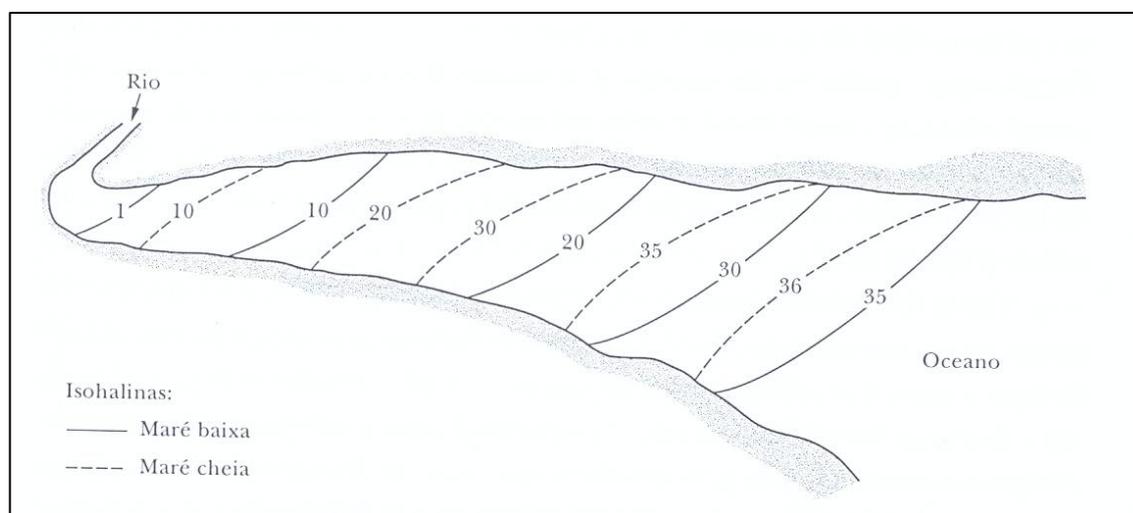
Entre os vários elementos que podem ser utilizados como indicadores do funcionamento dos ambientes costeiros e estuarinos, destaca-se a salinidade<sup>1</sup>. A salinidade é um indicador eficiente para o funcionamento dessa transição de ambientes, pois, além de ser a principal propriedade geradora das variações de densidade que gera a circulação estuarina, cumpre uma função importante na determinação da distribuição das comunidades de plantas e animais dentro do estuário, além de ser determinante para o estabelecimento de atividades econômicas dependentes de recursos hídricos.

---

<sup>1</sup> Salinidade: medida da quantidade de sais existente em massas de água naturais. Tradicionalmente, era expressa em *permilagem* (‰) ou *x* gramas de sal em um litro de água. No entanto, com novas técnicas de medição, fundamentalmente eletrônicas, que medem a razão entre a condutividade da amostra de água a condutividade de uma solução padrão (tipicamente de cloreto de potássio), considera-se que a salinidade não tem unidade. Água salgada tem salinidade maior que 30, a salobra é aquela que tem salinidade entre 0,5 e 30, e a água doce tem salinidade abaixo de 0,5. A água dos oceanos tem salinidade média de 35. Fonte: UNESCO (1981) e BRASIL (2005).

De acordo com Olsen *et al.* (2006), projetos para aproveitamento de recursos hídricos afetam a quantidade, a qualidade e a temporalidade dos fluxos de água doce dos rios até os estuários. Em termos quantitativos o fluxo de água doce nos estuários pode ser alterado de três maneiras: diminuindo o volume aportado, aumentando o volume aportado ou alterando o pulso de aporte (momento e volume). Na maioria dos casos, a mudança se dá pela redução do volume de água doce que chega aos estuários. Uma pequena mudança na afluência de água doce pode afetar o funcionamento de um estuário, que terá efeitos na biota (animais e plantas) e nas culturas humanas que estão ligadas ao estuário, principalmente ao diminuir a disponibilidade hídrica.

A distribuição horizontal da salinidade média em um estuário segue a esquematização da Figura 2.2, onde são representadas as isohalinas (linhas de igual salinidade). Essa variação indica que a água do mar foi diluída pela descarga de água doce da bacia hidrográfica e que uma parcela do volume dessa água ficou retida no interior do estuário ao formar a massa de água estuarina (MIRANDA *et al.*, 2002).



**FIGURA 2.2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM ESTUÁRIO. AS ISOHALINAS MOSTRAM A ESTRATIFICAÇÃO HORIZONTAL DA SALINIDADE MÉDIA, DE MONTANTE À JUSANTE (OCEANO). (FONTE: MIRANDA ET AL., 2002).**

### 2.1.3 BACIA HIDROGRÁFICA

O estuário, como um ambiente de transição, é afetado por agentes locais e remotos gerados por eventos climáticos, oceanográficos, hidrológicos, etc., que ocorrem na bacia de drenagem e no oceano adjacente muitas vezes até milhares de quilômetros de distância (MIRANDA *et al.*, 2002). Cada estuário se encontra no final de uma bacia hidrográfica, e

drena uma área da superfície terrestre de dezenas a mil vezes maior que o próprio estuário (OLSEN *et al.*, 2006).

Bacia hidrográfica pode ser definida como uma área topográfica, drenada por um curso de água ou um sistema conectado de cursos de água de forma que toda a vazão efluente, oriunda de captação natural de água da precipitação, seja descarregada através de uma simples saída, o exutório (SILVEIRA, 2004).

A bacia de drenagem é a origem do sistema de rios que suprirá o estuário, sobretudo com água fluvial e sedimentos. A quantidade de água recebida pela bacia depende das condições climáticas, das características do solo, da cobertura vegetal, da ocupação urbana, agrícola e industrial, etc. A ação antrópica – *construção de represas e barragens, desmatamento, urbanização, etc.* – pode alterar significativamente a geometria e as condições das bacias de drenagem, interferindo nas características ecológicas naturais dos ambientes costeiros. Numa bacia em condições de equilíbrio, a entrada de água doce na cabeceira e a saída desta na região costeira adjacente são, em geral, mantidas constantes em condições meteorológicas normais. Sendo assim, o valor médio do transporte de volume através das seções transversais da cabeceira e da entrada do estuário é praticamente igual durante vários ciclos de maré. Os fenômenos de evaporação, precipitação e percolação no próprio estuário têm uma contribuição pequena para o balanço de água doce no sistema (MIRANDA *et al.*, 2002).

Entretanto, secas extremas, como a que ocorreu na América do Norte em 1986 e durou 83 dias, provocou uma diminuição de 50% na descarga fluvial. Além do grave problema social e econômico, essa estiagem ocasionou o aumento anormal da salinidade da massa de água dos estuários (MIRANDA *et al.*, 2002).

## **2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS ESTUÁRIOS**

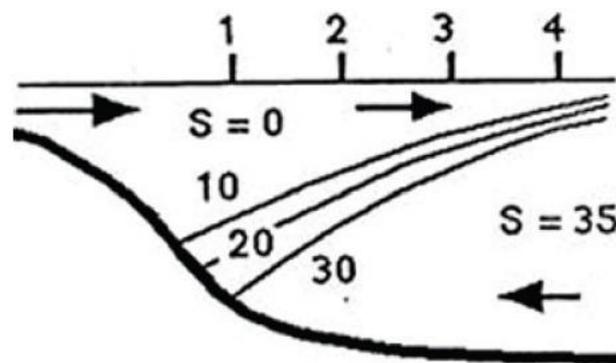
Os critérios para classificação dos ambientes costeiros foram desenvolvidos com a finalidade de comparar diferentes estuários, organizando-os adequadamente com uma base de dados e estabelecendo uma estrutura de princípios gerais de funcionamento. Esses critérios tornam possível a previsão das principais características de circulação e processos de mistura (MIRANDA *et al.*, 2002).

Um dos critérios para classificar os estuários é de acordo com a estratificação da salinidade, visto que este é o principal condicionante do processo de circulação estuarina e varia consideravelmente em função da descarga continental e da influência da maré.

Um meio de quantificar este processo é comparando o volume de água doce ( $R$ ) do rio, que entra no estuário (volume advectivo), com o volume de água ( $T$ ) dispersivo, que corresponde à mistura estuarina; ambos durante um ciclo de maré. O  $R$  muitas vezes é chamado de volume do rio, enquanto  $T$  de volume de maré. É importante salientar que nessa classificação, é apenas a razão  $R/T$  que determina o tipo de estuário, e não o valor absoluto de  $R$  e  $T$ . Em outras palavras, os estuários podem ter tamanhos bem diferentes e ainda assim serem do mesmo tipo (SINHA *et al*, 2008). Abaixo são descritos os tipos de estuários classificados segundo o critério da razão  $R/T$ .

### ***Cunha Salina***

No estuário do tipo *Cunha Salina*, o volume do rio  $R$  é muito maior do que o volume de maré  $T$ . Esse tipo de estuário é típico de regiões de micromaré e de lugares onde predominam condições de grande descarga fluvial. A água doce escoar por cima da água salgada em uma camada bem fina (Figura 2.3). Toda a mistura é restrita a uma fina camada de transição, com a água doce em cima e a cunha salina em baixo. Um perfil de salinidade vertical apresenta salinidade zero na superfície e salinidade oceânica próximo ao fundo. A profundidade da camada de interface diminui gradativamente ao aproximar do limite externo do estuário (SINHA *et al*, 2008).



**FIGURA 2.3 – REPRESENTAÇÃO DE UM ESTUÁRIO DO TIPO CUNHA SALINA.**  
(FONTE: SINHA *ET AL*, 2008).

### ***Estuário Estratificado***

O *Estuário Estratificado* apresenta uma grande diferença entre o volume do rio ( $R$ ) e o volume de maré ( $T$ ), porém em menor proporção do que o estuário do tipo cunha salina. A grande velocidade próxima da interface produz turbulência na transição entre as camadas de água doce e de água salgada. A ação das ondas na camada superior causa a mistura que leva a água salgada para montante do estuário. Esse processo ocorre apenas em direção a montante, não ocorrendo mistura a jusante (Figura 2.4). O resultado é o aumento da salinidade na

camada superior, enquanto a salinidade na camada mais profunda não se altera (SINHA *et al*, 2008).

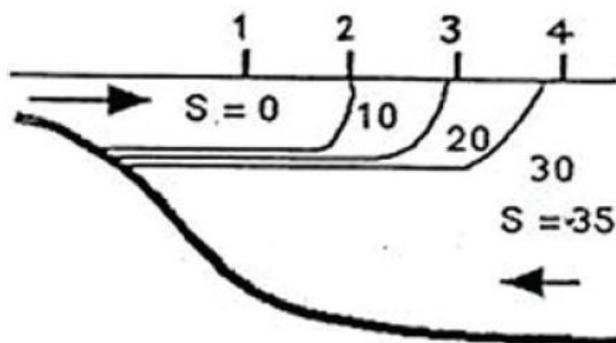


FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO DE UM ESTUÁRIO DO TIPO ESTRATIFICADO.  
(FONTE: SINHA *ET AL*, 2008).

### *Estuário Parcialmente Estratificado*

No *Estuário Parcialmente Estratificado*, o volume do rio ( $R$ ) é pequeno comparado com o volume de maré ( $T$ ). O fluxo de maré é turbulento em toda a coluna d'água, principalmente junto ao fundo. Como resultado, a água salgada é misturada na camada superior e água doce na inferior. A salinidade, portanto, varia ao longo do eixo do estuário e não apenas na camada superior como no caso do estuário estratificado. Há um aumento da velocidade na superfície, levando o transporte em direção ao oceano, mas não tão intensamente como no caso do estuário estratificado (SINHA *et al*, 2008). O diagrama deste estuário é exemplificado na Figura 2.5.

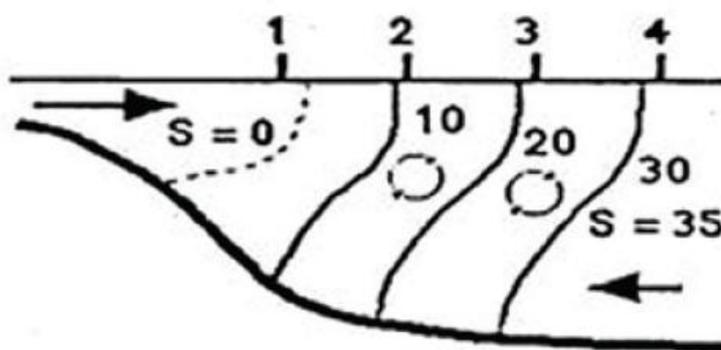


FIGURA 2.5 – DIAGRAMA DE UM ESTUÁRIO PARCIALMENTE ESTRATIFICADO.  
(FONTE: SINHA *ET AL*, 2008).

### *Verticalmente Bem Misturado*

O volume do rio ( $R$ ) é insignificante comparado com o volume de maré ( $T$ ), que domina o estuário inteiro. Ocorre a mistura total da coluna d'água, desde a superfície até o fundo,

eliminado qualquer estratificação vertical. Como resultado, o perfil vertical da salinidade apresenta uma salinidade uniforme, aumentando horizontalmente em direção ao oceano (SINHA *et al*, 2008). A Figura 2.6 exemplifica este tipo de estuário.

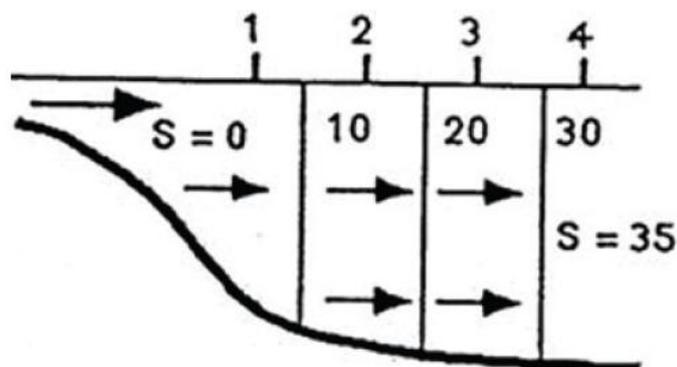


FIGURA 2.6 - REPRESENTAÇÃO DE UM ESTUÁRIO DO TIPO VERTICALMENTE BEM MISTURADO.  
(FONTE: SINHA *ET AL*, 2008).

### ***Estuário Bem Misturado***

A estrutura deste tipo de estuário é semelhante ao Estuário Verticalmente Bem Misturado (Figura 2.6), e é a representação mais utilizada para a modelagem matemática de estuários, por ser a mais simplificada.

Em canais estuarinos estreitos, o cisalhamento lateral poderá ser suficientemente intenso para gerar condições homogêneas lateralmente. Nessas condições, a salinidade aumenta gradativamente estuário abaixo e o movimento médio está orientado nessa direção em todas as profundidades. Embora esse movimento tenha a tendência de transportar sal para fora do estuário, o balanço é atingido pelo transporte estuário acima por difusão turbulenta (dispersão de maré), associada a irregularidades topográficas e ao atrito com o fundo.

Nos estuários considerados homogêneos, o cisalhamento das correntes de maré gera difusão turbulenta com intensidade bem maior que os outros tipos de estuários. Embora a onda de maré tenha um componente dominante, as máximas velocidades de enchente e vazante ocorrem em instantes defasados das marés alta e baixa, respectivamente, como apresentado na Figura 2.2.

### ***Estuário Inverso***

Estes estuários não apresentam aporte de água doce dos rios e estão em áreas de grande evaporação. A salinidade na superfície não diminui em direção a montante, mas aumenta

devido à perda de água por evaporação. Como resultado há aumento da densidade e afundamento da água salgada no limite interior do estuário. Assim, o movimento da água é direcionado a montante na superfície e em direção ao oceano no fundo. Tradicionalmente, a partir da definição de estuário, este tipo não pode ser considerado como um estuário, entretanto, comparando com os outros tipos citados acima, a circulação é reversa a estes, o que explica o nome dado a esse estuário (SINHA *et al*, 2008).

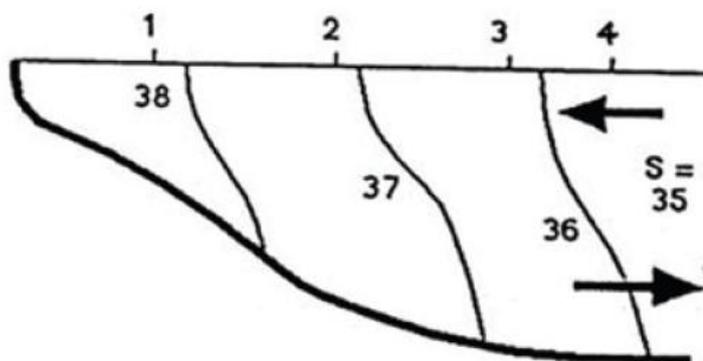


FIGURA 2.7 – DIAGRAMA DE UM ESTUÁRIO INVERSO.  
(FONTE: SINHA *ET AL*, 2008).

### *Estuário Intermitente*

Os estuários podem mudar de tipo devido a variações na precipitação e a vazão do rio correspondente. Eles podem mostrar diferentes características em diferentes partes como resultado de restrições topográficas na propagação da onda de maré ao longo do estuário, o que afeta o volume de maré.

A grande variabilidade da precipitação na bacia de drenagem pode modificar a classificação do estuário. Enquanto há aporte do rio, podendo ser pequeno, a característica de mistura estuarina se mantém. Se o aporte do rio seca, mesmo que temporariamente, o estuário perde sua característica e a circulação oceânica domina (Figura 2.8) (SINHA *et al*, 2008).

## **2.1 A GESTÃO INTEGRADA NO BRASIL**

A noção de gestão integrada de recursos hídricos tem diversos fatores a serem considerados. Primeiramente, abrangendo os processos de transporte de massa de água (ciclo hidrológico); em segundo, quanto aos usos múltiplos de um corpo hídrico; terceiro, no inter-relacionamento do corpo hídrico com os demais elementos do ecossistema (solo, fauna e flora); quarto, na coparticipação entre gestores, usuários e população local; e finalmente, no anseio pelo desenvolvimento socioeconômico considerando a manutenção dos recursos naturais (MACHADO *et al.*, 2004). Assim sendo, na interface da gestão integrada de recursos hídricos

numa zona costeira, devem ser considerados os fatores que afetam os recursos hídricos nesta região, como a ação marinha, climática, antrópica, etc.

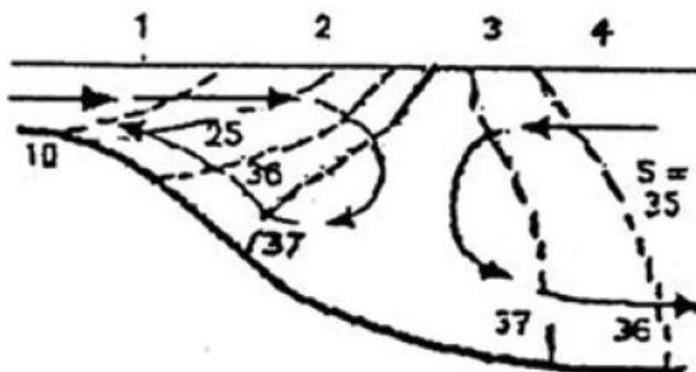


FIGURA 2.8 – REPRESENTAÇÃO DE UM ESTUÁRIO INTEMITENTE.

(FONTE: SINHA *ET AL*, 2008).

A noção de gestão integrada de recursos hídricos tem diversos fatores a serem considerados. Primeiramente, abrangendo os processos de transporte de massa de água (ciclo hidrológico); em segundo, quanto aos usos múltiplos de um corpo hídrico; terceiro, no inter-relacionamento do corpo hídrico com os demais elementos do ecossistema (solo, fauna e flora); quarto, na coparticipação entre gestores, usuários e população local; e finalmente, no anseio pelo desenvolvimento socioeconômico considerando a manutenção dos recursos naturais (MACHADO *et al.*, 2004). Assim sendo, na interface da gestão integrada de recursos hídricos numa zona costeira, devem ser considerados os fatores que afetam os recursos hídricos nesta região, como a ação marinha, climática, antrópica, etc.

Muitas vezes o conceito de gestão integrada é entendido, erroneamente, como a total integração de todos os fatores envolvidos em todos os sentidos, ou seja, no caso da gestão de recursos hídricos na zona costeira, tanto a influência do oceano no continente como a influência do continente no oceano. O grave conflito gerado por esta abordagem é o tamanho da área de gestão e os inúmeros condicionantes a serem considerados.

Quando se trata de gestão de **recursos hídricos**, ou seja, a água doce como recurso econômico e ambiental, consideram-se os fatores que podem comprometer o uso, de forma quantitativa ou qualitativa. Quando se relacionam os recursos hídricos com a zona costeira, deve-se dar enfoque aos impactos que a zona costeira gera nos recursos hídricos continentais, como, principalmente, aumento do nível dos rios com água salgada (efeito das marés). E não abranger todos os recursos naturais e os seus efeitos gerados pelos recursos hídricos continentais na zona costeira, para não deixar a gestão muito complexa e de difícil operação.

A necessidade da prática da gestão de recursos naturais de forma integrada tem se consolidado nos últimos 20 anos (MACHADO *et al.*, 2004). A preocupação com a integração da gestão estuarina, costeira e de bacias hidrográficas, em nível internacional, se firmou indispensável na *Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento e Agenda 21*, realizada no Rio de Janeiro em 1992. No Brasil, este conceito de integração se consolida com a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), de 1997, que menciona esta integração.

A partir destes marcos, torna-se um consenso, tanto nacional como internacionalmente, que as bacias hidrográficas e a área costeira estão intimamente conectadas através da estrutura física e ecológica e dos processos físicos e biológicos a estes ligados.

No Brasil, as principais normas que legislam o tema são a PNRH e o PNGC.

### 2.1.1 PLANO NACIONAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO (PNGC)

O PNGC foi instituído com a promulgação da Lei Federal N° 7.661, em 18 de maio de 1988, como parte integrante da Política Nacional para os Recursos do Mar e da Política Nacional de Meio Ambiente. Apesar do tempo de existência do PNGC, a lei que a estabelece é muito geral e apenas menciona a existência de um plano nacional, sem estabelecer instrumentos e diretrizes.

Em 1997, a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), com o objetivo de atualizar a Lei Federal N° 7.661/1988, cria o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II). O PNGC II englobou as diretrizes propostas pela Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (RIO-92), incorporando as novas demandas que surgiram na sociedade e a experiência do Ministério do Meio dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (MMA). A principal contribuição do PNGC II foi à proposição de uma definição mais ampla para a faixa terrestre da ZC, acrescentando uma lista dos municípios que compõem a ZC (presente no anexo A). Entretanto ainda não existiam instrumentos de gestão.

Em 2004, através do Decreto Federal N° 5.300, mais detalhamentos são propostos para a PNGC, como regras para o uso e ocupação da zona costeira, instrumentos de gerenciamento, entre outros. Os instrumentos do PNGC, previsto pelo referido decreto, para efetivar a gestão da zona costeira estão na Tabela 2.1.

O processo de gestão da zona costeira é desenvolvido de forma integrada, descentralizada e participativa, sendo a responsabilidade de formulação e implementação dos planos regionais e locais de gerenciamento costeiro atribuída aos estados e municípios costeiros.

**TABELA 2.1 – INSTRUMENTOS DO PLANO NACIONAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO.**

<b>INSTRUMENTOS DO PNGC</b>
I – Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro – PNGC;
II – Plano de Ação Federal da Zona Costeira – PAF;
III – Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro – PEGC;
IV – Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro – PMGC;
V – Sistema de Informações do Gerenciamento Costeiro – SIGERCO;
VI – Sistema de Monitoramento Ambiental da Zona Costeira – SMA;
VII – Relatório de Qualidade Ambiental da Zona Costeira – RQA-ZC;
VIII – Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro – ZEEC;
IX – Macrodiagnóstico da Zona Costeira.

(FONTE: BRASIL, 2004).

Dos vários instrumentos do PNGC, o zoneamento ecológico-econômico costeiro (ZEEC) se destaca na aplicação da gestão integrada dos recursos hídricos. O anexo I do Decreto Federal N°. 5.300/2004, apresenta um quadro geral para orientar este zoneamento. Este anexo é reproduzido no anexo B desta dissertação.

No quadro são propostas cinco zonas, a partir do grau de intervenção antrópica na área e a consequente alteração do ecossistema natural. Para cada zona são propostas metas ambientais para conservar o meio ambiente e mitigar as alterações feitas. No que tange aos recursos hídricos, grande parte das alterações ambientais consideradas para as classes implicam em modificações de qualidade de água. Apenas classe 4 (ecossistemas significativamente modificados pela ação antrópica) mencionou alterações quantitativas dos recursos hídricos – *alteração na drenagem ou hidrodinâmica do ambiente* – porém as metas não preveem objetos específicos para contornar tal problema.

Nos instrumentos acima mencionados, não há uma preocupação com variações na disponibilidade hídrica quantitativa na zona costeira, em face do aumento da intrusão salina.

### 2.1.2 POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (PNRH)

Ao contrário da PNGC, a gestão de águas, de 1997, surgiu com força desde o início. A PNRH é mais completa, com mais especificações sobre como deve ser feita a gestão. Esta diferença é

resultado da importância econômica dos recursos hídricos, com um insumo de produção, meio de transporte, abastecimento público, fonte de energia, turismo, etc. Na gestão de bacias hidrográficas o problema que surge é como aplicar na prática os inúmeros regulamentos, resoluções e legislações.

Da PNRH os instrumentos de gestão estão mencionados na Tabela 2.2. Na PNRH, vários já estão sendo aplicados e são foco de estudos de caso que regulamentam sua utilização para casos específicos de bacias costeiras. Um destes instrumentos é o Plano Nacional de Recursos Hídricos, já foi aprovado e vem sendo aplicado, num processo flexível, dinâmico e contínuo, contemplando as necessidades das macrobacias nacionais.

**TABELA 2.2 – INSTRUMENTOS DA POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS.**

<b>INSTRUMENTOS DA PNRH</b>
I – Planos de Recursos Hídricos;
II – o Enquadramento dos Corpos de Água em Classes, segundo os usos preponderantes da água;
III – a Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
IV – a Cobrança pelo uso de recursos hídricos;
VI – o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

(FONTE: BRASIL, 1997a).

O plano de recursos hídricos é a maior ferramenta de gestão, onde são propostas medidas específicas e diretas, objetivos a serem alcançados e metas a serem atingidas. No plano nacional pode haver diretivas específicas para bacias hidrográficas localizadas na zona costeira e como os outros instrumentos devem ser aplicados nesta região considerando suas particularidades físicas.

A outorga de uso de recursos hídricos é uma ferramenta útil para definir os limites que cada usuário tem para utilizar o recurso dentro de cada bacia hidrográfica. Aplicando a outorga de uso para bacias costeiras, pode-se utilizar como critério para estabelecimento dos limites o mínimo de vazão que deve haver no exutório para impedir maior intrusão salina no continente.

Outro instrumento com aplicação prática na zona costeira é o enquadramento dos corpos de água de acordo com seu uso preponderante. A ideia deste instrumento é estabelecer critérios de qualidade de água considerando os usos que a comunidade quer ou vem dando para o corpo de água. Assim, usos mais nobres, como recreação de contato primário e abastecimento público, possuem uma classe com níveis dos parâmetros mais restritivos. Porém, não há distinção entre os parâmetros analisados para água doce, salobra ou salgada, para todos usa-se

os mesmos: oxigênio dissolvido, DBO<sub>5</sub>, DQO, etc. Numa área costeira, a salinidade é um parâmetro que reflete a dinâmica ambiental e também limita alguns usos da água, devendo ser, portanto, mais um parâmetro a ser analisado e monitorado para as águas salobras.

Na gestão de recursos hídricos, salienta-se como principal instrumento facilitador, a figura dos comitês gestores de bacias hidrográficas. A importância dos comitês de bacia é indiscutível. É competência dos comitês estabelecerem debates sobre questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes.

A PNRH prevê vários instrumentos de gestão. Entretanto, ao considerar a interface entre os recursos hídricos e a zona costeira, normas mais específicas devem considerar as particularidades deste ambiente e estabelecer as diferenciações da aplicação destes instrumentos no caso de uma bacia hidrográfica localizada na zona costeira.

### 2.1.3 INTEGRAÇÃO PNRH E PNGC

Apesar das relações físicas funcionarem de forma contínua e integrada, expressa principalmente através da dinâmica da salinidade; observa-se que os instrumentos das políticas públicas como a de Recursos Hídricos e a de Gerenciamento Costeiro ainda estão fragmentadas e com baixa efetividade em seus resultados. Afirmação esta constatada pela situação dos recursos hídricos das cidades costeiras brasileiras.

Ainda existem dilemas a serem resolvidos para a efetivação da gestão integrada. Um deles trata da questão geográfica. Na zona costeira, o gerenciamento não respeita o funcionamento dos sistemas físicos, como as bacias hidrográficas, utilizando os limites municipais como unidade de gestão. Os planos de recursos hídricos utilizam como unidade territorial as bacias hidrográficas, mas não consideram a influência gerada pela zona costeira, num estuário.

Tem-se aí o foco principal do problema aqui estudado, ou seja, instâncias administrativas separadas (PNGC e o PNRH), porém sob a ótica física de um sistema que possui elementos indissociáveis (bacia hidrográfica, zona estuarina e zona costeira).

Outro questionamento que surge desta problemática é o enfoque do gerenciamento costeiro na costa *stricto sensu*, ou seja, no que se conhece como praia e num pequeno raio ao adentro do continente. Tradicionalmente, quando se trata de gestão integrada entre a zona costeira e as bacias hidrográficas, a ênfase é dada à qualidade de água, mesmo que de modo precário, onde

na bacia hidrográfica é retirado o recurso e lançado o resíduo, que acaba na zona costeira, diga-se, praia.

Por isso, é interessante introduzir o conceito de gestão de estuários, tratando da área de influência salina dentro do continente, que é afetada tanto pelos usos na bacia hidrográfica quando pela dinâmica marítima. Desta forma, ao se administrar a dinâmica de salinidade na zona estuarina, controlando os fluxos de água doce oriundos da bacia hidrográfica à montante, administra-se também a zona costeira.

Para a integração entre a PNRH e o PNGC, podem-se utilizar os vários instrumentos já mencionados nas tabelas 2.1 e 2.2 como ferramentas de suporte a gestão, feitas ou não algumas adaptações específicas.

O Plano de Bacia Hidrográfica (PBH) e o Plano de Gerenciamento Costeiro do Município (PMGC) devem ser integrados, visando corrigir as limitações oriundas as diferentes esferas administrativas de cada plano. Porém, na elaboração dos planos de recursos hídricos e de gerenciamento costeiro, surge um problema, quando temos por um lado, o comitê de bacia e por outro a prefeitura municipal.

Ao integrar os dois níveis institucionais, temos as propostas do comitê que podem ser efetivadas pela prefeitura, responsável pelo ordenamento territorial. Este processo não é simples e fácil. Com interesses diversos, vários municípios, podem tornar impraticável a integração. Soma-se o fato de que, apesar de o município ser responsável pelo controle do uso do solo de seu território, não possui a dominialidade sobre seus recursos hídricos. Entra assim, mais um ente administrativo no processo, que é o estado ou a União. O processo dever ser integrado, com a participação de todos os envolvidos. Nos comitês de bacia hidrográfica é que estas entidades podem se integrar e discutir os interesses distintos.

A ocupação do território na zona costeira dever ser restringido em função da disponibilidade de recursos naturais (no caso, hídricos) para as atividades a serem estabelecidas. O uso do solo deve respeitar os limites impostos pelo ambiente. Nesta questão, o instrumento a ser utilizado é o ZEEC, que está intimamente ligado ao desenvolvimento e que visa assegurar a equidade de acesso aos recursos ambientais.

A definição dos critérios para o ordenamento territorial deve ser discutida e definida nos comitês de bacia, e não apenas em nível municipal, pois o uso do solo afeta diretamente os

recursos hídricos e a qualidade ambiental da zona costeira, que não obedecem aos limites territoriais criados.

O principal ente de integração são os comitês de bacia hidrográfica, formados e estruturados pelos usuários, comunidade e demais interessados de cada bacia específica. Entretanto, não há menção de que esta seja uma instituição de integração entre a questão hídrica e o ordenamento territorial, o que seria muito desejável e propício.

Os planos de recursos hídricos e de ZEEC podem ser discutidos nos comitês, de forma integrada. Os usos da água devem ser limitados através do ordenamento territorial, com licenças ambientais e zoneamento, além da outorga, para manter a qualidade necessária, observando também a salinidade. Nos comitês devem ser propostas limitações de uso do solo em função da disponibilidade hídrica a serem encaminhadas para os municípios.

O uso do solo se traduz em como o homem ordena o seu território, que atividades vão ser desenvolvidas e implantadas. Numa bacia costeira, o ZEEC define em que locais da bacia podem ser exercidas e instaladas diversas atividades econômicas em função do potencial poluidor, dos resíduos gerados, e do consumo de recursos naturais para o desenvolvimento da atividade, entre outros.

Considerando a problemática da limitação qualitativa dos recursos hídricos devido ao aumento nos níveis de salinidade, que pode estar relacionado com o menor aporte de água doce à zona costeira, o uso do solo deve ser feito de maneira a limitar as atividades que demandem grande quantidade de água, que se implantados em excesso na bacia vão comprometer a disponibilidade de água doce devido ao aumento da salinidade.

#### 2.1.4 CÂMARA TÉCNICA DE INTEGRAÇÃO DA GESTÃO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E DOS SISTEMAS ESTUARINOS E DA ZONA COSTEIRA (CTCOAST)

No Brasil as discussões sobre a efetivação da integração entre a gestão de recursos hídricos e da zona costeira, estabelecido na PNRH, tiveram como marco inicial o ano de 2001, com a criação da ANA (Agência Nacional de Águas) e com o 1º Workshop Nacional para Integração das Águas Interiores e Costeiras, em Vitória, ES.

Entre os anos 2001 e 2005, o assunto desta integração esteve em pauta nos principais fóruns de discussão do Brasil, principalmente no Fórum Nacional de Comitês de Bacia Hidrográfica,

realizado em Gramado (RS) em 2004. Neste fórum, a plenária do evento aprovou a solicitação de criação de uma Câmara Técnica no âmbito do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, que contemple a temática. Neste período, a ANA promoveu diversas oficinas para discutir questões como outorga em águas salobras e temas relacionados.

Em 2005, o Ministério do Meio Ambiente realizou o 1º Encontro Nacional Temático de Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e da Zona Costeira, com o objetivo de subsidiar uma metodologia de gestão integrada. Foram discutidas questões referentes aos instrumentos da PNRH e do PNGC, além de instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA), como o Licenciamento Ambiental (NICOLODI *et al.*, 2009).

O resultado final deste evento foi criação da Câmara Técnica de Integração das Bacias Hidrográficas e dos Sistemas Estuarinos e Zona Costeira – CTCOST, a qual foi instituída em junho de 2005, pela Resolução N° 51 do CNRH. Os objetivos da CTCOST são:

- ✓ Integrar os instrumentos da PNRH e do PNGC;
- ✓ Analisar e propor ações para minimizar ou solucionar conflitos de uso de recursos hídricos na zona costeira e estuários;
- ✓ Propor intercâmbio técnico e interinstitucional entre os diferentes gestores.

Mesmo com pouco tempo de existência, a efetividade da CTCOST decorre da proposição de elementos, ou aspectos, adicionais a serem incluídos na regulamentação dos instrumentos da PNRH para o caso de bacias hidrográficas costeiras.

O primeiro instrumento trabalhado foi o Plano de Recursos Hídricos, dado o caráter disseminador de diretrizes para os demais instrumentos, bem como de orientação para os comitês de bacia lidarem com os mecanismos de integração entre os sistemas de recursos hídricos e de gerenciamento costeiro. Desta forma, utilizando como base a Resolução N° 17 do CNRH, que estabelece as normas gerais para a elaboração dos planos de bacia, foi gerada uma proposta de resolução com o objetivo de indicar as particularidades de uma bacia hidrográfica costeira.

Para que a proposta de resolução possa resultar em consequências práticas, foi incluído um artigo que determina que, para a formulação de diretrizes para o enquadramento dos corpos de água, para a outorga e a cobrança pelo uso de recursos hídricos, devem ser observadas as especificidades e limitações impostas por diferentes zonas de gestão. Foram criadas três zonas potenciais de interação (Tabela 2.3) (BRASIL, 2008b), que foram baseadas em

UNEP/MAP/PAP (1999), para servir como base para as medidas de gestão de uma bacia hidrográfica costeira.

Essa divisão foi estabelecida considerando os aspectos físicos (geomorfologia, hidrologia, etc.) e ecológicos (ecossistemas terrestres e marinhos) e atividades humanas (UNEP/MAP/PAP, 1999). A principal zona para a gestão integrada é a ZCR, onde ocorre a interação entre o mar e a bacia e as atividades humanas. Nesta zona, é que será implementado o ordenamento dos usos dos recursos estuarinos, além de identificados e analisados os principais conflitos que possam comprometer a integridade do ecossistema estuarino e do ambiente estuarino adjacente. A ZCR é envolta pela ZD, que compõem a transição entre os sistemas terrestres marinhos adjacentes que possam influenciar a integridade e os usos dos recursos na ZCR. A ZI abrange a área de potencial interação entre a totalidade da bacia de drenagem e o mar territorial (NICOLODI *et al.*, 2009).

TABELA 2.3 – ZONAS DE GESTÃO DA PROPOSTA DE RESOLUÇÃO DO CNRH.

ZONA	DEFINIÇÃO	DELIMITAÇÃO
<b>ZONA CRÍTICA – ZCR</b>	Representa ao próprio estuário, caracterizada pela mistura de água e sedimentos fluviais e marinhos;	Gradiente de salinidade e Pluma estuarina;
<b>ZONA DINÂMICA – ZD</b>	Área circunvizinha a ZCR sujeita a influência de processos naturais e atividades humanas sobre as características e recursos estuarinos e marinhos. Engloba ecossistemas ripários, áreas úmidas, sistemas lagunares e segmentos terrestre e marinho da orla costeira;	APP*s fluviomarinhas e áreas úmidas delimitadas nas áreas dos municípios que compõem a ZC. Orla marítima como definida pelo Decreto Federal N.º 5300/2004;
<b>ZONA DE INFLUÊNCIA – ZI</b>	É composta pela bacia hidrográfica adjacente e pelo mar territorial, que exercem influencia sobre as ZCR e ZD.	Bacia Hidrográfica e Mar Territorial.

\*APP=área de proteção permanente.

(FONTE: BRASIL, 2008b)

Salienta-se que estas zonas não dizem respeito a zoneamento, ou a aplicação de novos instrumentos de gestão. São zonas específicas para a gestão integrada entre a PNRG e PNGC, no plano político, técnico e institucional. A partir destas zonas de gestão, o critério para a outorga de uso de recursos hídricos deve ser diferenciado nas bacias costeiras, assim como as regras de operação de reservatórios e outras que possam causar interferências no regime hídrico.

Aparentemente, essa definição de zonas é mais pertinente ao gerenciamento costeiro do que a gestão de recursos hídricos. Ao aumentar a área da bacia hidrográfica até o limite do Mar

Territorial, a gestão dos recursos hídricos fica muito mais complexa. Além disso, surge o questionamento sobre como controlar/monitorar a região marinha considerando que aí existem muitos fatores (marés, ondas, fatores meteorológicos, etc.) que estão fora do controle humano. A influência do estuário, diga-se ZCR, no mar territorial seria muito maior do à ação provocada pelo mar territorial no estuário. Sendo, então, esta parte da ZI, mais relevante para a aplicação no gerenciamento costeiro (com influência da bacia hidrográfica) e não para a gestão de recursos hídricos considerando limitações na disponibilidade e usos destes recursos.

A versão final dessa proposta foi aprovada pela CTCOST em outubro de 2007, faltando ser aprovada pelo CNRH. Entretanto, essa proposta de resolução foi devolvida pela plenária do CNRH para reavaliação da CTCOST, junto com CTPNRH (Câmara Técnica do Plano Nacional de Recursos Hídricos) e CTPOAR (Câmara Técnica de Integração de Procedimentos, Ações de Outorga e Ações Reguladoras)<sup>2</sup>.

Surgiram dificuldades que levaram a resistência por parte do CNRH à aceitação dos termos originais da proposta da CTCOST. Duas forma as razões principais. Primeiramente, por parte da ANA, o receio que a resolução de integração venha a acarretar em custos adicionais para a mesma, e talvez, também para os estados. A alegação é que a área estuarina, principalmente marinha, está fora da área de competência do Sistema Nacional de Recursos Hídricos. Assim, a ANA entende que nestes ambientes as atividades não são passíveis de outorga, por exemplo, e muito menos cobrança pelo uso da água. Em segundo lugar, o setor elétrico associado ao industrial (Confederação Nacional da Indústria – CNI), não deseja que esta integração venha a causar problemas para a operação de reservatórios<sup>3</sup>.

Assim, após reconsiderações necessárias, a resolução final retirou a definição das zonas de influência, e foi para aprovação pelo CNRH em dezembro de 2009. Entretanto, não houve o aceite por parte do CNRH da proposta de resolução, que retirou a proposta de pauta alegando a necessidade de verificação sobre a ingerência do Sistema Nacional de Recursos Hídricos na área costeira e as conotações correlatas. Esta decisão foi capitaneada pelo setor industrial e de energia.

Apesar da ainda não estar aprovado à resolução que estabelece as diretrizes adicionais para elaboração de planos de bacia em zonas costeiras, um segundo instrumento da PNRH está em estudo pela CTCOST, a outorga de direito de uso de recursos hídricos em bacias costeiras.

---

<sup>2</sup> Conversa informal com o Prof. Dr. Luis Fernando de Abreu Cybis, Presidente da CTCOST, em Porto Alegre, em junho de 2009.

<sup>3</sup> Idem 2.

A outorga é um importante instrumento da PNRH, que possui estreita relação com o licenciamento ambiental e enfrenta um ambiente de dúvidas técnicas e legais quanto a sua aplicação na faixa terrestre da ZC. Um grupo técnico específico foi criado para tratar desse tema, notadamente quanto aos aspectos técnico. A sequência dos demais instrumentos ainda não foi definida pela CTCOST.

### 2.1.1 GESTÃO INTEGRADA NO RIO GRANDE DO SUL

No estado do Rio Grande do Sul, o órgão responsável pela gestão ambiental, incluindo a zona costeira, é a FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler), órgão vinculado à Secretaria Estadual de Meio Ambiente (SEMA), é responsável pelo licenciamento ambiental no estado.

A FEPAM é responsável pelo gerenciamento costeiro no RS, através do programa GERCO, iniciado em 1988. Este programa prevê a implantação de um processo de administração costeira, através de instrumentos (Tabela 2.4). O GERCO baseou seus instrumentos tanto na PNGC como na PNMA (licenciamento) e na PNRH (enquadramento).

**TABELA 2.4 – INSTRUMENTOS DE GESTÃO DO GERCO.**

<b>INSTRUMENTOS DO GERCO</b>
I – Fiscalização;
II – Licenciamento;
III – Plano Municipal de Gerenciamento Costeiro – PEGC;
IV – Sistema de Informações do Gerenciamento Costeiro – SIGERCO;
V – Monitoramento Costeiro;
VI – Planos de Gestão;
VII – Zoneamento Ecológico Econômico Costeiro – ZEEC;
VIII – Enquadramentos dos Recursos Hídricos.

(FONTE: SANTOS, 2007).

Em 1997, começou a construção de um cenário favorável para o desenvolvimento de um processo de gestão integrada da zona costeira e bacia hidrográfica, através de uma parceria FEPAM e DRH/RS – Departamento de Recursos Hídricos do Estado. Assim, o processo começou no norte do estado, na bacia do Rio Tramandaí, com a elaboração do zoneamento ecológico-econômico costeiro (ZEEC). Posteriormente o Plano de Bacia começou a ser desenvolvido, tendo como prazo para a finalização da fase C o ano de 2011 (SANTOS, 2007).

A aprovação do plano é incumbência do Comitê Tramandaí (já existente), enquanto o desenvolvimento fica a cargo da Agência de Região Hidrográfica (a ser implementada.)

Outro atributo da FEPAM é a fiscalização do uso de recursos hídricos, sendo vinculado a SEMA (Secretaria Estadual de Meio Ambiente), órgão emissor das outorgas de uso de recursos hídricos.

## **2.2 PROCESSOS INTERNACIONAIS DE GESTÃO INTEGRADA**

Apesar da preocupação com a integração da gestão estuarina, costeira e de bacias hidrográficas do Brasil ser recente, esta problemática já está sendo discutida a nível mundial desde a *Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento e Agenda 21*, realizada no Rio de Janeiro em 1992, conhecida como RIO-92. A partir das discussões geradas nesta conferência, tornou-se um consenso que as bacias hidrográficas e a área costeira estão intimamente conectadas através da estrutura física e ecológica e dos processos físicos e biológicos a estes ligados e que a gestão destes ambientes deve ser integrada (UNEP/MAP/PAP, 1999).

Nos anos que se seguiram a RIO-92, a UNEP (*United Nations Environment Programme*) promove dois programas de gestão com o intuito de servir como base para políticas de integração do contínuo bacia hidrográfica – zona costeira, o IWRM (*Integrated Water Resource Management*) e o ICAM (*Integrated Coastal Area Management*). Entretanto, os conceitos do IWRM e do ICAM se desenvolveram de forma independente, em diferentes organizações e órgãos de gestão, com objetivos e *modus operandi* distintos. Os dois programas evoluíram separadamente, cada um em sua delimitação física, sem considerar as áreas adjacentes. A costa e o estuário não eram considerados parte da bacia hidrográfica (PICKAVER & SADACHARAN, 2007).

Com o aumento da demanda por recursos hídricos, assim como dos níveis de poluição, um novo enfoque se tornou necessário para assegurar a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos e costeiros. Os problemas relacionados com a bacia hidrográfica e com a zona costeira já não podiam ser resolvidos de forma separada. O Programa de Ação Global da UNEP (*United Nations Environment Programme*) começou a promover a ideia que as duas disciplinas, gestão de recursos hídricos e gerenciamento costeiro, devem trabalhar juntas, pois é o único meio de manter a viabilidade socioeconômica e ambiental destas áreas.

A primeira ação na direção da integração foi a publicação em 1999, pela *UNEP*, do guia intitulado *Conceptual Framework and Planning Guidelines for Integrates Coastal Area and River Basin Management* (UNEP/MAP/PAP, 1999). Esta publicação é considerada o marco mundial nessa temática, pois lançou os pilares da integração da zona costeira com a bacia hidrográfica com base num estudo piloto na região do Mar Mediterrâneo.

Em 2000, a *UNEP* cria a *ICARM* (*Integrated Coastal Area and River Basin Management – Gestão Integrada da Área Costeira e da Bacia Hidrográfica*), com o intuito de servir propondo a base conceitual e os instrumentos de integração. Os princípios básicos previstos pela *ICARM* são:

- ✓ Respeitar a integridade da bacia hidrográfica e do ecossistema costeiro e aceitar os limites estabelecidos no uso dos recursos;
- ✓ Assegurar a importância estratégica dos recursos renováveis para o desenvolvimento socioeconômico;
- ✓ Permitir a integração de atividades e regular os conflitos dos múltiplos usos;
- ✓ Garantir a integração multissetorial e multinível na tomada de decisão unindo a gestão em larga escala e a intervenção na escala local;
- ✓ Permitir a participação de todos os atores, principalmente a população local, no processo de planejamento, para assegurar a gestão efetiva.

Para alcançar estes objetivos, a *ICARM* sugere algumas etapas. A primeira é a descrição da área de estudo. Como os ecossistemas costeiros e os de bacia hidrográfica são complexos, é necessária uma analogia simples com a qual cientistas e gestores possam usar para descrever as principais características destes ecossistemas e as interações com as atividades humanas. A teoria de sistemas cria um caminho para desenvolver uma abordagem simples. O princípio desta análise são dois componentes: o sistema natural / físico e o sistema humano. Os dois sistemas interagem: a natureza dá o recurso para o homem e o homem lança o resíduo de volta para o meio natural. Os gestores controlam estas interações de duas maneiras: regras administrativas e regulação e por meios de intervenção técnica.

Cientificamente, um sistema pode ser representado por um modelo como parte do mundo real. O modelo é composto por elementos e interações que simula a estrutura e dinâmica da parte correspondente ao mundo real. Esse é uma ferramenta útil para descrever uma situação real e para analisar problemas complexos (UNEP/MAP/PAP, 1999).

Para a problemática da disponibilidade de água doce numa região estuarina-costeira, o sistema pode ser composto pela bacia hidrográfica cujo exutório é um estuário e parte da região oceânica costeira a este estuário. A variação da amplitude de maré e tempestades são fatores do lado oceânico; e a demanda por água doce (fator humano), a precipitação, a evaporação são fatores do lado da bacia hidrográfica. Para a descrição física de um sistema, somente aspectos abióticos e parâmetros físicos são utilizados. Variações em qualquer um dos fatores, mantidos os parâmetros físicos constantes, afetam a mistura de água doce e salgada no estuário, aumentando ou diminuindo a salinidade.

Depois de descrever a área a ser estudada e compreender as interações que sofrem naturalmente e devido à ação antrópica, a metodologia de cenários pode ser útil no estabelecimento de regras administrativas e de regulação (medidas de gestão propriamente ditas). Com os cenários, a situação atual é comparada com possibilidades futuras de estresse hídrico.

Observando as possibilidades futuras (cenários), regras são propostas para o controle do ambiente, visando à manutenção da disponibilidade hídrica. Neste processo, há necessidade de uma lei, ou arcabouço legal para lhe dar sustentação, como PNRH e PNGC, que citam os instrumentos que devem ser utilizados para implementar efetivamente a gestão.

O processo termina com o monitoramento/fiscalização das medidas estabelecidas, através de instituições de execução e acompanhamento.

Este processo visa à integração de todos os níveis de governança servindo como base para a gestão multidisciplinar da bacia hidrográfica como um todo, incluindo a zona costeira. Este é o principal objetivo da ICARM. Contudo, devido às particularidades de cada bacia hidrográfica, estudos de caso se tornaram essenciais.

Assim, a teoria, princípios e objetivos, da ICARM, foram aplicados em diversas bacias hidrográficas. Com o estudo de várias bacias do mundo, com diferentes características ambientais e econômicas, seria possível identificar os fatores e desafios destas áreas, que justificariam a gestão integrada. Foram feitos estudos de caso em todos os continentes (Figura 2.9), em vários países (Tabela 2.5), totalizando 20 bacias hidrográficas.

Se forem considerados estes 20 estudos de caso e a relação com a efetividade da gestão integrada recursos hídricos e zona costeira a nível local, chega-se a uma divisão em três grupos: I – locais onde foi identificada alguma integração; II – locais onde já existem ações de

integração, mas ainda não há aparato institucional, político ou legislativo para sustentar o manejo integrado; e III – locais onde existem efetivamente a gestão integrada, com um aparato institucional, político e legislativo.

**FIGURA 2.9 – LOCAIS DO MUNDO ONDE FORAM FEITOS OS ESTUDOS DA ICARM**  
(FONTE: PICKAVER & SADACHARAN, 2007 ).



**TABELA 2.5 – ESTUDOS DE CASO DA ICARM.**

<b>CONTINENTES</b>	<b>BACIAS/PAÍSES</b>
África	Rio Tana (Quênia) Rio Rufiji (Tanzânia) Rio Incomati (Moçambique) Rio Senegal (Senegal)
Europa	Rio Oder (Alemanha/Polônia) Rio Danúbio (15 países) Rio Reno (Alemanha, França) Fiorde Odense (Dinamarca)
Austrália	Baía de Moreton
Ásia	Tigre/Eufrates (Iran/Iraque) Lagoa Chilika (Índia) Rio Krishna (Índia) Attanagalu Oya (Sri Lanka) Rio Bang Pakong (Tailândia) Lago Songkhla (Tailândia) Rio Vermelho (Vietnã-China) Rio Jiulongjiang (China)
América	Baía de Chesapeak (EUA) Rio Colorado (EUA/México) Baía Samana (República Dominicana)

(FONTE: PICKAVER & SADACHARAN, 2007).

Desta maneira, as bacias hidrográficas estudadas se enquadram em:

- ✓ Bacias da categoria I: Atanagalu Oya, Rio Krishna, Rio Rufiji, Rio Senegal, Lago Songkhla, Rio Tana, Rio Vermelho e Rio Colorado;
- ✓ Bacias da categoria II: Lagoa Chilika, Rio Tigre-Eufrates, Rio Oder, Fiorde Odense, Baía Moreton, Rio Incomati, Baía Samana, Rio Bang Pakong e Rio Jiulongjiang;
- ✓ Bacias da categoria III: Rio Danúbio, Rio Reno e Baía Chesapeake.

Analisando os estudos de caso, algumas particularidades foram observadas quanto à efetividade da implementação de uma gestão integrada. Talvez o fator mais importante seja uma administração e política públicas forte. Nos países subdesenvolvidos, com uma estrutura administrativa fraca, o processo de gestão integrada está na fase inicial, sem ainda ter gerado efeitos concretos. O contrário acontece nos países desenvolvidos, mais fortes politicamente. As bacias de rios transfronteiriços também se mostraram mais adiantados nos processos de gestão. Os rios europeus (Reno e Danúbio), que são compartilhados por vários países, possuem uma Convenção (uma espécie de Comitê de Bacia), que favorece a gestão integrada.

Estes estudos de caso formam uma base conceitual para a aplicação da ICARM em diferentes bacias hidrográficas, com características específicas, porém seguindo o mesmo objetivo: permitir a utilização econômica dos recursos hídricos e costeiros mantendo a qualidade ambiental.

## **2.3 GEOPROCESSAMENTO**

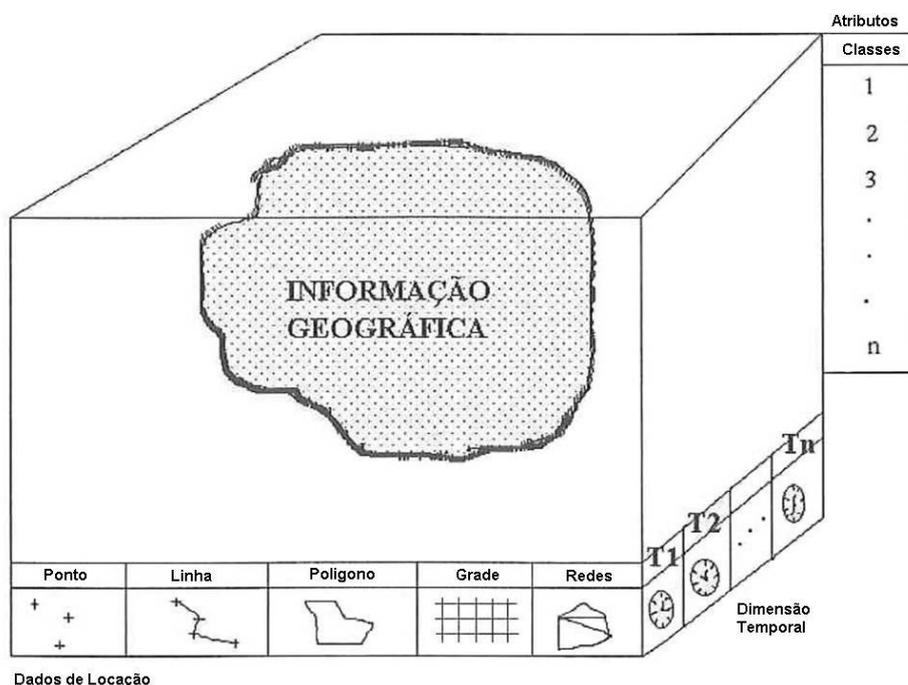
Os sistemas de geoprocessamento, ou do inglês GIS (*Geographic Information System*) traduzido para SIG (Sistema de Informações Geográficas), surgiram na década de 1960, estando voltados, inicialmente, ao inventário e organização de dados, como tipo de florestas e classes de solos. Posteriormente, em decorrência das demandas dos usuários, ênfase foi dada ao armazenamento de dados para o desenvolvimento de operações estatísticas e técnicas de análise espacial. Atualmente, estes sistemas estão sendo utilizados para a tomada de decisão (CRAIN *et al.*, 1984 *apud* SANTOS, 2000).

Os dados apresentados em geoprocessamento representam o mundo real, físico, ou seja, os aspectos da superfície terrestre. Neste ambiente, um único mapa (plano ou camada de informação) contém cada aspecto, variável, característica e/ou propriedade deste mundo real. Cada mapa é um desenho plano indicando a natureza, a posição relativa e o tamanho das

características selecionadas dentro de uma área geográfica (TOMLIN, 1990 *apud* MENDES & CIRILO, 2001).

A importância do geoprocessamento tem se tornado indiscutível. Este sistema permite uma grande capacidade de armazenamento dados, manipulação e atualização, garantindo eficácia no monitoramento de variáveis físicas e sociais. Tudo isso permite um melhor controle no processo de gestão.

Num banco de dados de um sistema de geoprocessamento as informações são necessariamente georreferenciadas, isto é, cada atributo  $z$  (tal como temperatura, altitude, densidade populacional) está associado a coordenadas  $x$  e  $y$  da superfície terrestre (SANTOS, 2000). Assim, a definição de informação geográfica agrega as informações da superfície do terreno (características locais), suas propriedades (variáveis, classes, nomes de valores, etc.) e o tempo em que os dois anteriores ocorrem (Figura 2.10).



**FIGURA 2.10 – INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA GENERALIZADA**  
(FONTE: MENDES & CIRILO, 2001).

A representação computacional dos dados geográficos requer estruturas capazes de contemplar a sua complexidade, incluindo informações sobre posição no espaço, conexões e propriedades do atributo. Existem duas maneiras de alcançar este objetivo (MENDES & CIRILO, 2001):

- ✓ A primeira é o método explícito – raster ou matricial – onde as formas são constituídas a partir de uma matriz  $M(i,j)$  de  $i$  linhas e  $j$  colunas, onde cada célula (pixel) é endereçada por suas coordenadas e contém um valor do atributo na célula. Esta forma de expressar dados geográficos é bidimensional, armazenando assim várias informações como cobertura florestal, tipo e uso do solo, topografia e outros. Sendo bidimensional, cada célula só pode armazenar um atributo, mas os atributos geográficos diferentes podem ser representados por conjuntos de diferentes matrizes (*overlay* ou sobreposição de mapas).
- ✓ A outra é o método implícito – vetorial – na qual as entidades espaciais são representadas por um conjunto de pontos que representam algum tipo de conexão. Neste modo o espaço é considerado contínuo, não segmentado como no espaço raster. Esta representação é composta por três elementos básicos: o ponto, a linha e a área. Os pontos são similares às células raster, exceto por não cobrirem áreas. As linhas e os polígonos se constituem um conjunto de coordenadas  $(x,y)$  interconectadas, onde o arranjo topológico, aliado aos atributos descritivos, serve como identificador de entidades espaciais.

O método *raster* de armazenamento de dados assume que o espaço geográfico pode ser tratado como se fosse uma superfície cartesiana plana, na qual cada pixel ou célula é associado a uma determinada área no espaço mapeado. Assim, a escala ou resolução dos dados *raster* é a relação entre o tamanho do pixel no banco de dados e o tamanho da célula no terreno. Esta característica permite a sobreposição de planos bidimensionais ou *overlays*. Como cada célula neste tipo de arranjo só pode conter um único número, correspondente a um determinado atributo, a sobreposição de camadas acaba sendo um meio agregador de informação de distintos atributos, descritos e mapeados separadamente. A estrutura multidimensional assim resultante está mais próxima de representar o conjunto de informações que compõem o mundo real.

A facilidade de combinar mapas numa estrutura simples de dados, o formato *raster*, tem propiciado significativos progressos na análise espacial. A incorporação de informações inerentes a uma mesma área tem facilitado o aprimoramento de simulações espaciais. Contudo, este método apresenta problemas relativos ao processamento e armazenamento de um volume expressivo de dados, pois requer grande espaço de memória em um computador. Além disto, o modelo *raster* apresenta limitações no tangente à identificação e manipulação de objetos individualmente, como, por exemplo, a representação de rodovias e da rede de drenagem (MENDES & CIRILO, 2001).

Ao contrário do método *raster*, a representação de entidades espaciais por meio do formato vetorial visa a um resultado geometricamente mais próximo da realidade ao considerar as coordenadas espaciais contínuas. O conjunto de pontos, linhas e polígonos característicos desta estrutura, não cobrem áreas, mas apresentam coordenadas interconectadas relacionadas a um dado atributo. Assim, os pontos são representados por um simples par de coordenadas  $x$  e  $y$ , as linhas por um segmento linear obtido a partir de duas coordenadas  $x$  e  $y$ , além do registro do atributo agregado. Redes podem ser descritas através da interconexão de várias linhas, através do auxílio de "nós". Os polígonos apresentam a capacidade de descrever características topológicas de uma referida área, como sua forma, vizinhança e hierarquia, podendo ser manipulado e exibido como um mapa temático (BURROUGH, 1986 *apud* SANTOS, 2000).

A principal vantagem do método vetorial é ser esteticamente mais acessível ao reconhecimento, porque procura representar o objeto tão exatamente quanto possível. Esse ocupa um espaço menor no banco de dados dos sistemas, uma vez que utiliza um número pequeno de pontos comparado ao *raster*. Além disso, propicia uma eficiência maior na descrição de informações topológicas, como na análise de redes e na resolução de gráficos. No entanto, algumas desvantagens igualmente estão associadas a esta estrutura como: de ser mais complexa, de dificultar operações de sobreposição e de não contemplar de forma eficiente a variabilidade espacial (MENDES & CIRILO, 2001).

Analisando-se os dois formatos de dados, fica claro que a representação da realidade sempre incorporará as limitações inerentes à percepção humana e seus recursos. Por conseguinte, a associação conjunta destes métodos de representação acaba somando as vantagens e restringindo as limitações, ao permitir a representação da superfície terrestre no formato mais adequado ao objetivo do estudo.

Depois de adquiridas as imagens espaciais, há a necessidade de processamento destas imagens, antes de efetivamente utilizá-las. O objetivo do processamento digital das imagens é alcançar uma melhor capacidade de discriminação dos alvos.

O processamento de imagens corresponde a: correção ou pré-processamento, realce e classificação. A correção refere-se ao processamento inicial de dados brutos para calibração radiométrica da imagem, correção das distorções geométricas e remoção do ruído. O realce visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos objetos nela presentes. E a classificação é o processo de atribuição de classes aos objetos presentes na

imagem. O objetivo final do processamento é criar uma nova imagem, partindo da imagem original, que aumente a quantidade de informações que podem armazenadas e posteriormente extraídas (MENDES & CIRILO, 2001).

### 2.3.1 MNT

Um Modelo Numérico do Terreno (*MNT*) corresponde a uma representação da variabilidade contínua do relevo. Trata-se de um subproduto do SIG muito utilizado em estudos que exigem a avaliação dos efeitos da topografia na dinâmica de processos naturais, como na análise de bacias hidrográficas, tendo-se em conta os fluxos de matéria e energia inerentes aos fenômenos hidrológicos.

O *MNT* é uma matriz (*raster*) de números que representam a distribuição geográfica de elevações (Figura 2.11). Os *MNT* são derivados de mapas topográficos. Curvas de nível podem ser *escaneadas* (após a leitura com um *scanner*), seguida de um processo de vetorização ou usando uma mesa digitalizadora (MENDES & CIRILO, 2001).



**FIGURA 2.11 – MNT DA BACIA DO RIO TRAMANDAÍ, RS, MALHA DE DISCRETIZAÇÃO CONTÍNUA 30X30M.**

Estes dados vetoriais que representam um arquivo de pontos são transformados no ambiente SIG para o formato *raster*. Após a determinação das dimensões da grade é procedida à interpolação dos dados, resultando em uma matriz, na qual cada célula ou pixel apresenta um

valor para o atributo topográfico considerado. A inserção da rede de drenagem característica da área de estudo, no caso específico da propriedade altitude, torna-se uma informação importante para que o produto gerado seja o mais próximo possível da realidade.

Por meio deste procedimento são determinados os pontos mais baixos da topografia e corrigidas as posições máximas e mínimas, a fim de que o modelo traduza um escoamento contínuo nos talwegues (ABEDNEGO *et al*, 1990 *apud* SANTOS, 2000). Feito o teste e os ajustes, o *MNT* é então produzido na forma 3D, contendo a localização espacial (latitude e longitude) e a propriedade mapeada (altitude ou profundidade).

A partir dos *MNTs* é possível ainda a obtenção de várias informações relativas às características morfológicas de uma determinada área. Desta maneira, através dos programas de SIG, podem ser gerados parâmetros como: orientação (aspecto) e declividade de vertentes, sombreamento, direção do escoamento e remoção das depressões, área acumulada, delimitação de sub-bacias, rede de drenagem, etc. Estas representam importantes informações para a aplicação de modelos hidrológicos.

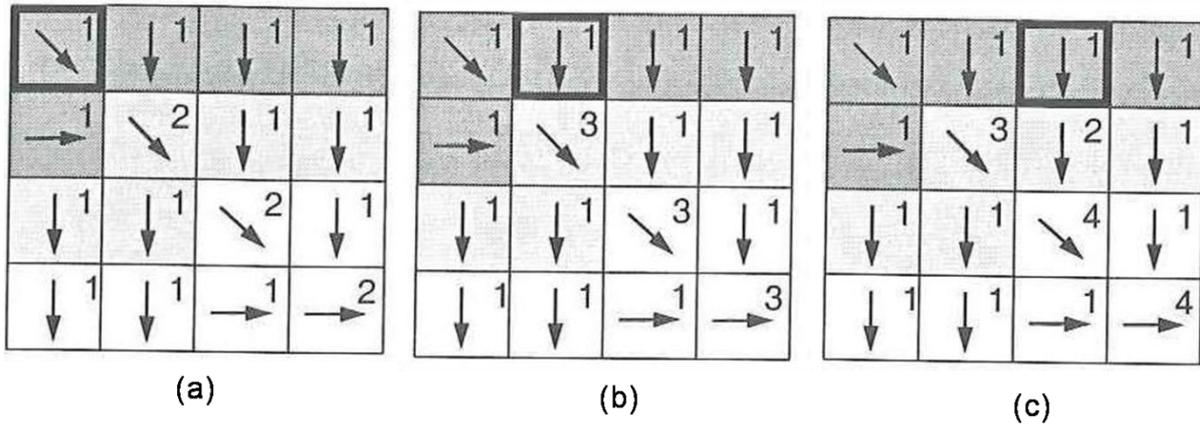
Das informações obtidas do *MNT*, salienta-se a importância da área acumulada. A área acumulada, sob o ponto de vista hidrológico, é uma medida que integra o fluxo superficial e subsuperficial de água a montante de um ponto do terreno. Esta define as sub-bacias e a rede de drenagem, entre outros parâmetros de interesse hidrológico (MENDES & CIRILO, 2001). O algoritmo que comanda o processo de formação da área acumulada é ilustrado na Figura 2.12. Assim, a área acumulada é produzida a partir do somatório das células na direção indicada pelos fluxos, que se dirigem das áreas mais altas (células escuras) para as mais baixas (células claras).

As aplicações do *MNT* são várias, principalmente como dados de entrada para modelos hidrológicos.

## **2.1 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA REGIÃO ESTUARINA**

Os estuários são definidos como corpos de água parcialmente fechados, com abertura para o oceano, onde a água do mar é diluída pela água de origem fluvial. Logo, o estuário é caracterizado por esse processo de mistura. Em qualquer representação do estuário, mesmo que seja visando o comportamento de um poluente que foi introduzido ao mesmo, haverá o processo de mistura, e em qualquer caso, este fenômeno se dá pela combinação de movimentos de natureza macroscópicos (correntes, gerando o movimento advectivo) e por

fluxos simultâneos microscópicos e em pequena escala (processos de difusão molecular ou turbulenta).



**FIGURA 2.12 – ESTIMATIVA DA ÁREA ACUMULADA SEGUNDO ETAPAS CONSECUTIVAS, DE (A) ATÉ (C). A CÉLULA MARCADA INDICA AQUELA CUJO VALOR ESTÁ SENDO CALCULADO. (FONTE: MENDES & CIRILO, 2001).**

Como primeiro e mais simples processo para compreender esse sistema, trata-se do estuário como uma caixa, e posteriormente como sendo unidimensional: a salinidade ou a água doce são utilizadas como traçadores das condições estacionárias.

Para começar o tratamento matemático do estuário, com o processo de mistura, utiliza-se a equação da continuidade (2.1) e a equação da conservação da salinidade (2.2) (MIRANDA *et al.*, 2002). Nas aplicações destas equações, e necessário assumir como dados do problema a geometria do estuário, a descarga fluvial, as condições iniciais e de contorno.

$$\frac{\partial(UA)}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial(S)}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{A} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( AE \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \right) \right] \tag{2.2}$$

Onde  $U$  é a velocidade média da água na seção (Figura 2.13);  $x$  é o comprimento do estuário;  $A$  é a área da seção transversal e  $t$  é o tempo;  $S$  é a salinidade e  $E$  é o coeficiente de dispersão de maré.

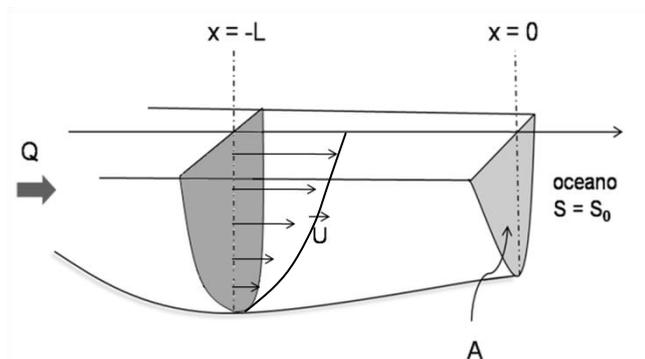
O resultado desta aplicação é a previsão da variação longitudinal discreta e estacionária da salinidade de estuários bem misturados – estuários sem estratificação vertical da salinidade. Ou seja, para a aplicação das equações considera-se (THOMANN & MUELLER, 1987):

- ✓ O estuário é unidimensional<sup>4</sup>;
- ✓ A qualidade da água é descrita como uma condição média de vários ciclos de maré;
- ✓ Área, fluxo e taxas de reações são constantes com a distância;
- ✓ O estuário está em uma condição de estado estacionário<sup>5</sup>.

Nestas condições como  $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$ , ou seja, a área não varia no tempo, a equação da continuidade (2.1) simplifica-se para  $\frac{\partial UA}{\partial x} = 0$ . Assim, a equação da conservação da salinidade (2.2) correspondente passa a ser (MIRANDA *et al.*, 2002):

$$U \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = E \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \right) \quad (2.3)$$

Pois  $UA = \text{constante} = Q$  e  $U = Q/A$ . Onde  $U$  é a velocidade média da água;  $x$  é o comprimento do estuário;  $S$  é a salinidade e  $E$  é o coeficiente de dispersão de maré.



**FIGURA 2.13 – REPRESENTAÇÃO UNIDIMENSIONAL DO ESTUÁRIO. X = -L E X = 0 CORRESPONDEM AO LIMITE INTERIOR E A BOCA DO ESTUÁRIO, RESPECTIVAMENTE. U É A VELOCIDADE MÉDIA DA COLUNA D'ÁGUA.**

Como a geometria e a descarga fluvial  $Q$  são dados do problema, a solução desta equação para determinar a incógnita  $S=S(x)$  depende da imposição de condições de contorno adequadas e do conhecimento do coeficiente de dispersão de maré  $E$ . Como, por hipótese, a distribuição de salinidade é estacionária, deve-se sempre considerar que esta solução representa valores médios de salinidade durante ciclos completos de maré.

A equação 2.3 deve ser integrada em relação a um sistema de coordenadas com  $Ox$  orientado positivamente estuário abaixo,  $x = -L$  e  $x = 0$  correspondem ao limite interior da zona de

<sup>4</sup> Um estuário é considerado unidimensional quando, submetido a correntes reversas, apenas o gradiente longitudinal de um determinado parâmetro de qualidade da água é assumido como dominante. Fonte: THOMANN & MUELLER (1987).

<sup>5</sup> Neste caso não há mudanças de fluxo entre qualquer entrada de efluentes ou tributários. O fluxo dentro e fora do corpo de água devido a efeitos da água subterrânea é excluído. Magnitudes de entradas de resíduos e fluxos são temporariamente invariáveis. Fonte: THOMANN & MUELLER (1987).

mistura da água doce e água salina e a boca do estuário (Figura 2.13), respectivamente. Com esta orientação o componente de velocidade gerado pela descarga fluvial é positivo.

Em  $x = -L$  a salinidade e o produto  $E \cdot \frac{dS}{dx}$  são iguais a zero e a constante de integração também é nula. A solução da equação diferencial 2.3 é:

$$S(x) = S_0 \cdot \exp\left(\frac{U}{E} \cdot x\right) \quad (2.4)$$

Onde  $S$  é a salinidade a  $x$  de distância do oceano,  $U$  é a velocidade média da seção,  $E$  é o coeficiente de dispersão de maré, e  $x$  é a distância do oceano.

Esta solução é determinada com as seguintes condições de contorno: a salinidade na boca do estuário é igual à salinidade da região costeira adjacente  $S(0) = S_0$  (constituindo a única fonte de sal); e o estuário é suficientemente longo ( $L \rightarrow \infty$ ) para que  $S(-\infty) \approx 0$ . Como  $x > 0$  e  $U > 0$ , essa solução indica que a salinidade decresce exponencialmente do valor  $S_0$  na boca do estuário até o valor muito próximo de 0 na cabeceira (limite interior do estuário).

Na solução da equação 2.4, permanece ainda, como quantidade física indeterminada, o coeficiente de dispersão de maré, teoricamente dado pela correlação das flutuações turbulentas de velocidade e salinidade. Entretanto, a ordem de grandeza desse coeficiente pode ser estimada conhecendo o comprimento do estuário (distância entre a boca e a cabeceira). Considerando as quantidades envolvidas para calcular o  $E$ , verifica-se que depende principalmente da descarga fluvial e da geometria do estuário (área da seção transversal e comprimento).

Thomman & Mueller (1987) sugerem três métodos para calcular o  $E$ :

- ✓ A salinidade como traçador da mistura de maré;
- ✓ Uso de um corante lançado como traçador;
- ✓ Teoria hidrodinâmica incorporando a velocidade de cisalhamento e mecanismos de difusão de sais.

Considerando os dados disponíveis numa região estuarina, o parâmetro da salinidade como traçador da área de influência da maré é o método mais usual:

$$E = U(x_2 - x_1) \div \ln(S_2 - S_1) \quad (2.5)$$

Onde  $U$  é a velocidade do advectiva líquida;  $x$  é a distância do oceano e  $S$  é a salinidade.

Assim, com dados de salinidade em vários pontos do estuário, plota-se salinidade vs. distância numa escala semilogarítima. Alternadamente, selecionam-se dois pontos  $(s_1, x_1)$  e  $(s_2, x_2)$  na exata linha que melhor representa os dados de salinidade na escala semilog. Com estes pontos aplica-se a equação 2.5 e acha-se o  $E$ . Usa-se  $x_1$  sempre mais próximo do oceano. À distância  $x$  será positiva na direção do fluxo, ou seja, na direção do oceano.

Para exemplificar a aplicação da equação 2.4, parâmetros foram criados para um estuário hipotético (Tabela 2.6). Estes parâmetros foram determinados tendo como base as características hidrológicas do sistema estuarino do Rio Tramandaí – RS (vazão de água doce e influência da maré), entretanto, sem o intuito de representar este sistema mas estabelecer parâmetros que apresentem significado físico para validação da equação 2.4. Com esses dados foi simulada a dinâmica da salinidade nesse estuário hipotético.

**TABELA 2.6 – PARÂMETROS DO ESTUÁRIO HIPOTÉTICO**

PARÂMETRO	VALOR
Área do Estuário	2km <sup>2</sup>
Profundidade média	1m
Largura do estuário	200m
Vazão afluyente	35m <sup>3</sup> /s
Coefficiente dispersão de maré	150m <sup>2</sup> /s

Assim, com base nestes dados, deseja-se determinar a quantos metros da boca do estuário a salinidade atinge 0,5‰. Utilizando a equação 2.4:

- ✓  $S = 0,5‰$ ;
- ✓  $S_0$  (salinidade na foz do estuário) = 35‰;
- ✓  $U = Q / A$ ;  $A =$  profundidade x largura; então  $U = 35 / (1 \times 200) = 0,175\text{m}^2/\text{s}$  ;
- ✓  $E = 150\text{m}^2/\text{s}$

$$0,5 = 35 \cdot \exp\left(\frac{0,175 \cdot x}{150}\right)$$

$$x = -3641,57$$

Logo, este  $x$  representa o  $-L$ , da figura 2.13, e corresponde à influência da salinidade ou o comprimento do estuário.

Numa situação como esta, se a vazão  $Q$  diminuir, devido a, por exemplo, aumento na demanda de água na bacia ou diminuição da precipitação, pode-se simular qual será o efeito

desta variação no comprimento do estuário, ou seja, como a área de influência da salinidade aumentará em virtude de uma diminuição na vazão de água doce.

Assim, se na situação hipotética acima houver uma demanda por água de  $20\text{m}^3/\text{s}$ , a vazão afluyente fica  $Q = 35 - 20 = 15\text{m}^3/\text{s}$ , e  $U = 15 / (1 \times 200) = 0,075\text{m}^2/\text{s}$ . Logo:

$$0,5 = 35 \cdot \exp\left(\frac{0,075 \cdot x}{150}\right)$$

$$x = -8497,00\text{m}$$

Então, acrescentando demanda de água de  $20\text{m}^3/\text{s}$  a influência da salinidade aumenta 133,33% e a área de influência da salinidade passa a ser até 8.497m adentro do continente. Neste caso, observa-se que uma demanda adicional de água altera a configuração do balanço de salinidade na área estuarina, acarretando impactos ambientais nesta região.

Medidas de controle e gestão podem ser aplicadas numa situação como essa, estabelecidos com base na representação e no funcionamento do estuário, para evitar possíveis consequências indesejáveis e/ou potencializar efeitos benéficos.

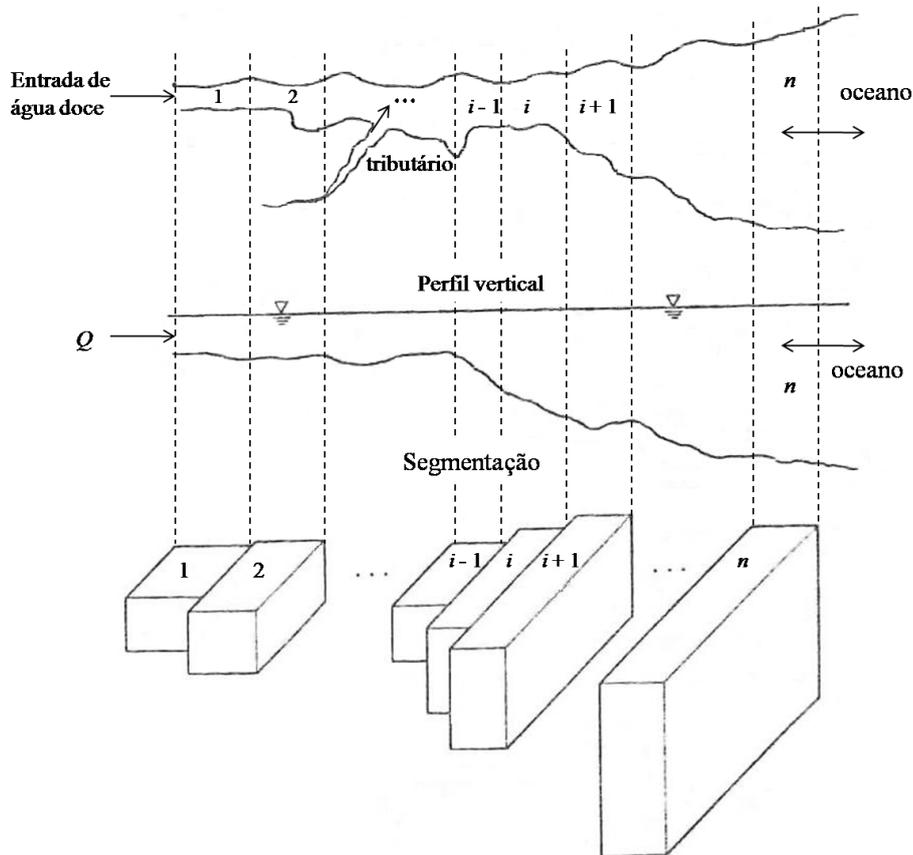
## 2.2 MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA

O entendimento das diluições de água doce e água salgada é a etapa inicial do processo de gestão / gerenciamento integrado. Essa dinâmica de salinidade pode ser determinada através de conceitos sobre modelagem da qualidade de água em estuários. A modelagem é baseada na representação matemática do estuário (acima descrita).

A premissa básica, expressa na representação matemática, é que o fluxo de água doce de montante entra no estuário diluindo a concentração de salinidade proveniente do oceano (à jusante). Este processo é explicado pela equação 2.4.

Entretanto, este estuário ideal utilizado para a representação matemática explicitada no item 2.4, com seção transversal, vazão e profundidade constante, raramente é encontrado na natureza. Num contexto de compreensão da dinâmica de um ambiente natural, estas simplificações não são apropriadas. Segundo Thomann & Mueller (1987), um procedimento simples aproxima esse estuário ideal no estuário real que se está querendo analisar: dividir o estuário numa série de segmentos, em cada qual é aplicado à equação 2.4, assumindo que não há um gradiente de salinidade significativo dentro de cada segmento. Figura 2.14 ilustra essa divisão do estuário. Essa abordagem essencialmente segue a aproximação numérica de

diferenças finitas. Assim, a concentração de uma substância, que pode ser a salinidade, é calculada para o centro de cada segmento. O comprimento de cada segmento deve ser compatível com o gradiente da substância, no caso a salinidade.



**FIGURA 2.14 – REPRESENTAÇÃO DO ESTUÁRIO, O PERFIL VERTICAL DESTES E A SEGMENTAÇÃO DO ESTUÁRIO.**

(FONTE: THOMANN & MUELLER, 1987).

Para desenvolver o balanço de massa num segmento  $i$ , da Figura 2.14, são necessários quatro componentes (THOMANN & MUELLER, 1987):

- ✓ Transporte da substância  $S$  devido ao fluxo advectivo;
- ✓ Transporte de massa devido à dispersão de maré e gradiente de densidade, ou seja, devido ao fluxo dispersivo;
- ✓ Perdas de massa devido ao decaimento;
- ✓ Fontes externas ou sumidouros de  $S$ .

Sabe-se que o transporte de volume ou de massa de uma determinada substância é igual ao volume e a massa que passa, por unidade de tempo, através de uma seção transversal. Para determinar a taxa de variação da concentração desta substância é necessário conhecer a

velocidade média da água nesta seção e a sua densidade. Como o campo de velocidade numa seção transversal é bastante variável, de aproximadamente zero no fundo, até o valor máximo próximo à superfície, utiliza-se como velocidade média a velocidade a 0,6 da profundidade (MIRANDA *et al.*, 2002).

Assim, conhecendo a velocidade, para determinar o transporte e o fluxo de uma determinada substância em um estuário, considera-se um estuário como uma *caixa preta* que bombeia sal estuário acima contra o movimento médio do rio (HUNKINS, 1981 *apud* MIRANDA *et al.*, 2002), pois o processo de mistura estuarino é determinado pela variação da salinidade.

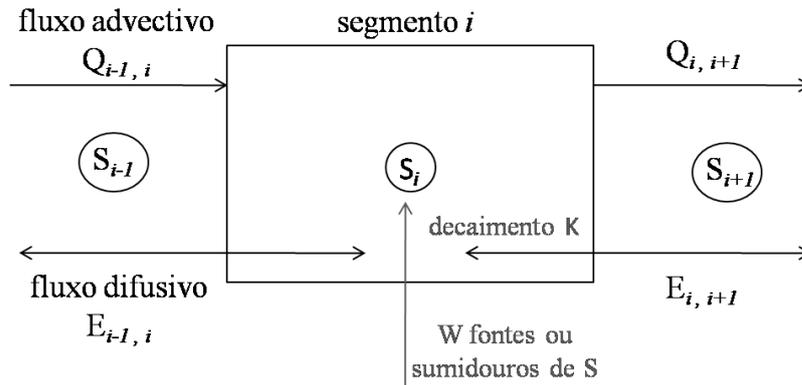
Dentre os processos que geram o fluxo de sal estuário acima está a difusão turbulenta longitudinal e a advecção. A difusão turbulenta contribui apenas com uma pequena escala, sendo dominantes os processos advectivo horizontal e a difusão vertical, esta relacionada às correntes de maré. O termo *dispersão* foi introduzido para denotar o transporte de sal estuário acima e no sentido contrário ao transporte advectivo. Sendo assim, o processo de mistura e transporte de sais num estuário é composto por uma parcela *advectiva*, que corresponde à ação da água doce de origem fluvial, e uma parcela *dispersiva*, que corresponde à mistura estuarina e engloba tanto a ação da maré (oceano) como a própria parcela advectiva fluvial (MIRANDA *et al.*, 2002).

Compreendendo este processo, pode-se determinar a variação de qualquer substância em um estuário. Se a substância em questão não for conservativa, como a DBO<sub>5</sub> ou o nitrato, a concentração de massa desta sofrerá decaimento natural, ou seja, processos químicos diminuirão naturalmente a concentração em uma taxa  $K$ . Se a substância for conservativa, não tendo perdas devido ao decaimento, o valor de  $K$  é nulo.

Num estuário também pode haver entrada ou retirada da substância em questão, através de fontes pontuais, determinadas. Na maioria dos casos, há fontes externas e não sumidouros (saídas). Por exemplo, se a substância em questão for a DBO<sub>5</sub>, e houver uma fábrica de pescados nas margens do estuário. O descarte de matéria orgânica desta fábrica pode aumentar a concentração da DBO<sub>5</sub>, sendo está, portanto, uma fonte externa.

Por ser a salinidade uma substância conservativa e que não possui fontes externas ou sumidouros, não se considera na representação o decaimento e as fontes/sumidouros.

Na Figura 2.15 é exemplificado o balanço de massa para um segmento do estuário. Na situação real, o balanço é feito para cada segmento  $i$ , considerando a influência dos segmentos à esquerda e à direita ( $Q_{i-1}$  e  $Q_{i+1}$ ).



**FIGURA 2.15 – NOTAÇÃO DE UM SEGMENTO DO ESTUÁRIO, COMO UTILIZADO EM MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA. EM CINZA OS FATORES QUE NÃO SÃO CONSIDERADOS QUANDO A SUBSTÂNCIA É A SALINIDADE (FONTE: THOMANN & MUELLER, 1987).**

Assim, primeiramente considera-se o fluxo que entra e sai do segmento  $i$  devido ao fluxo advectivo líquido, de origem fluvial. A entrada de massa do segmento  $i$ , e que corresponde à parte superior esquerda da Figura 2.15, é:

$$+Q_{i-1,i} \cdot S_{i-1,i} = +Q_{i-1,i} \cdot S_{i-1} \quad (2.6)$$

Onde  $S_{i-1,i}$  é a concentração na interface entre  $i-1$  e  $i$ . Esta concentração pode ser aproximada à concentração no centro do segmento  $i-1$ .

Analogamente, o transporte advectivo saindo do segmento  $i$ , e corresponde à parte superior direita da Figura 2.15, é:

$$-Q_{i,i+1} \cdot S_{i,i+1} = -Q_{i,i+1} \cdot S_i \quad (2.7)$$

Adotando a mesma aproximação acima para a concentração da interface de saída. O sinal negativo significa o fluxo que está saindo.

A troca de massa devido aos processos difusivos (dispersão e densidade) indica que o transporte de massa é diretamente proporcional à diferença de concentração entre os segmentos adjacentes. Assim, a troca de massa devido à dispersão, no segmento à montante:

$$+E_{i,i-1}(S_{i-1} - S_i) \quad (2.8)$$

Onde  $E$  é o coeficiente de dispersão de maré.

A equação similar para o segmento à jusante é:

$$+E_{i+1,i}(S_{i+1} - S_i) \quad (2.9)$$

Perdas de massa devido a processos de decaimento:

$$-K_i V_i S_i \quad (2.10)$$

Onde  $K_i$  é o coeficiente de decaimento para o segmento  $i$  e  $V_i$  é o volume do segmento  $i$ . Finalmente, outras fontes ou sumidouros de  $S$  no segmento  $i$  são designados por:

$$\pm W_i \quad (2.11)$$

A soma das massas das equações 2.6 até 2.10 devem ser iguais à razão da variação de massa no segmento  $i$ ,  $M_i$ , que é:

$$\frac{dM_i}{dt} = \frac{d(V_i S_i)}{dt} \approx V_i \cdot \frac{dS_i}{dt} \quad (2.12)$$

Para  $M_i = V_i S_i$  e onde a aproximação assume que o volume do segmento  $i$  não varia no tempo. Assim o balanço de massa completo fica:

$$V_i \cdot \frac{dS_i}{dt} = Q_{i-1,i} \cdot S_{i-1} - Q_{i,i+1} \cdot S_i + E_{i-1,i} \cdot (S_{i-1} - S_i) + E_{i+1,i} \cdot (S_{i+1} - S_i) - K_i V_i S_i \pm W_i \quad (2.13)$$

Simplificando a equação 2.13 para a salinidade, que é uma substância conservativa e não considera os termos em cinza (de decaimento e de fontes e sumidouros), resulta-se em:

$$V_i \cdot \frac{dS_i}{dt} = Q_{i-1,i} \cdot S_{i-1} - Q_{i,i+1} \cdot S_i + E_{i-1,i} \cdot (S_{i-1} - S_i) + E_{i+1,i} \cdot (S_{i+1} - S_i) \quad (2.14)$$

A equação 2.14 é uma aproximação numérica da equação 2.2, que representa a conservação da salinidade, que mostra claramente os componentes de transporte de massa entorno do segmento  $i$ . Como o estuário ideal é considerado como sendo estacionário, ou seja, as reações que nele ocorre são constantes no tempo,  $V_i \cdot \frac{dS_i}{dt} = 0$ , assim a equação 2.14 se torna uma simples equação algébrica (equação 2.15). Existirão  $n$  equações, conforme o número de segmentos do estuário, ou seja:

$$0 = Q_{i-1,i} \cdot S_{i-1} - Q_{i,i+1} \cdot S_i + E_{i-1,i} \cdot (S_{i-1} - S_i) + E_{i+1,i} \cdot (S_{i+1} - S_i) \quad (2.15)$$

Deve-se dar atenção especial para o primeiro e o último segmento, que representam segmentos de fronteira, com o rio (água doce) e o mar, respectivamente. No caso do primeiro segmento, o termo  $E_{i-1,i} \cdot (S_{i-1} - S_i)$  é nulo, pois se considera que a troca entre este e o segmento superior (rio, corpo de água doce) é nula, apenas há entrada de vazão do segmento superior neste. No último segmento, consideram-se todos os termos da equação 2.15 com a particularidade que o segmento inferior a esse é o oceano, com a concentração inicial ( $S_0$ ) de 35‰, e com o qual há trocas (Figura 2.16).

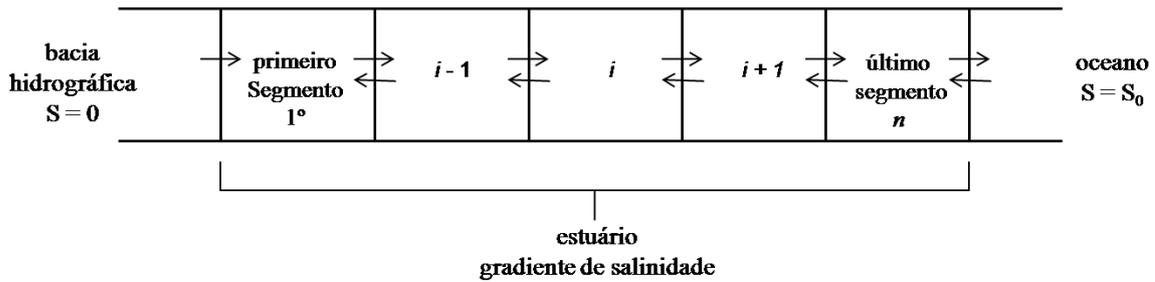


FIGURA 2.16 – OS SEGMENTOS UTILIZADOS NUM MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA.

No cálculo da concentração da substância  $S$ , a salinidade, para um estuário com área variável no espaço, profundidade e fluxo, há uma simples solução de  $n$  equações algébricas lineares, correspondente aos  $n$  segmentos, facilmente resolvidas com o uso de computadores.

Na aplicação destas equações num software, as equações obtidas são manipuladas algebricamente para prover a entrada no computador. Assim, os termos  $S_{i-1}$ ,  $S_i$  e  $S_{i+1}$  da equação 2.15 são agrupados no lado esquerdo da equação:

$$(-Q_{i-1,i} - E_{i-1,i}) \cdot S_{i-1} + (Q_{i,i+1} + E_{i-1,i} + E_{i,i+1}) \cdot S_i + (-E_{i+1,i}) \cdot S_{i+1} = 0 \quad (2.16)$$

Adotando:

$$a_{i,i-1} = -Q_{i-1,i} - E_{i-1,i} \quad (2.16a)$$

$$a_{i,i} = Q_{i,i+1} + E_{i-1,i} + E_{i,i+1} \quad (2.16b)$$

$$a_{i,i+1} = -E_{i+1,i} \quad (2.16c)$$

Obtém-se:

$$a_{i,i-1} \cdot S_{i-1} + a_{i,i} \cdot S_i + a_{i,i+1} \cdot S_{i+1} = 0 \quad (2.17)$$

Que representa a equação geral para cada  $i$  segmento. Entretanto, o último segmento possui uma entrada de salinidade, pois é o limite com o oceano.

Assim, o conjunto de  $n$  equações correspondentes aos  $n$  segmentos da Figura 2.16, para ser resolvida assume a forma (THOMANN & MUELLER, 1987):

$$\begin{aligned}
 & a_{11} \cdot S_1 + a_{12} S_2 + 0 + \dots + 0 = 0 \\
 & a_{21} \cdot S_1 + a_{22} \cdot S_2 + a_{23} \cdot S_3 + 0 + \dots + 0 = 0 \\
 & 0 + a_{32} \cdot S_2 + a_{33} \cdot S_3 + a_{34} \cdot S_4 + 0 + \dots + 0 = 0 \\
 & \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 & 0 + \dots + 0 + a_{n,n-1} \cdot S_{n-1} + a_{nn} \cdot S_n = W'_n
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Onde os coeficientes  $a_{ij}$  são dados pelas equações 2.16, e o  $W'_n$  corresponde à entrada de sais provenientes do oceano no limite exterior do estuário.

O conjunto das equações 2.18 é resolvido expressando estas equações na forma uma multiplicação escalar de matrizes: uma dos coeficientes  $a_{ij}$  (matriz  $A$ ), sendo uma matriz  $n \times n$ ; e outra das salinidades dos segmentos  $S_n$ , sendo  $n \times 1$ ; igualadas a matriz nula  $n \times 1$ :

$$\begin{pmatrix}
 a_{11} & a_{12} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\
 \cdot & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & \cdot & 0 \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & a_{n,n-1} & a_{n,n}
 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ S_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ W'_n \end{pmatrix} \tag{2.19}$$

A solução do vetor  $S$ , da equação 2.19, é determinada pela inversão da matriz  $A$ :

$$(S) = [A]^{-1} \cdot (0) \tag{2.20}$$

Para determinar a distribuição da salinidade em um estuário unidimensional e em condições estacionárias, com parâmetros variáveis espacialmente, se reduz a resolução de  $n$  equações algébricas (equações 2.18) ou invertendo uma matriz  $n \times n$  (equação 2.20).

A matriz  $A$  tem uma forma especial considerando um estuário unidimensional. Esta é conhecida como uma matriz triangular, onde apenas a diagonal principal e as diagonais imediatamente superior e inferior à diagonal principal aparecem na matriz. Todos os outros elementos são nulos. Esta característica permite que os programas computacionais resolvam rapidamente a matriz inversa  $[A]^{-1}$ . Aplicando a inversão da equação 2.20 a matriz 2.19, o resultado fica:

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ \cdot \\ S_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a'_{1,n} \cdot W_n' \\ a'_{2,n} \cdot W_n' \\ a'_{3,n} \cdot W_n' \\ \cdot \\ a'_{n,n} \cdot W_n' \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Sendo  $a'$  os componentes da matriz inversa  $[A]^{-1}$ ,  $[S]$  o vetor salinidade dos segmentos e  $W_n'$  a componente da salinidade que entra no estuário devido à maré.

### 2.3 INTEGRAÇÃO MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA E SIG

A análise dos problemas do ambiente é realizada através do entendimento dos processos físicos, econômicos e/ou sociais que interagem no mesmo. Estes processos são simulados através de modelos, com o propósito de verificar cenários, estratégias de planejamento e desenvolvimento de regiões.

Para caracterização dos estuários utiliza-se a modelagem já citada. Contudo, poucos destes modelos possuem capacidade de análise e apresentação de dados geográficos. Ao considerarmos o geoprocessamento, que representa os dados geográficos, há pouca capacidade de modelagem de processos temporalmente. Observam-se claramente os benefícios que são alcançados através do uso conjunto de geoprocessamento e de modelos ambientais, obtendo assim, os dados geográficos locais e a simulação de possíveis condições para o mesmo local (MENDES & CIRILO, 2001).

Supondo que os limites do estuário são representados por um polígono, os fluxos de água para montante e para jusante que podem estar ocorrendo são definidos pelo volume que pode ser construído projetando-se verticalmente as linhas que compõem os limites do polígono na atmosfera, até a profundidade do corpo hídrico (daí a necessidade do conhecimento da

batimetria do corpo) e na superfície. Esse volume é chamado *volume de controle* e as superfícies que o cercam, *superfícies de controle*. A construção de um modelo hidrológico se dá basicamente pela utilização de equações que relacionam as taxas de mudanças nas propriedades da água no volume de controle ao fluxo dessas propriedades através das superfícies de controle (MAIDMENT, 1993).

Para integrar os modelos hidrológicos com o geoprocessamento, quatro passos são necessários (SATO *et al.*, 2000). Primeiramente, deve haver a organização dos dados espaciais necessários para a simulação, como hidrografia, rede de drenagem, topografia, etc. Estes dados são digitalizados e armazenados num *software* de geoprocessamento, como diferentes *layers* (*raster* ou *vector*), uma para cada atributo. O próximo passo é criar um banco de dados para o local de estudo, com itens como precipitação, evapotranspiração, vazão do rio ou estuário, e dados de qualidade de água, que são armazenados em forma de tabelas. O terceiro passo é integrar o SIG com os dados temporais, através de um modelo integrado, que opere em interface GIS. Este processo ocorre no próprio *software*, onde os parâmetros espaciais necessários para a simulação são obtidos na tabela de atributos das camadas (*layers*), e transformados num arquivo de entrada para o modelo. Os dados temporais, armazenados em tabelas, também são processados e transformados em arquivos de entrada para o modelo. Finalmente, a qualidade e a quantidade de água em um corpo hídrico (como um estuário) podem ser simuladas de acordo com vários cenários (Figura 2.17).

Vários modelos já utilizam esta interface de integração, com vários propósitos. Um modelo largamente difundido é o *QUALI2E*, que integra SIG e qualidade de água, para simular espacialmente até 15 parâmetros associados à qualidade de água, como oxigênio dissolvido, DBO<sub>5</sub>, coliformes, pH, etc., além da possibilidade de introduzir até três parâmetros conservativos arbitrários e um não conservativo. O modelo é aplicável em rios ramificados e bem misturados, e utiliza uma solução de diferenças finitas para a equação de transporte de massa unidimensional. A representação espacial é como um sistema ramificado, onde o curso d'água em estudo é segmentado em trechos com características hidráulicas semelhantes (CHAPRA *et al.*, 2003 *apud* ZORZAL *et al.*, 2009).

Outro modelo é o *BASIN* (*Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources*), desenvolvido em 1994 pela EPA (*Environmental Protection Agency*) dos EUA, que integra dados espaciais, de qualidade de água e ferramentas de avaliação através de SIG. A particularidade deste modelo é que, além de obter, através do SIG, os dados de hidrografia e topografia, este integra um banco de dados socioeconômicos e ambientais, e também outros

modelos, como o *QUAL2E*, numa interface simples. Este modelo foi desenvolvido para ser utilizado por agência regionais, estaduais e locais nos EUA, como a *U.S. Army Corps of Engineer's*.

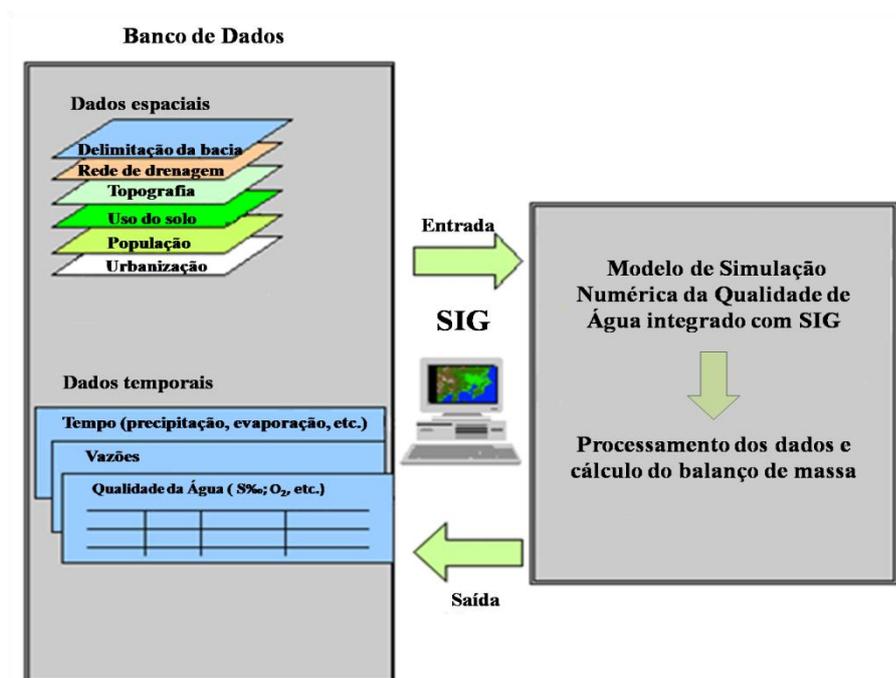


FIGURA 2.17 – RESUMO DO PROCESSO DE INTEGRAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA E O SIG.

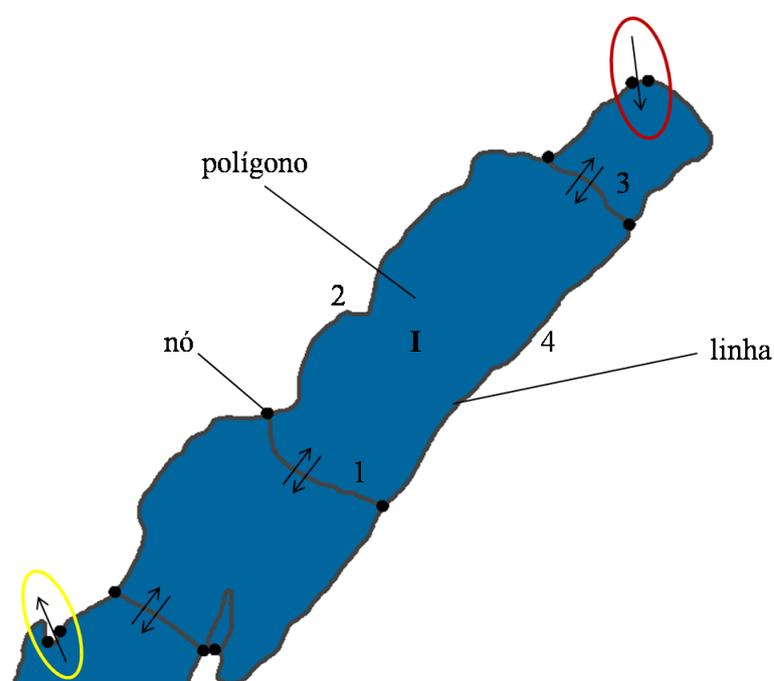
Hellweger (1997), desenvolveu o modelo BALANCE, que integra qualidade de água e SIG, para o cálculo de balanço de massa no estário da Baía de Corpus Christi, no Texas, EUA. Este modelo pode ser aplicado em qualquer ambiente estuarino, bastando obter os dados de entrada específicos do local de interesse. Além disso, este modelo pode calcular o balanço de massa para a salinidade, sendo útil para representar essa dinâmica e a relação entre a bacia e a zona costeira. A seguir este modelo é descrito mais detalhadamente.

### 2.3.1 BALANCE

Hellweger (1997) baseado em Thomann & Mueller (1987) e nas equações dos itens 2.5 e 2.6, propôs o programa BALANCE, para ser rodado em ambiente de SIG. O sistema computa um balanço de salinidade usando um algoritmo explícito de diferenças finitas e foi escrito em linguagem Avenue do *software* ArcView. As equações utilizadas pelo BALANCE são as mesmas expostas nos modelos de qualidade de água em estuários do item 2.6.

Os dados de entrada do sistema consistem na topologia do sistema, através de um conjunto de linhas e polígonos em formato *shapefile*, resultado da digitalização de cartas topográficas da hidrografia do local de estudo.

Os polígonos representam os segmentos que dividem o corpo hídrico a ser modelado. As linhas são as interfaces que dividem os polígonos (Figura 2.18), e são definidas entre um nó e outro. Estas podem ser os limites do corpo hídrico com a terra (número 2 e 4 da Figura 2.18), o limite entre segmentos (polígonos) do corpo hídrico (número 1 e 3 da Figura 2.18), o limite do corpo hídrico com um rio (entrada de água) (círculo em vermelho da Figura 2.18) ou um ponto de retirada de água do corpo hídrico (círculo em amarelo da Figura 2.18).



**FIGURA 2.18 – EXEMPLO DE LINHAS, POLÍGONOS E NÓS UTILIZADOS NO PROGRAMA BALANCE. O POLÍGONO I COM AS LINHAS QUE O DEFINEM: 2 E 4 DELIMITAÇÃO DO CORPO HÍDRICO COM A TERRA, 1 E 3 LINHAS DE FRONTEIRA ENTRE OS POLÍGONOS. EM VERMELHO A LINHA QUE REPRESENTA A ENTRADA DE UM RIO, E EM AMARELO A LINHA QUE REPRESENTA UMA CAPTAÇÃO DE ÁGUA.**

As linhas de interface entre os segmentos (polígonos), são definidas em função da batimetria do corpo hídrico, de forma a obter um segmento (polígono) com seção transversal aproximadamente constante. Para cada polígono é calculado o balanço de massa, considerando os fluxos de entrada e saída através das linhas (de interface entre polígonos, entradas ou captação de água). Para cada polígono, determina-se o seu volume de água ( $v$ ), que é função da seção transversal, o comprimento do segmento e a concentração inicial da substância ( $so$ ), que são dados sem os quais a simulação não funciona. Se for o caso,

dependendo da substância em análise (conservativa ou não-conservativa, com fontes externas ou não), pode-se também informar dados de taxa de decaimento (**k**), cargas difusa (**wnp**), atmosférica (**wat**), sedimentar (**wse**) ou outras fontes (**wot**).

O comprimento e a largura dos polígonos são determinados a partir de cartas topográficas. Para ajustar o volume do segmento, utiliza-se os dados da batimetria do corpo hídrico para compor uma imagem *raster*. Também são criadas imagens *raster* dos dados de precipitação e de evapo-transpiração em unidade de fluxo ( $m^3/s$ ), a fim sobrepor-las os dados batimétricos para determinar a profundidade média de cada polígono. Com a profundidade média, comprimento e largura de cada polígono, facilmente obtém-se o volume correspondente.

Definidas as linhas que dividem os segmentos do corpo hídrico e que fazem limite com a terra, determina-se onde estão entrando rios e córregos ou onde há fontes de captação de água, criando estas linhas. Nas linhas, pode-se modificar a vazão afluente ou efluente, aumentando ou diminuindo o fluxo de um rio no corpo hídrico em questão, aumentando ou diminuindo a demanda de água. Além do fluxo (**q**), que pode ser positivo ou negativo, outro dado de entrada para as linhas, necessário para a simulação, é o coeficiente de dispersão de carga (**ep**). Este representa o fluxo dispersivo, ou seja, o processo de mistura de uma substância na água. No caso da substância analisada ser a salinidade, este é o coeficiente de dispersão de maré, que representa a mistura entre a água doce (fluxo advectivo) e a água salgada, tendo duas componentes, uma do fluxo continental e outra do fluxo da maré. Se a linha limita o próprio corpo hídrico, ou seja, não é linha de interface entre os polígonos, é necessário também o dado de concentração da substância na fronteira (**sb**).

Na tabela 2.7 são sintetizados os dados de entrada do BALANCE, separados por linha e por polígono. O tempo (**deltat**) é estipulado antes da simulação. Hellweger (1997) sugere que seja utilizado um delta t de 24 ou 12 horas.

Os dados de saída do BALANCE representam o balanço de massa para uma determinada substância. O principal resultado deste balanço se para os polígonos, que é a concentração deste, após a simulação. A concentração de cada polígono após a simulação mostra como é o comportamento da substância, que entra no sistema num determinado ponto e se difunde gradativamente pelos segmentos.

Para os polígonos, os dados de saída são (Tabela 2.8), além da concentração (**s**), a carga advectiva (**wad**) e a carga difusiva (**wdi**). Estas cargas correspondem efetivamente ao que entrou da substância em questão no segmento devido ao transporte advectivo e difusivo.

**TABELA 2.7 – VARIÁVEIS DE ENTRADA UTILIZADAS NO SOFTWARE BALANCE E AS UNIDADES UTILIZADAS PARA CADA UMA NO SISTEMA INTERNACIONAL (SI).**

	<b>VARIÁVEIS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>SI</b>
	<b>deltat</b>	Tempo [T]	s
	<b>so</b>	Concentração[M/V]	mg/L
	<b>v</b>	Volume [L <sup>3</sup> ]	m <sup>3</sup>
	<b>k</b>	Coefficiente de decaimento [1/T]	1/dia
<b>POLÍGONO</b>	<b>wnp</b>	Carga não pontual [M/T]	kg/dia
	<b>wat</b>	Carga atmosférica [M/T]	kg/dia
	<b>wse</b>	Carga sedimentar [M/T]	kg/dia
	<b>wot</b>	Outras fontes [M/T]	kg/dia
	<b>q</b>	Fluxo [L <sup>3</sup> /T]	m <sup>3</sup> /s
<b>LINHAS</b>	<b>sb</b>	Concentração na fronteira dos segmentos [M/V]	mg/L
	<b>ep</b>	Coefficiente de dispersão de carga [L <sup>2</sup> /T]	m <sup>3</sup> /s

(FONTE: HELLWEGER, 1997).

Para as linhas, os dados de saída compreendem o fluxo difusivo (**fad**) e o fluxo advectivo (**fdi**). Estes fluxos representam o quanto da substância passa através das linhas devido do transporte advectivo e difusivo.

**TABELA 2.8 – DADOS DE SAÍDA DO BALANCE, SEPARADOS POR POLÍGONOS E LINHAS.**

	<b>VARIÁVEIS</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>SI</b>
<b>POLÍGONO</b>	<b>s</b>	Concentração [M/V]	mg/L
	<b>wad</b>	Carga advectiva [M/T]	kg/dia
	<b>wdi</b>	Carga difusiva [M/T]	kg/dia
<b>LINHAS</b>	<b>fad</b>	Fluxo advectivo de massa [M/T]	m <sup>3</sup> /s
	<b>fdi</b>	Fluxo difusivo de massa [M/T]	m <sup>3</sup> /s

(FONTE: HELLWEGER, 1997).

### 3. METODOLOGIA

Para a problemática da disponibilidade de água doce numa região estuarina – costeira, o primeiro passo delimitado por UNEP/MAP/PAP (1999) é compreender o sistema. Neste trabalho preconiza-se que o entendimento do sistema bacia – estuário – zona costeira se dá através da dinâmica da salinidade na região estuarina. Como ferramenta necessária para compreender a dinâmica da salinidade, pode-se utilizar as equações do balanço de massa para a salinidade, através de um modelo de qualidade de água integrado do SIG, como o BALANCE, já citado no capítulo 2.

Os modelos integrados descrevem o ambiente espaço-temporalmente, além de servirem como base para a simulação de possíveis cenários, onde as condições originais mudam, podendo causar danos ou benefícios, ao meio ambiente e as atividades antrópicas a esse relacionado.

Os cenários são extremamente úteis para a gestão ambiental, pois visam prever situações futuras. Com base no conhecimento das possíveis consequências da ação humana ou de mudanças climáticas, medidas baseadas em subsídios técnicos podem ser tomadas para mitigar ou compensar efeitos adversos e amplificar resultados positivos.

Os subsídios técnicos permitem o tomador de decisão escolher uma opção de ação a ser tomada, entre várias outras, de maneira racional e consciente. Estas opções devem ser baseadas nas políticas existentes, nos recursos disponíveis, e nas consequências dos impactos sociais, ambientais e econômicos.

Neste último ponto em particular, salienta-se que é o foco desta dissertação. A arte da gestão ambiental é conhecer os elementos disponíveis na “caixa de ferramentas”, selecioná-los, ajustar e aplicar a mistura de ferramentas apropriadas para as circunstâncias dadas (NIELS *et al.*, 2002). Na realidade brasileira, os subsídios técnicos devem ser determinados com base na legislação – PNRH e PNGC, para que não haja controvérsias sobre a sua legitimidade.

Assim, observado a estrutura geral do presente trabalho (Figura 3.1), a metodologia utilizada é descrita mais detalhadamente a seguir.

Após a elaboração da fundamentação teórica, com levantamentos sobre a gestão integrada bacia hidrográfica – zona costeira e sobre as ferramentas utilizadas para efetivar esta integração, propõe-se o objetivo desta dissertação: a análise da dinâmica da salinidade como

uma ferramenta para compreender o sistema estuarino e servir como base para a gestão integrada.

Para compreender a dinâmica da salinidade em um estuário, aplica-se um modelo de balanço de massa para a salinidade, uma substância conservativa. Com este modelo, podem-se simular cenários, variando a disponibilidade hídrica e observar como o estuário se comporta frente a estas variações.

Face à compreensão da dinâmica da salinidade, subsídios técnicos são propostos para minimizar os efeitos negativos e/ou maximizar os positivos. Esses subsídios servirão para auxiliar o tomador de decisão nos comitês de bacia e/ou órgãos ambientais.

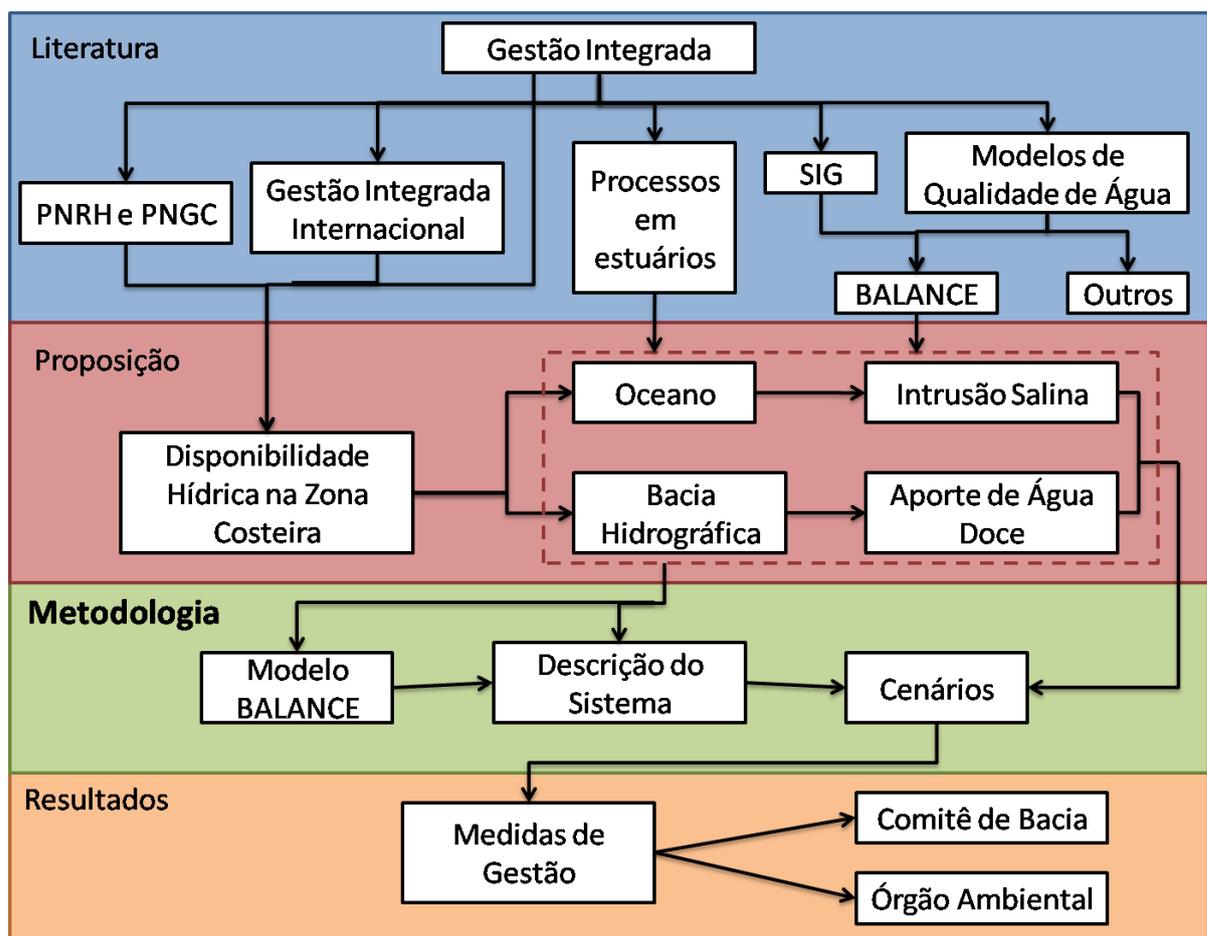


FIGURA 3.1 – FLUXOGRAMA GERAL DO TRABALHO, DA METODOLOGIA PROPOSTA AOS RESULTADOS.

### 3.1 APLICAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA EM UM ESTUÁRIO

Após o processo digitalização de cartas topográficas para obter as imagens georreferenciadas do estuário em estudo, para o programa BALANCE, no formato *shapefile* das linhas e dos

polígonos, e da obtenção dos dados de entrada (fluxos nas interfaces, de entrada e de saída), que são os dados temporais, pode-se partir para a modelagem.

Considera-se que o estuário em questão é representado pela Figura 3.2, sendo dividido em três polígonos, sendo que o polígono *I* é o limite da intrusão salina, e onde há entrada da bacia hidrográfica (linha 1 da Figura 3.2); o polígono *III* é a fronteira externa do estuário, limite com o oceano (linha 10 da Figura 3.2); e o polígono *II* é intermediário aos outros dois.

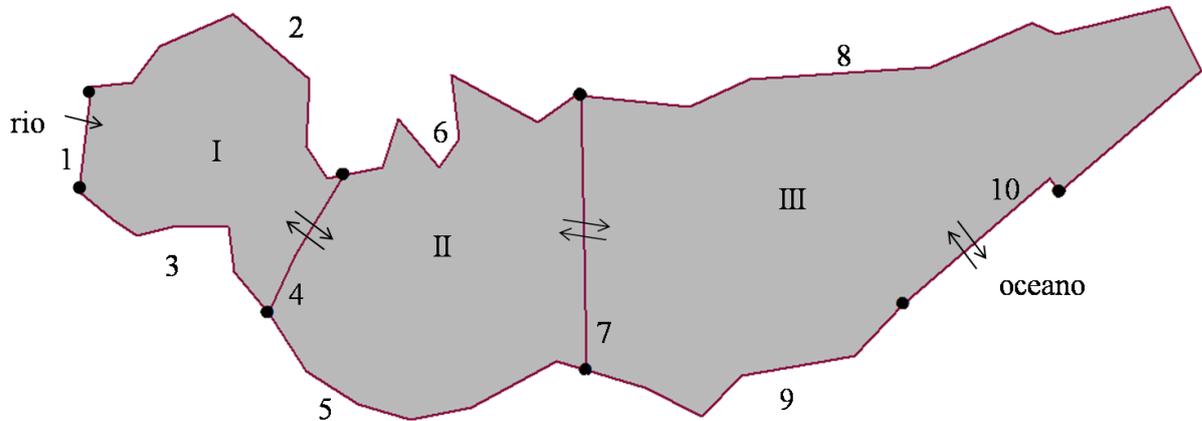


FIGURA 3.2 – MODELO DE ESTUÁRIO, PARA O PROGRAMA BALANCE.

Assim, a partir das equações do item 2.6, e considerando a linha 1 como o aporte da bacia (um rio) e a linha 10 o limite com o oceano, obtém-se o seguinte sistema de equações para o balanço de salinidade (uma substância conservativa):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{rio,I} \cdot S_{rio} - Q_{I,II} \cdot S_I + E_{II,I}(S_{II} - S_I) = 0 \\ Q_{I,II} \cdot S_I - Q_{II,III} \cdot S_{II} + E_{I,II}(S_I - S_{II}) + E_{III,II}(S_{III} - S_{II}) = 0 \\ Q_{II,III} \cdot S_{II} - Q_{III,oceano} \cdot S_{III} + E_{II,III}(S_{II} - S_{III}) + E_{oceano,III}(S_{oceano} - S_{III}) = 0 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Os fluxos  $Q$  são obtidos empiricamente, através de medições in loco ou através de estimativas a partir do *MNT*. As condições iniciais do sistema é a salinidade inicial (**so**), dos polígonos, determina teoricamente em função da dinâmica natural do sistema. As condições de contorno são definidas para as linhas, com sendo a concentração da salinidade nas linhas de borda (que limitam o estuário com a terra, por exemplo) (**sb**).

A salinidade dos segmentos são medidas in loco para posterior calibração do modelo, através da comparação entre a salinidade modelada (**s**) e a observada (**sm**).

O coeficiente  $E$ , que representa o fluxo dispersivo, ou seja, devido ao processo de mistura entre a água salgada e a água doce. Logo, esse coeficiente, também chamado de coeficiente de dispersão de maré, possui componentes do fluxo de água doce e da ação da maré. Esse pode ser determinado a partir da equação 2.5, utilizando medidas de salinidade em loco. Determina-se, então, o coeficiente  $E$  para cada segmento ( $e$ ), visto que foram utilizados os valores de salinidade dos segmentos. Entretanto, há a necessidade de que este coeficiente esteja relativo à seção transversal de cada linha ( $ep$ ), então o próprio BALANCE, através do script *calcep*, realiza este procedimento.

Com todos os dados no programa, o resultado do sistema de equações 3.1 é facilmente calculado. A saída do BALANCE corresponde ao transporte advectivo (**fad**) e dispersivo (**fdi**), para as linhas e a carga advectiva (**wad**) e dispersiva (**wdi**), e a salinidade modelada (**s**) para os polígonos.

O transporte advectivo das linhas é determinado a partir da salinidade (**s**) obtida do polígono fluxo acima ou a salinidade da fronteira (**sb**), se a linha for contorno, e do fluxo da própria linha (**fad** =  $q.s$ ). Por exemplo, o transporte advectivo da linha 7 da Figura 3.2 é calculado pela multiplicando a salinidade do polígono *II* com o fluxo da própria linha 7.

O transporte difusivo é obtido a partir da concentração da salinidade do polígono à esquerda (**sl**) e à direita (**sr**) da linha, ou a salinidade da fronteira (**sb**), e do coeficiente de dispersão (**ep**), de forma que **fdi** =  $ep (sl - sr)$ . Da mesma forma, o transporte difusivo da linha 7 da Figura 3.2 é calculado utilizando o coeficiente de dispersão de maré da própria linha, com a salinidade modelada dos polígonos *II* e *III*.

Como dados de saída dos polígonos, têm-se a carga advectiva (**wad**), que é acumulação do transporte advectivo (**fad**) da linha abaixo do polígono (por exemplo, a carga advectiva do segmento *II* da Figura 3.2, corresponde ao fluxo de água doce – transporte advectivo (**fad**) – que entra neste segmento, através da linha 4); e a carga difusiva (**wdi**), que é o balanço entre o transporte difusivo (**wdi**) da linha abaixo e acima do polígono (para o mesmo polígono *II*, a carga difusiva é a diferença entre o transporte difusivo que entra pela linha 4 e sai pela linha 7).

Para que seja calculado do balanço de massa, o programa ainda exige que sejam especificados os parâmetros de controle, apresentados na Figura 3.3.

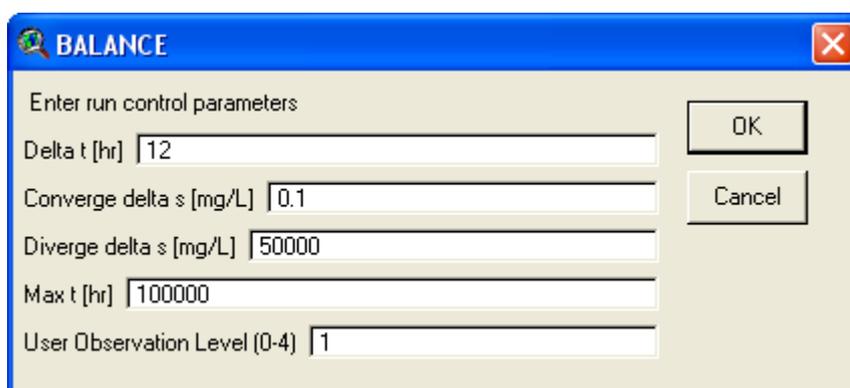


FIGURA 3.3 – PARÂMETROS DE ENTRADA UTILIZADOS NO PROGRAMA BALANCE.

O *Delta t* representa a etapa de tempo definida para a simulação, ou seja, em quanto tempo ocorrerá a mistura estuarina.

O *Converge delta s* representa que, se o máximo de mudança na concentração, de uma etapa de tempo à outra, é menor que o valor referido, o sistema assume a condição de estado estacionário e a computação cessa.

O *Diverge delta s* representa que, se o máximo de mudança na concentração, de uma etapa a outra, é maior que o valor referido, o sistema assume uma condição instável e interrompe a computação.

O *Max t* é o tempo máximo de computação.

O *User Observation Level* (nível de observação do usuário) especifica a quantidade de informação introduzida pelo usuário, durante a computação. Este varia de 0 (o programa não está sendo rodado) até 4. Normalmente utiliza-se o nível 1 para que a rodagem seja mais dinâmica. A Tabela 3.1 mostra todos os níveis de observação do usuário que o BALANCE permite.

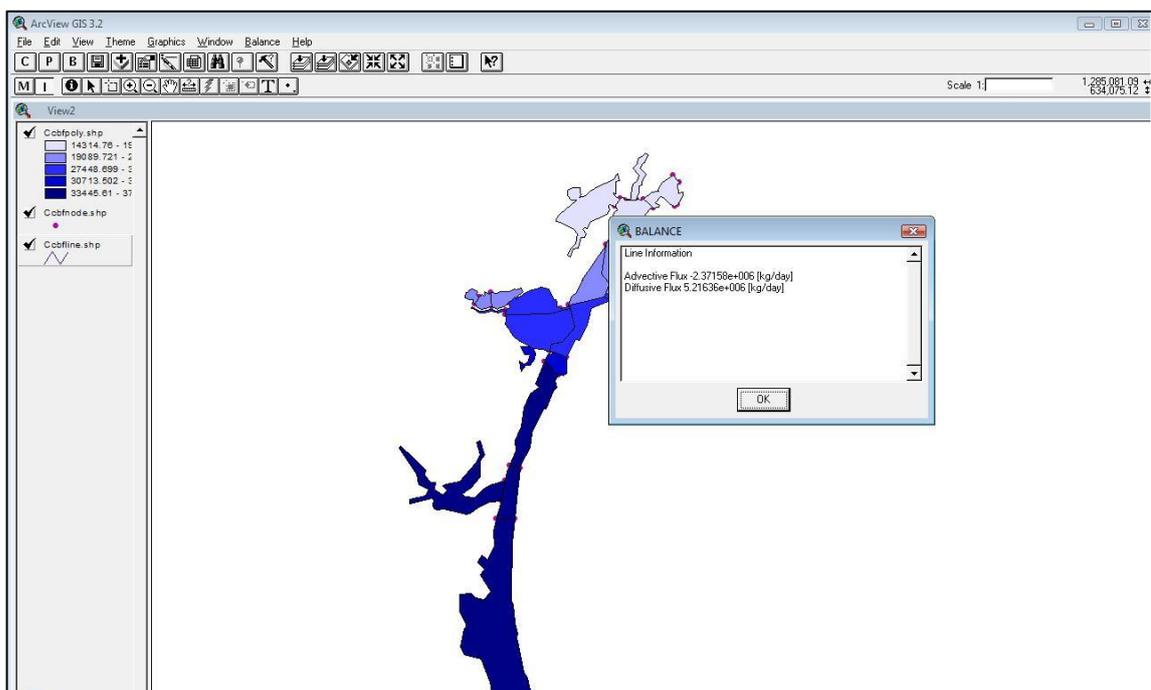
TABELA 3.1 – DESCRIÇÃO DOS NÍVEIS DE OBSERVAÇÃO DO USUÁRIO NO BALANCE.

<i>USER OBSERVATION LEVEL</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>
0	Ainda não utilizou o programa.
1	A barra de ferramentas do ArcView é atualizada periodicamente. Informação exibida na tela inclui tempo, máxima mudança na concentração, a partir da última etapa computada, e o percentual do tempo máximo.
2	Adicionalmente ao nível 1, a legenda é atualizada periodicamente, o que facilita quando, por exemplo, os polígonos são coloridos com base na concentração.
3	Adicionalmente ao nível 2, as variáveis do balanço de massa são

<i>USER OBSERVATION LEVEL</i>	<i>DESCRIÇÃO</i>
4	plotadas. Adicionalmente ao nível 3, o sistema faz um intervalo, depois de cada etapa computada, e exibe na tela o tempo e a máxima mudança na concentração, a partir do último procedimento realizado pelo programa.

Os resultados da computação do balanço de massa são armazenados em uma tabela de dados, que podem ser examinados individualmente para cada feição (linha ou polígono). Para tanto, basta manter o tema (linha ou polígono) desejado ativo na janela do ArcView e clicar no correspondente comando do BALANCE. A Figura 3.4 mostra o resultado do balanço de massa para uma linha do estuário.

Observa-se que com o resultado pontual das linhas e polígonos não é claro o balanço de massa. Ao colorir os polígonos com a gradação da salinidade modelada (s) (Figura 3.4) pode-se observar claramente a nova distribuição da salinidade, para cada cenário testado. Desta forma, novos balanços são estimados e podem ser comparados espacialmente, a partir do mapa distribuição de salinidade.



**FIGURA 3.4 – MODELO BALANCE E O RESULTADO DO BALANÇO DE SALINIDADE DE UMA LINHA QUALQUER. NO FUNDO ESTÁ UM ESTUÁRIO COLORIDO CONFORME A SALINIDADE MODELADA.**

Os mapas de distribuição da salinidade são muito interessantes em um processo de gestão integrada de bacias hidrográficas situadas em zona costeira, pois permitem avaliar como

modificações das condições naturais e antrópicas (condições meteorológicas, demanda, etc.) afetam a dinâmica da salinidade e conseqüentemente a disponibilidade hídrica visualmente, por comparação.

### 3.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para que se possa aplicar o BALANCE num estuário específico, alguns procedimentos devem ser feitos, para que os dados geográficos e temporais que compõem o sistema sejam organizados e possam descrever o ambiente estuarino.

Primeiramente, cria-se a segmentação dos polígonos do estuário, que pode ser feita manualmente em cima de uma imagem da área, considerando a batimetria do estuário e que em cada segmento criado terá apenas um valor de salinidade, ou seja, cada segmento é totalmente misturado. As linhas de interface entre os segmentos são consideradas nos pontos de maior profundidade, onde há maior fluxo.

Ao arquivo vetorial dos segmentos (polígonos), conecta-se a hidrografia correspondente a cada segmento através do script *connect* escrito na mesma linguagem do BALANCE. Este comando une o *MNT* (Modelo Numérico do Terreno), obtido a partir da digitalização de cartas topográficas, com o arquivo dos polígonos. Para tanto, a grade do *MNT* precisa ser alterada para criar depressões artificiais, correspondentes ao centroide dos polígonos, para que possa ocorrer a simulação do balanço de massa.

Com o *MNT* recondicionado, corrigido e conectado ao estuário, a direção dos fluxos de cada célula pode ser calculada, detalhe importante para definir a direção do escoamento, tanto na rede de drenagem como no estuário. Também é necessário determinar o número de células afluentes a uma determinada grade de células. Estes processos são denominados de *direção de fluxo* e *fluxo acumulado*. Estes cálculos são baseados nas oito direções ou células vizinhas de cada ponto do modelo (Figura 3.5).

A modelagem inicia descrevendo a célula rodeada por suas oito adjacentes. Assim, a célula drena para sua vizinhança, conforme definido pelo acumulado e conectado no *MNT*. A drenagem é, então, traçada célula a célula, criando a rede de direção de fluxo. A grade do

fluxo acumulado<sup>6</sup> é calculada por meio da contagem de células que convergem para cada célula. Esta metodologia é ilustrada na Figura 3.6.

1	2	3	
8		4	
7	6	5	

FIGURA 3.5 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CÉLULA (EM CINZA) COM AS OITO CÉLULAS VIZINHAS A ESTA.

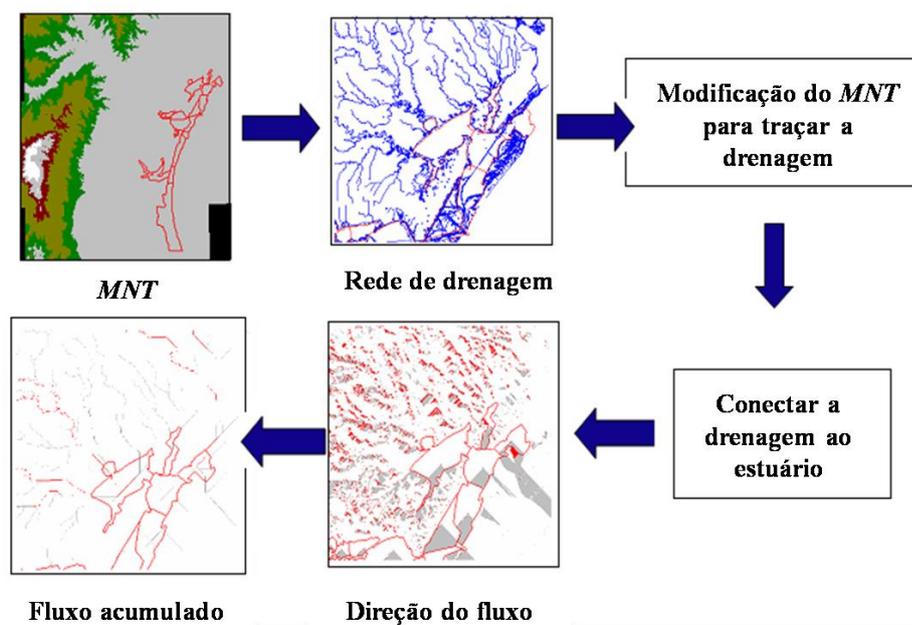


FIGURA 3.6 – METODOLOGIA DE MODIFICAÇÃO DO MNT PARA CONEXÃO COM O ARQUIVO VETORIAL DOS SEGMENTOS DO ESTUÁRIO E CÁLCULO DA DIREÇÃO DO FLUXO E FLUXO ACUMULADO, COMO UTILIZADO POR HELLWEGER (1997).

A partir do fluxo acumulado, pode-se calcular o escoamento superficial, assumindo-se que esse é função da precipitação e do percentual de uso do solo. Para estabelecer essas relações, podem ser utilizadas ferramentas de regressão, como o programa Excel. A limitação desta metodologia é devido ao fato de serem usados valores de médias anuais com parâmetros em

<sup>6</sup> A partir matriz das direções de fluxo, a área acumulada é obtida somando as células na direção do fluxo/escoamento. Mendes & Cirilo (2001) explicam que, neste procedimento, é assumido que a água escoar na direção da célula vizinha com menor elevação.

estado estacionário de ano a ano. O efeito de secas ou cheias extremas não é considerado (HELLWEGER, 1997).

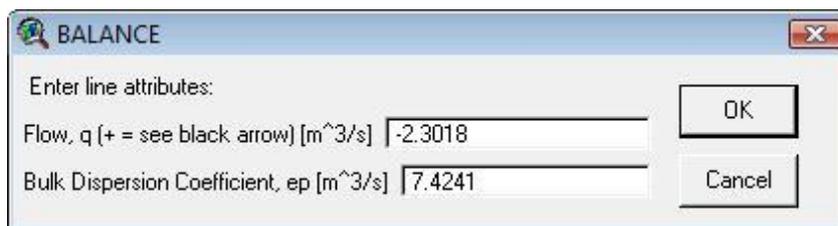
### 3.3 CENÁRIOS

Considerando a importância de se simular cenários futuros para a gestão ambiental e de recursos hídricos, para cada estudo de caso, são testadas algumas variações nas condições naturais.

O primeiro cenário a ser simulado é o marco referencial (cenário padrão), que representa a situação atual, onde não há modificação nas condições meteorológicas nem na demanda da bacia, apenas o modelo é rodado. O cenário referencial indica uma situação onde os usuários já estão adaptados à utilização de água a partir deste padrão de intrusão salina. A importância deste cenário está na comparação deste com os outros cenários de mudanças futuras.

Assim, criam-se outros cenários, onde há modificações na vazão afluente de água doce ao estuário ou modificações na demanda de água doce no estuário ou bacia hidrográfica.

Para simular os cenários de variação da demanda antrópica no BALANCE, utilizam-se os mesmos dados do marco referencial, apenas modificando o fluxo ( $q$ ) de saída nas linhas (Figura 3.7).



**FIGURA 3.7 – PARA ALTERAR A DEMANDA ANTRÓPICA, BASTA MODIFICAR O VALOR DO FLUXO (FLOW) NA LINHA DO BALANCE.**

As modificações climáticas não podem ser incluídas diretamente no BALANCE, visto que este utiliza dados de precipitação e evapotranspiração médios anuais já incluídos nos dados de entrada.

Essas modificações podem ser simuladas através de metodologias específicas que relacionem as variações da precipitação e evapotranspiração na bacia hidrográfica com o escoamento. Assim, obtém-se o novo escoamento do rio (vazão do rio que entra no estuário) correspondente às variações climáticas, e altera-se a vazão de entrada diretamente no

BALANCE, da mesma forma que feito para cenários de demanda. A seguir uma destas metodologias de transformação de alterações climáticas em vazão é descrita.

### 3.3.1 VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Para determinar o comportamento da dinâmica da salinidade em face de mudanças nas condições meteorológicas, utilizou-se como referencia a metodologia proposta por Mendes *et al.* (2010).

O princípio da metodologia assume que a bacia hidrográfica é um ciclo fechado, com os fluxos atuantes (precipitação, evapotranspiração e escoamento) em regime estacionário ao longo do tempo. Ou seja, a relação entre estas variáveis é constante no tempo. Assim, o balanço hídrico resultante é:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 = P + g_i - g_o - Q - ET \quad (3.2)$$

Onde:  $V$  é o volume de água na bacia;  $P$  é a precipitação;  $Q$  é o escoamento;  $ET$  é a evapotranspiração;  $g_i$  é a entrada de água subterrânea na bacia e  $g_o$  é a saída de água subterrânea da bacia.

Como o tempo de residência de águas subterrâneas é bastante longo, considera-se que a entrada desta fonte na bacia é igual à saída ( $g_i \approx g_o$ ), tornando esta contribuição desprezível. O resultado do balanço hídrico fica:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = 0 = P - Q - ET \quad \text{ou} \quad P = Q + ET \quad (3.3)$$

Com base nos dados da série histórica (média de no mínimo 30 anos), estima-se o coeficiente de escoamento ( $\gamma = \frac{Q_0}{P_0}$ ) da bacia, razão entre a vazão e a precipitação média.

Para servir como base para os cenários de modificação climática, os parâmetros iniciais ( $\alpha$  e  $\beta$ ) são obtidos, de tal forma que  $P_1 = \alpha \cdot P_0$  e  $ET_1 = \beta \cdot ET_0$ . Sendo os valores com subíndice  $0$  referentes à série histórica e com subíndice  $1$  referentes às mudanças climáticas (como *IPCC*, por exemplo).

O produto final desta metodologia é a resposta à pergunta: *como as modificações da precipitação ( $P$ ) e da evapotranspiração ( $ET$ ) afetam o escoamento ( $Q$ )?*

Assim, para a série histórica:

$$\begin{aligned}
 Q_0 &= P_0 - ET_0 = P_0 - (P_0 - Q_0) \\
 &= P_0 - (P_0 - \gamma \cdot P_0) \\
 &= P_0 - [P_0 \cdot (1 - \gamma)]
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

E, para os cenários de mudanças climáticas:

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= P_1 - ET_1 = \alpha P_0 - \beta ET_0 \\
 &= \alpha P_0 - \beta (P_0 - Q_0) \\
 &= \alpha P_0 - \beta (P_0 - \gamma P_0) \\
 &= \alpha P_0 - \beta [P_0 \cdot (1 - \gamma)]
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

A partir das equações 3.4 e 3.5, obtém-se a taxa de modificação do escoamento superficial ( $R$ ), relativas às diferenças de precipitação e evapotranspiração dos cenários de modificação climática em relação à série histórica:

$$R = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{\alpha P_0 - \beta [P_0 \cdot (1 - \gamma)]}{P_0 - [P_0 \cdot (1 - \gamma)]} = \frac{\alpha - \beta \cdot (1 - \gamma)}{\gamma} \tag{3.6}$$

Salienta-se que o coeficiente ( $\gamma$ ) é mantido constante e igual ao valor da série histórica.

Esta razão  $R$  é multiplicada pela vazão média da série histórica para determinação do escoamento resultante após mudanças climáticas.

### 3.3.2 VARIAÇÃO NA DEMANDA DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Os recursos hídricos podem ser retirados da bacia para serem utilizados como insumos produtivos para atividades industriais e agropastoris, e também para abastecimento público. Em cada bacia hidrográfica, a distribuição da demanda pelos recursos hídricos disponíveis é variável. Algumas o principal uso é a irrigação, outras o abastecimento público, etc.

A vazão consultiva utilizada na bacia pode afetar a disponibilidade hídrica na região costeira. Para identificar as consequências das variações na demanda de uso dos recursos hídricos na dinâmica estuarina, podem-se utilizar os dados de demanda existentes, principalmente dos usos predominantes na bacia.

Assim, se considerarmos uma bacia específica em que o principal usuário de recursos hídricos é irrigação, com os dados de vazão de demanda para esse uso, pode-se estabelecer cenários

em que há um aumento desta demanda em 50%, determinando desta maneira a consequência para a disponibilidade hídrica na zona costeira através da dinâmica da salinidade. A alteração na demanda da bacia é facilmente aplicada na modelagem ao aumentar vazão retirada de água doce através das linhas do modelo.

### **3.4 MEDIDAS PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS NA ZONA ESTUARINA**

O balanço de massa gera uma distribuição de salinidade para cada cenário específico, em que há diferentes vazões afluentes ao estuário e diferentes demandas antrópicas.

A partir do marco referencial (cenário padrão), obtém-se uma distribuição de salinidade, com a qual é definido o limite superior do estuário, ou seja, até que ponto a ação marinha é sentida (limite onde a salinidade é menor que 0,5‰<sup>7</sup>). Este limite é importante para a gestão de bacias hidrográficas costeiras. Se esse limite aumentar para dentro do continente pode haver comprometimento da disponibilidade hídrica, e os usos de água existentes no entorno podem ser limitados em virtude do aumento da salinidade. Este aumento de influência da salinidade está intimamente ligado à diminuição da vazão de água doce que entra no estuário. Logo, esse local específico do estuário deve ser alvo de monitoramento da salinidade, de maneira a controlar a demanda de água doce para que a diminuição da vazão afluente ao estuário não comprometa a disponibilidade hídrica.

Com base no exposto, estratégias devem ser desenvolvidas para o gerenciamento da intrusão salina em função dos usos desejados para os recursos hídricos na bacia e no estuário e de possíveis aumentos na demanda de água na bacia como um todo.

Cada bacia/estuário possui suas particularidades, que devem ser geridas de maneira integrada e sistêmica, sem esquecer que a bacia e o oceano são um contínuo que interagem entre si, onde modificações quaisquer em um dos meios pode afetar o outro.

No âmbito brasileiro, o arcabouço legal existente para esta integração é representado pela PNRH e pelo PNGC (já mencionados). Ambas as legislações possuem instrumentos de gestão para a bacia e para a zona costeira, separadamente.

---

<sup>7</sup> De acordo com o CONAMA 357/2005, a água doce é definida como aquela que possui salinidade abaixo de 0,5‰.

Se for feita uma comparação do aparato legal brasileiro com as normas internacionais de gestão integrada de bacias hidrográficas e da zona costeira, é como se o Brasil estivesse ainda apenas com a IWRM (*Integrated Water Resource Management*) e ICAM (*Integrated Coastal Area Management*), trabalhando cada um em seu meio (bacia e costa) sem considerar a influência do outro.

Apesar da criação da CTCOST no CNRH, a ação desta câmara ainda é muito limitada e sem voz política no próprio CNRH, fato comprovado pelo tempo necessário para a aprovação da primeira resolução de integração bacia – zona costeira, que define as normas para planos de bacias costeiras. Desde 2007 a CTCOST tenta aprovar esta resolução, sem sucesso.

Apesar de todos os dilemas da gestão costeira no Brasil, a presente dissertação utilizará o resultado do balanço de massa como compreensão da dinâmica da salinidade, para propor subsídios para a gestão integrada. Serão utilizados basicamente os instrumentos da PNRH, visto que a essência da questão é a disponibilidade hídrica, aplicando as particularidades do ambiente costeiro. Do PNGC, o principal instrumento a ser aplicado em conjunto com a PNRH, será o ZEEC (zoneamento ecológico-econômico costeiro). Estes subsídios para a gestão visam à manutenção dos recursos hídricos da bacia costeira, tanto para preservação dos ecossistemas especializados como para o uso humano.

## 4. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TRAMANDAÍ

A região de estudo, a qual foi aplicada a metodologia já descrita, é a bacia hidrográfica do Rio Tramandaí, devido à sua importância da como única fonte de água doce para o litoral norte do Rio Grande do Sul, considerando a sua localização na zona costeira e a possibilidade de haver limitação na abundância deste recurso hídrico devido à influência marítima.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A bacia hidrográfica do Rio Tramandaí está localizada na Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Litoral Norte do Estado (Figura 4.1). Abrange 17 municípios, desde Torres, ao norte, até Palmares do Sul, incluindo municípios da encosta da Serra Geral. A bacia drena uma área de 2.697,87km<sup>2</sup> e compreende uma faixa costeira de 115km, com uma área alagada de 500km<sup>2</sup> (RIO GRANDE DO SUL, 2009a).

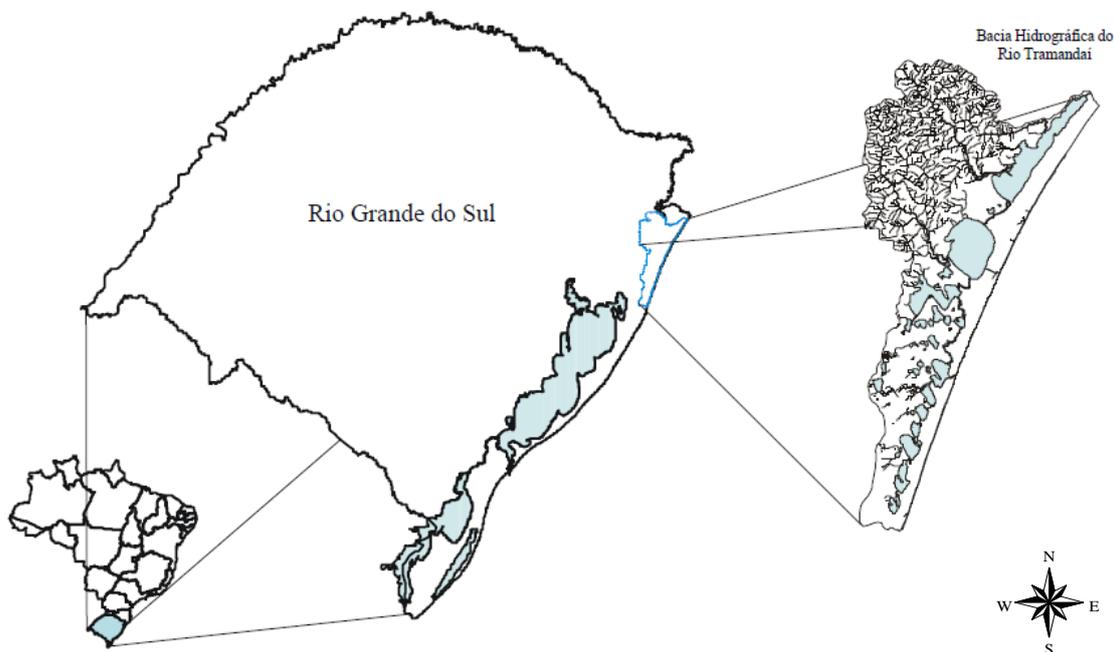
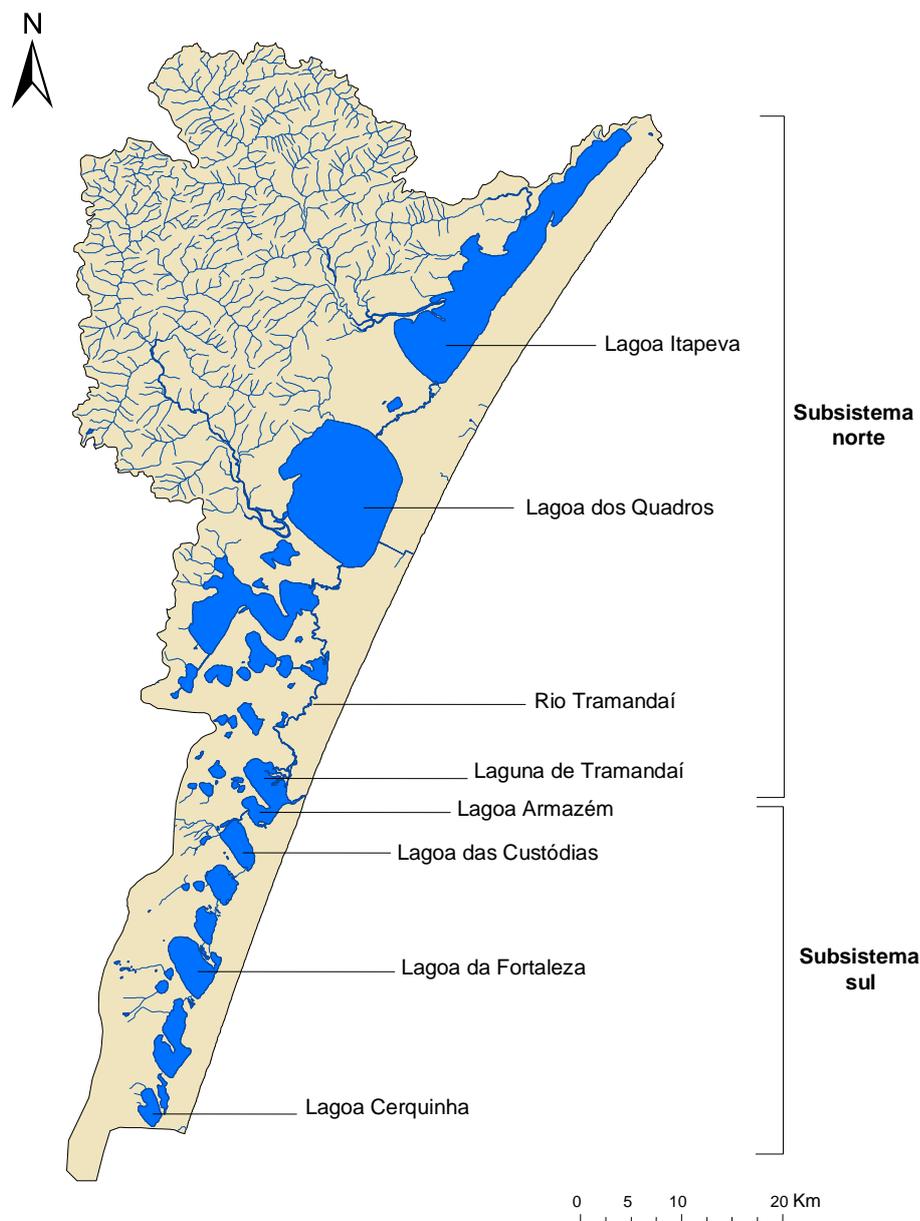


FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TRAMANDAÍ NO ESTADO DO RS.

A bacia é composta por um sistema de lagoas de médio porte (desde a Lagoa Itapeva, próxima da cidade de Torres, até a Lagoa da Cerquinha) (Figura 4.2), paralelas à costa, interligadas através de canais naturais e artificiais, embora existam pequenas lagoas isoladas. A ligação com o Oceano Atlântico ocorre entre as cidades de Tramandaí e Imbé, na chamada Barra do Rio Tramandaí (Figura 4.3).



**FIGURA 4.2 – A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TRAMANDAÍ, OS SUBSISTEMAS NORTE E SUL E AS PRINCIPAIS LAGOAS.**

Este sistema é caracterizado por sua fragilidade a influências externas que possam modificar os parâmetros atuais (já bastante afetados pelo uso intenso de água para irrigação e o crescente aumento da população). Essa fragilidade se deve em grande parte pelo fato de ser uma região muito plana e com escoamentos comandados por ventos durante grande parte do ano.

Os usos dos recursos hídricos desta região são bastante diversificados, destacando-se irrigação, atividade relacionada ao veraneio, abastecimento público e, principalmente, nas proximidades das áreas urbanas, diluição de esgotos domésticos e industriais.

As ações antrópicas podem ser muito danosas, modificando negativamente as características hidráulicas do sistema. Um das consequências seria a salinização do sistema lagunar, comprometendo as fontes de água doce para a região e causando prejuízos para a população e para o meio ambiente. Ressalta-se que nas últimas décadas tem havido um constante aumento populacional e intensificação das atividades econômicas, principalmente a agricultura de irrigação. Este incremento populacional aumenta o volume de água consumido e os impactos ambientais sobre os mananciais.



**FIGURA 4.3 – FOTO DA BARRA DO RIO TRAMANDAÍ, CANAL DE LIGAÇÃO DA BACIA COM O OCEANO. (FONTE: BRUSSIOS, 2009).**

Como exemplo dos dilemas anteriores, cita-se a situação ocorrida durante o verão de 2004, o efeito decorrente das atividades antrópicas associado a variações climáticas, limitou a captação de água bruta para abastecimento e irrigação, quando houve rebaixamento anormal dos níveis das águas nas lagoas, proporcionando maior entrada de água do mar (RANGEL *et al.*, 2009). Essa situação de seca se repetiu no ano de 2005.

## **4.2 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS**

O clima da região é classificado como subtropical úmido, o que representa um ambiente com temperatura média anual de 18,5°C, precipitação média anual de 1400 mm (MALUF, 2000).

A dominância do centro de alta pressão do anticiclone do Atlântico Sul na formação do clima resulta na predominância de ventos de sentido NE, com velocidade média de 5m/s, seguida por ventos SW durante a passagem de frentes frias, mais comuns no inverno. A precipitação média anual varia a cada ano e está relacionada, principalmente, ao padrão e a frequência da passagem de frentes frias. A precipitação média mensal é maior durante o inverno e a primavera, entretanto altas precipitações podem ocorrer no verão. Os meses de verão estão associados com um déficit sazonal de água, embora a precipitação pluviométrica e a evaporação normalmente resultem em um excesso médio anual de água (KLEIN, 1998).

Nesta região, as variações interanuais na precipitação, com períodos de chuva intensa ou seca prolongada, parecem ser consequência dos efeitos do ciclo El Niño-Oscilação Sul sobre o clima global. Esse fenômeno influencia diretamente a quantidade de descarga de água doce continental, incrementando as chuvas no sul do Brasil, no caso de El Niño, ou diminuindo, em casos de La Niña (KLEIN, 1998).

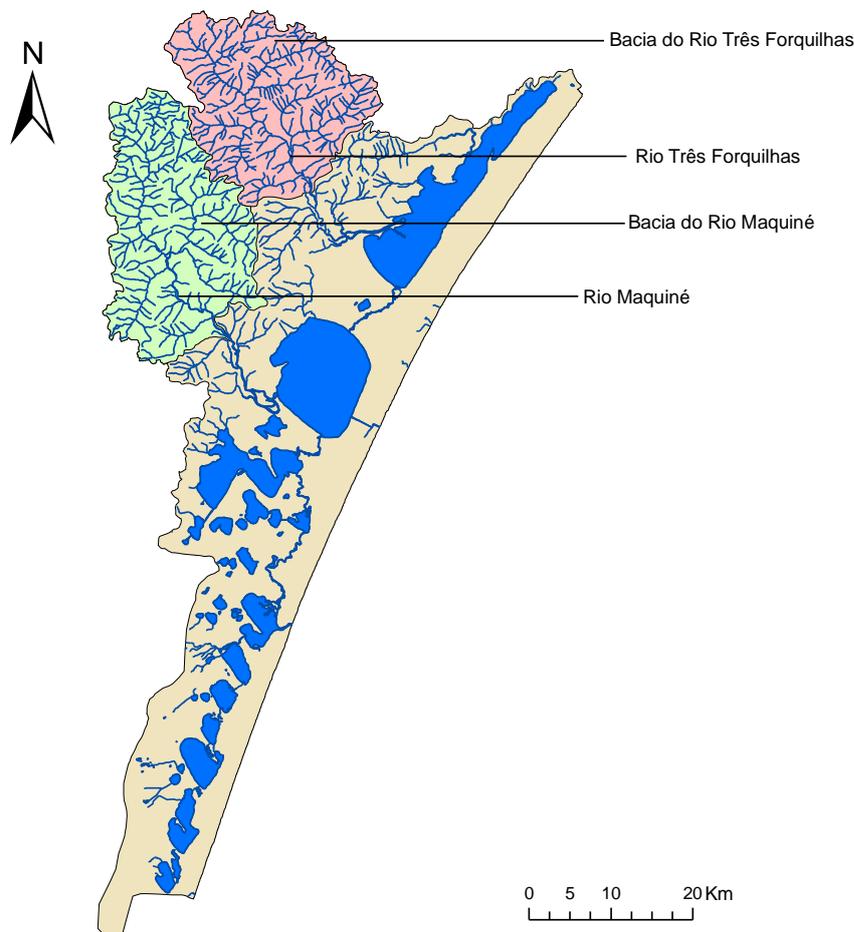
### **4.3 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS**

A bacia hidrográfica do Rio Tramandaí caracteriza-se por uma sequência de ambientes longitudinais à costa chegando até as bordas da Serra Geral. Identifica-se, após a zona de interface com o mar, a típica planície sedimentar costeira, seguida pelo cordão de lagoas litorâneas e chegando até a encosta planáltica, formada pelos vales dos rios Maquiné e Três Forquilhas, que são os principais tributários.

O Rio Três Forquilhas possui extensão aproximada de 46 km, conta com uma área de drenagem de 543km<sup>2</sup> e sua desembocadura é direto na Lagoa Itapeva (Figura 4.4). O Rio Maquiné, possui extensão de 51km, uma área de drenagem de 546km<sup>2</sup> e possui sua foz junto à parte sul da Lagoa dos Quadros. Ambos os rios nascem na Serra Geral em altitudes superiores a 900m e ao atingir a planície costeira apresentam um caráter meandrante. As duas lagoas, oriundas da desembocadura destes rios, Lagoa Itapeva e a Lagoa dos Quadros, representam praticamente toda a contribuição das sub-bacias, com 93% da contribuição total (PROFILL, 2005a).

O sistema de canais inter lagunares é composto por uma complexa rede de canais naturais e artificiais que fazem a ligação entre às diversas lagoas. O canal mais importante da região é o Rio Tramandaí que escoar para a laguna de Tramandaí (*Lagoa de Tramandaí*) a água proveniente das várias lagoas existentes na parte norte da bacia hidrográfica. Neste local, há

também uma única e importante comunicação com o mar, a Barra do Tramandaí, que determina o sentido predominante de escoamentos dos cursos de água localizados ao norte e ao sul da mesma barra.



**FIGURA 4.4 – LOCALIZAÇÃO DAS BACIAS E DOS RIOS TRÊS FORQUILHAS E MAQUINÉ NA BACIA DO RIO TRAMANDAÍ.**

Esse sistema apresenta nitidamente dois subsistemas hidrográficos distintos: o subsistema norte, compreendido entre a Lagoa de Itapeva e a Lagoa de Tramandaí, sendo dominante no escoamento da bacia devido à grande vazão descarregada; e o subsistema sul, que se inicia na Lagoa da Cerquinha e deságua na Lagoa de Tramandaí (Figura 4.2). Essa lagoa constitui-se um canal natural do sistema Litoral Norte que se interliga com o Oceano Atlântico através da Barra do Rio Tramandaí.

Ao sul praticamente todas as lagoas encontram-se interligadas por canais como, por exemplo, o canal Camarão, mais conhecido por Rio Camarão, que liga a *Lagoa da Custódia* à *Lagoa de Tramandaí* (Figura 4.2). Ao contrário dos canais da parte norte, os canais da parte sul podem

apresentar reversões de fluxo em função dos níveis relativos dos corpos lagunares por eles interligados, fato evidenciado pela constatação de pequenos deltas em ambas as desembocaduras dos canais (SILVA, 2001).

A ação marinha é marcante, com a intrusão de água salgada do mar interferindo principalmente nas Lagoas do Armazém, Custódias e Gentil, além da Lagoa de Tramandaí. Ventos de NE, assim como maior descarga de água doce, favorecem a saída de água doce, causando um decréscimo da salinidade dentro do estuário. Menor descarga fluvial, e ventos de SW e SE, forçam a água do mar para dentro do estuário, aumentando a salinidade e causando problemas ao atendimento das demandas hídricas (PROFILL, 2005a).

Nesta região, a influência da maré astronômica é mínima, tendo amplitude média de 0,3m (TABAJARA, 1994). Nesta região, as principais condicionantes oceanográficas são geradas pela ação de sistemas meteorológicos de escala sinótica e de mesoescala (CLIMANÁLISE, 1986), sob a forma de variações no nível do mar (maré meteorológica) e a geração de ondas de superfície (ressacas).

Maré meteorológica é definida como “a diferença entre a maré observada e aquela prevista pela Tábua de Marés” (PUGH, 1987). Portanto, o efeito das marés meteorológicas é o aumento do nível do mar, causando inundações e aumento da intrusão salina em locais onde normalmente não ocorre, ou então, acarretar níveis muito baixos.

O fenômeno conhecido como ressaca (“storm surges”) geralmente está associado a uma maré meteorológica intensa, é caracterizado pelo avanço do mar em áreas normalmente não alcançadas, provocando danos e inundações. As marés meteorológicas e ressacas são bem comuns na costa do RS.

#### **4.4 CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA**

As lagoas costeiras que compõem a bacia hidrográfica do Rio Tramandaí possuem grande importância por ser fonte exclusiva de água doce para a planície costeira do Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

A economia local é sustentada basicamente por atividades ligadas ao veraneio, como a construção civil e a prestação de serviços. A estrutura fundiária da região é fundamentada na pequena propriedade rural, onde os agricultores utilizam sistemas de cultivo e criação

distintos e produzem grande parte para o consumo próprio. Os principais cultivos são arroz, abacaxi, fumo e banana (HAASE *et al.*, 2003).

Os recursos hídricos são utilizados para diversos fins no local. Há grande demanda para a irrigação de arroz e hortigranjeiros, também são usos significativos o abastecimento público, a pesca, o turismo e a diluição de efluentes. Deve-se considerar que a demanda de água para abastecimento aumenta significativamente no verão, justamente quando é maior a demanda para irrigação, situação que gera conflitos pelo uso da água, limitando as principais atividades econômicas da região (turismo e agricultura).

Estima-se que a população fixa é de 168.631 habitantes, porém no verão (dezembro a março), a população chega a 328.549 habitantes. Estima-se que, no Carnaval e Fim de Ano, a população pode atingir quase 1 milhão de habitantes, o que representa 10% da população do RS (PROFILL, 2004).

Outro grave conflito de uso na região é gerado pela carência de serviços de saneamento. Neste particular, o lançamento de esgoto *in natura* e a disposição indevida de resíduos sólidos se evidenciam (PROFILL, 2004).

## **4.5 INSTRUMENTOS DE GESTÃO**

A bacia hidrográfica do Rio Tramandaí possui desde o Decreto Estadual N° 39.637/1999 (RIO GRANDE DO SUL, 1999), um comitê de bacia. Como previsto pela PNRH, este é um legítimo meio de gerenciamento da bacia, onde há a articulação do Poder Público, a sociedade e os usuários de recursos hídricos, com o intuito de realizar uma gestão integrada e participativa, contemplando os interesses de todos os atores.

A PNRH indica que os comitês de bacia devem operacionalizar, no nível de cada bacia, as disposições do PERH, através do Plano de Bacia Hidrográfica. Seguindo o anexo da Resolução N° 17 do CNRH, que estabelece os termos de referências para elaboração dos Planos de Recursos Hídricos, o PBH deve ser dividido em três etapas (Tabela 4.1).

O Comitê da Bacia do Rio Tramandaí finalizou em 2005 a primeira etapa do Plano de Bacia Hidrográfica, compreendendo a etapa A e B (Diagnóstico e Prognóstico, Compatibilização e Articulação). Através da etapa B foi feita a proposta de enquadramento dos corpos de água da bacia segundo os usos preponderantes. A Resolução N° 50/2008 e N° 54/2009 do Conselho de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul aprovou o enquadramento das águas, após

algumas modificações (Figura 4.5). O enquadramento dos corpos de água é um instrumento muito útil na bacia hidrográfica e servirá como subsídio para licenciamento, outorgas e cobrança na bacia do Rio Tramandaí.

**TABELA 4.1 – ETAPAS DOS PLANOS DE BACIA HIDROGRÁFICA.**

<b>ETAPA A</b>	<b>ETAPA B</b>	<b>ETAPA C</b>
<b>DIAGNÓSTICO E PROGNÓSTICO</b>	<b>COMPATIBILIZAÇÃO E ARTICULAÇÃO</b>	
Levantamento da situação atual da quantidade e qualidade dos recursos hídricos;	Discussão das alternativas de uso da água;	Programa de ações: metas e estratégias para harmonizar os usos e a qualidade da água.
Levantamento da situação atual e futura (cenários) dos usos da água.	Proposta de enquadramento dos corpos de água (usos futuros).	

(FONTE: BRASIL, 2001).

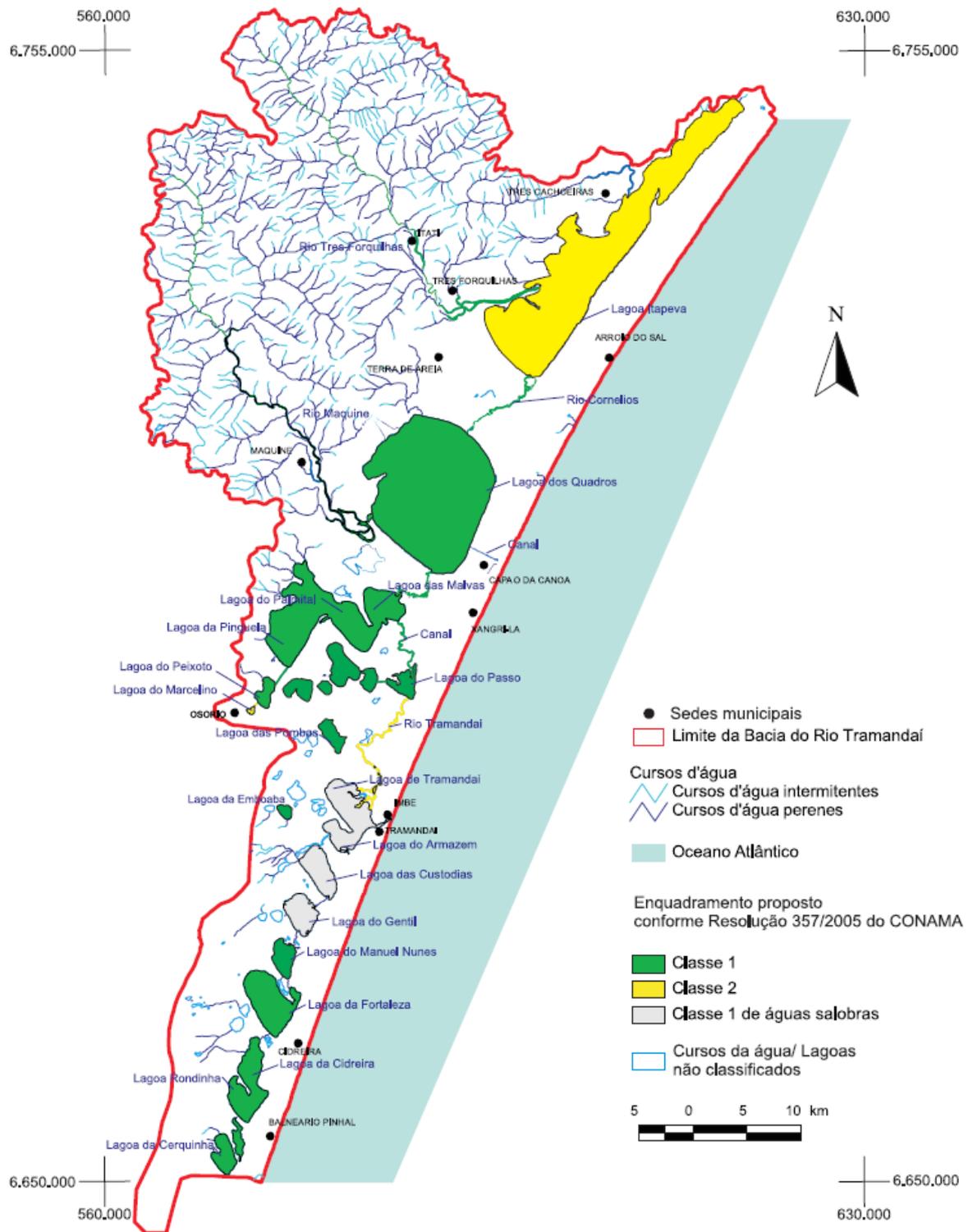
A segunda etapa do plano de bacia, que compõem a fase C do plano, está em discussão, a ser concluída até 2011.

O zoneamento ecológico-econômico costeiro (ZEEC) é um conjunto de regras para o uso dos recursos ambientais estabelecido por zonas que possuem padrões de paisagem semelhantes. É um instrumento de planejamento que estabelece diretrizes ambientais, permitindo identificar as restrições e potencialidades de uso dos recursos naturais. É, também, uma ferramenta fundamental para o planejamento e a gestão dos municípios, especificamente do Litoral Norte do RS (RIO GRANDE DO SUL, 2000).

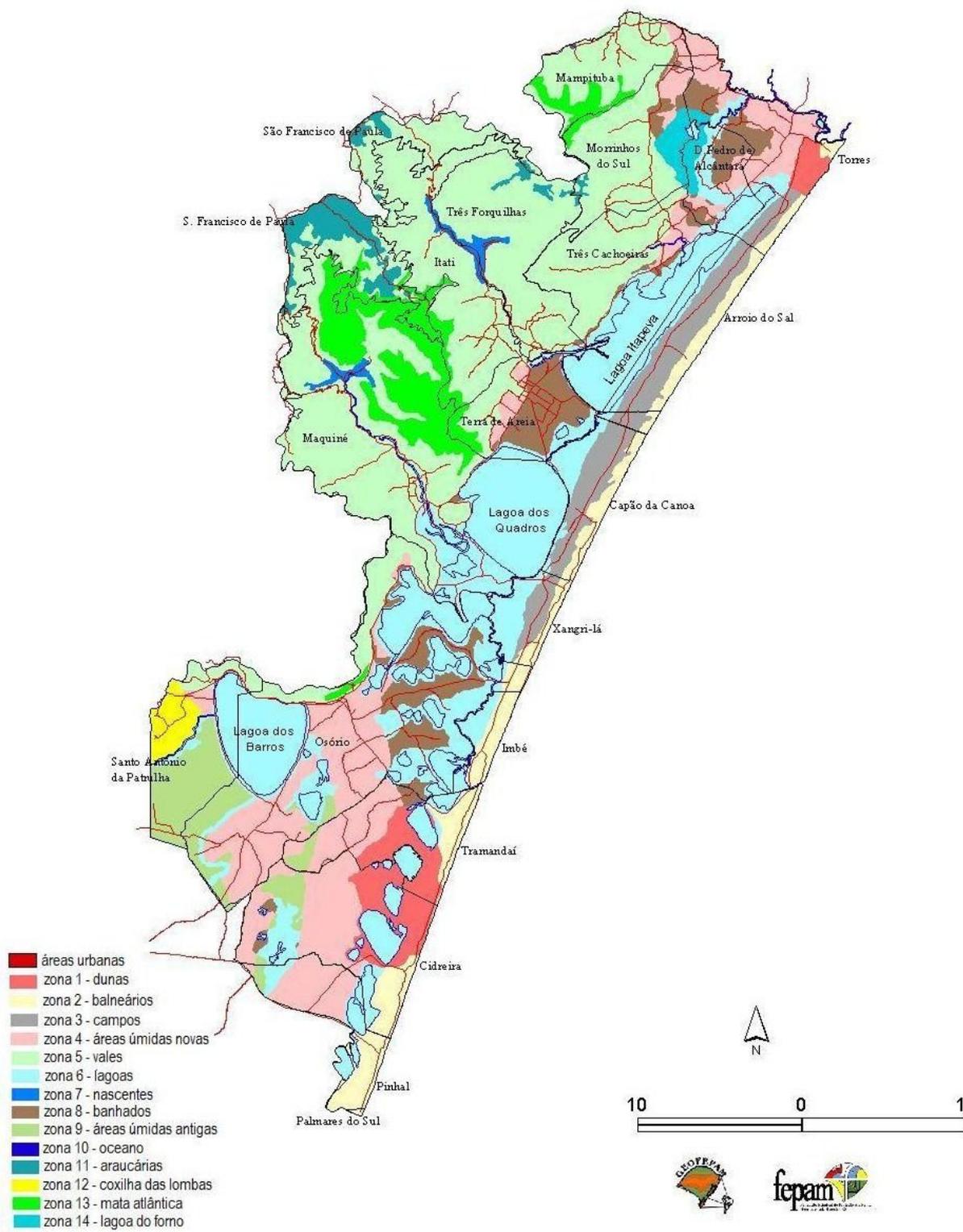
Para a área da bacia do Rio Tramandaí (Litoral Norte do RS), a FEPAM finalizou em 2000 o ZEEC dividido em duas fases: a primeira, relacionada diretamente com a produção de dados e formulação de uma proposta técnica; e a segunda, elaborada através da discussão pública e participação da sociedade. O ZEEC tem sido utilizado para a concessão de licença ambiental.

Na elaboração da 1ª fase do PBH o zoneamento foi utilizado como suporte ao planejamento dinâmico e ao estabelecimento de diretrizes de desenvolvimento local e regional (SANTOS, 2007). O ZEEC serve como um dos instrumentos necessários para a implantação do GERCO, programa já instalado no Litoral Norte, que visa melhor à qualidade de vida das populações locais, promovendo proteção adequada aos ecossistemas.

O ZEEC do Litoral Norte do RS é composto por 14 zonas que correspondem a diferentes paisagens encontradas (Figura 4.6). Para cada zona, são estabelecidas metas, potencialidades e restrições de uso dos recursos ambientais.



**FIGURA 4.5 – ENQUADRAMENTO DOS CORPOS DE ÁGUA DA BACIA DO RIO TRAMANDAÍ.**  
**(FONTE: RIO GRANDE DO SUL, 2009b).**



**FIGURA 4.6 – ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO LITORAL NORTE DO RS.  
(FONTE: RIO GRANDE DO SUL, 2000).**

## 4.6 MODELO DE SANTOS (2007)

Com o objetivo de avaliar de forma sistêmica as mudanças potenciais dos fluxos de água doce e salgada no sistema estuarino da Bacia do Rio Tramandaí, em face da dinâmica natural e da ação antrópica, Santos (2007) propôs a aplicação de um modelo de qualidade de água integrado com SIG, utilizando o balanço de massa da salinidade.

Santos (2007) se baseou Thomann e Mueller (1987), Hellweger (1997), Hellweger e Maidment (1997) e Quenzer (1998), para representar o sistema da Bacia do Rio Tramandaí através do programa BALANCE.

Primeiramente foram obtidos, através das cartas topográficas, os arquivos vetoriais das linhas e polígonos da hidrografia da área. Depois de efetuar algumas correções nos arquivos vetoriais, se iniciou a segmentação dos corpos de água determinados para a simulação, utilizando como critério a batimetria e os fluxos de água no sistema (entradas e saídas de rios e canais). Algumas lagoas e canais da bacia foram excluídos da modelagem, em virtude da falta de dados batimétricos e da pequena dimensão espacial.

Os dados de batimetria foram manipulados para compor as imagens de fundo dos polígonos. A área e a profundidade média de cada segmento foram calculadas em função da batimetria e das imagens dos polígonos (hidrografia). Com os dados das áreas e profundidades médias calculou-se o volume de cada segmento.

Dados pontuais de precipitação e evapotranspiração médios obtidos de estações climatológicas na bacia foram transformados em imagens, da mesma forma que foi feito para a batimetria. A evapotranspiração e a precipitação médias anuais foram multiplicadas pela área do respectivo segmento, e dividido pelo número de segundo do ano, a fim de obter os valores em unidades de fluxo. Utilizando essas imagens, foram retirados os valores de precipitação e evapotranspiração da imagem dos polígonos.

A linha de interface entre os polígonos, definida pelos pontos de maior profundidade, foi estabelecida por meio do comprimento da linha e seção representativa da interface. A profundidade média ao longo da seção foi definida utilizando a respectiva imagem da batimetria, e realizando cinco leituras ao longo da linha (no computador). A média destas leituras foi assumida como a profundidade média da interface. A área da seção resultou do produto entre o comprimento da linha e a sua profundidade média.

Para avaliação das vazões afluente em cada segmento, não foi possível utilizar dados empíricos, em virtude da insuficiência de dados – somente há uma estação fluviométrica operando na Bacia do Rio Tramandaí, a estação Maquiné, na encosta planáltica.

Assim, foram selecionados apenas os principais cursos de água que deságuam nas lagoas Itapeva e dos Quadros, uma vez que estes são as maiores contribuintes de água doce superficial para a bacia estudada – os rios: Maquiné, Três Forquilhas, Cardoso e Sanga Funda.

Para estimar as vazões médias anuais afluentes à Lagoa Itapeva, a partir dos rios Cardoso e Três Forquilhas, foram utilizados os dados de vazão média anual da Estação de Itati<sup>8</sup>. Através de regra de três simples, correlacionou-se a área das sub-bacias da estação fluviométrica com a das sub-bacias dos rios citados. Este mesmo método foi aplicado à estação Maquiné, para avaliar a vazão média anual afluente do Rio Maquiné e da Sanga Funda à Lagoa dos Quadros.

Para gerar os fluxos entre as linhas de interface dos segmentos, foi utilizada a fórmula  $Q = A.V$ , na qual o fluxo da interface ( $Q$ ) é dado pelo produto da área da seção transversal ( $A$ ) pela velocidade da corrente ( $V$ ).

As linhas de interface com os pontos de captação de água doce para abastecimento público, irrigação e dessedentação animal foram estabelecidos com base em PROFILL (2005a), que determinou as demandas de água da bacia do Rio Tramandaí em  $m^3$ /ano. Estes dados foram convertidos para  $m^3$ /s. Assim, somando-se as vazões de entrada dos rios, as vazões das linhas de interface que entram em cada segmento, e subtraindo-se as vazões de demanda de água, chega-se ao balanço preliminar. Salienta-se que a batimetria é o parâmetro utilizado como referencial para estabelecer o sentido do fluxo em cada segmento.

Para o cálculo do coeficiente de dispersão de maré nas linhas de interface influenciadas pela zona de mistura estuarina, utilizou-se o método da salinidade como traçador (equação 2.5). Os valores de salinidade necessários foram obtidos do monitoramento da qualidade da água do programa GERCO/FEPAM, que monitora, entre outros parâmetros, a salinidade, desde 1993. Então, para o cálculo do coeficiente de dispersão utilizou-se dados da campanha de verão de 2005, em decorrência dos elevados valores de salinidade registrados no sistema estuarino em foco.

---

<sup>8</sup> A estação fluviométrica Itati operou de 1963 a 1987. No entanto, há muitas lacunas no seu conjunto de dados. PROFILL (2005a) preencheu estas falhas, através dos dados da Estação de Maquiné, gerando dados das médias anuais de vazões para estas estações.

O resultado da segmentação dos corpos resultou num total de 55 polígonos (Figura 4.7), incluindo algumas ilhas presentes em algumas lagoas e canais.



**FIGURA 4.7 – BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TRAMANDAÍ, RS CONFORME A SEGMENTAÇÃO UTILIZADA POR SANTOS (2007).**

O modelo foi calibrado a partir dos dados de salinidade observada na campanha do verão de 2005 do GERCO/FEPAM, onde ajustes foram realizados nos dados de fluxo na fronteira com o mar, fluxos entre as linhas e/ou coeficiente de dispersão.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados os resultados da aplicação da metodologia proposta para a gestão integrada de bacias hidrográficas costeiras no estudo de caso, a bacia hidrográfica do Rio Tramandaí.

Foram criados três cenários: marco referencial, mudanças climáticas (que geram aumento e diminuição da vazão afluyente ao estuário) e de aumento da demanda de água na bacia, através do aumento em 50% da área de irrigação.

Posteriormente é discutido como utilizar estes cenários na aplicação de medidas de gestão baseadas na PNRH e no PNGC.

### 5.1 CENÁRIO DE MARCO REFERENCIAL

A primeira aplicação do modelo BALANCE na bacia do Rio Tramandaí foi feita para o cenário do marco referencial, onde não houve nenhuma alteração nas vazões de entrada e saída de água doce do estuário.

Nesta primeira rodagem, utilizou-se um *delta t* de 12hs, conforme sugerido por Hellweger (1997). Entretanto, o programa divergiu numericamente ao calcular a salinidade dos polígonos, alcançando uma salinidade superior a 53 ‰ em um polígono do sistema. No programa BALANCE, o limite imposto para a concentração de salinidade foi definida como sendo 50‰ (HELLWEGGER, 1997). Esta divergência atesta uma instabilidade numérica no modelo, isto ocorre porque há a entrada ou saída de grande massa de sal em algum polígono. Isto provoca uma diminuição ou um aumento da concentração nesta linha de interface, antes que na outra borda do segmento haja tempo para ajustar o fluxo de massa, ou seja, não há tempo suficiente para efetivar o balanço de massa em um segmento. Santos (2007) acredita que esta instabilidade, para os dados do estudo de caso, esteja associada ao segmento *trafoz* (último segmento do estuário do Rio Tramandaí – encontro com o oceano), que apresentou o pior resultado quando comparado à salinidade modelada com a medida.

Para tentar resolver o problema da instabilidade numérica, diminuiu-se o *delta t* para 6hs. Assim conseguiu-se acabar com o problema da instabilidade numérica, entretanto ao comparar a salinidade modelada com a medida, à salinidade modelada ficou muito menor do

que a medida, sugerindo que o  $\Delta t$  deve ser mantido em 12hs, apesar da divergência gerada. Logo, para todas as simulações realizadas foi utilizado um  $\Delta t$  de 12hs.

O resultado da situação padrão (marco referencial) é apresentado na Figura 5.1. Enfatiza-se que o modelo BALANCE representa uma situação média anual dos fluxos (evaporação, precipitação, vazão, maré, etc.).

## 2.1 CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Para estimar o comportamento da dinâmica da salinidade em face às mudanças climáticas, foi aplicada a metodologia de Mendes *et al.* (2010), já exposta no capítulo 3.

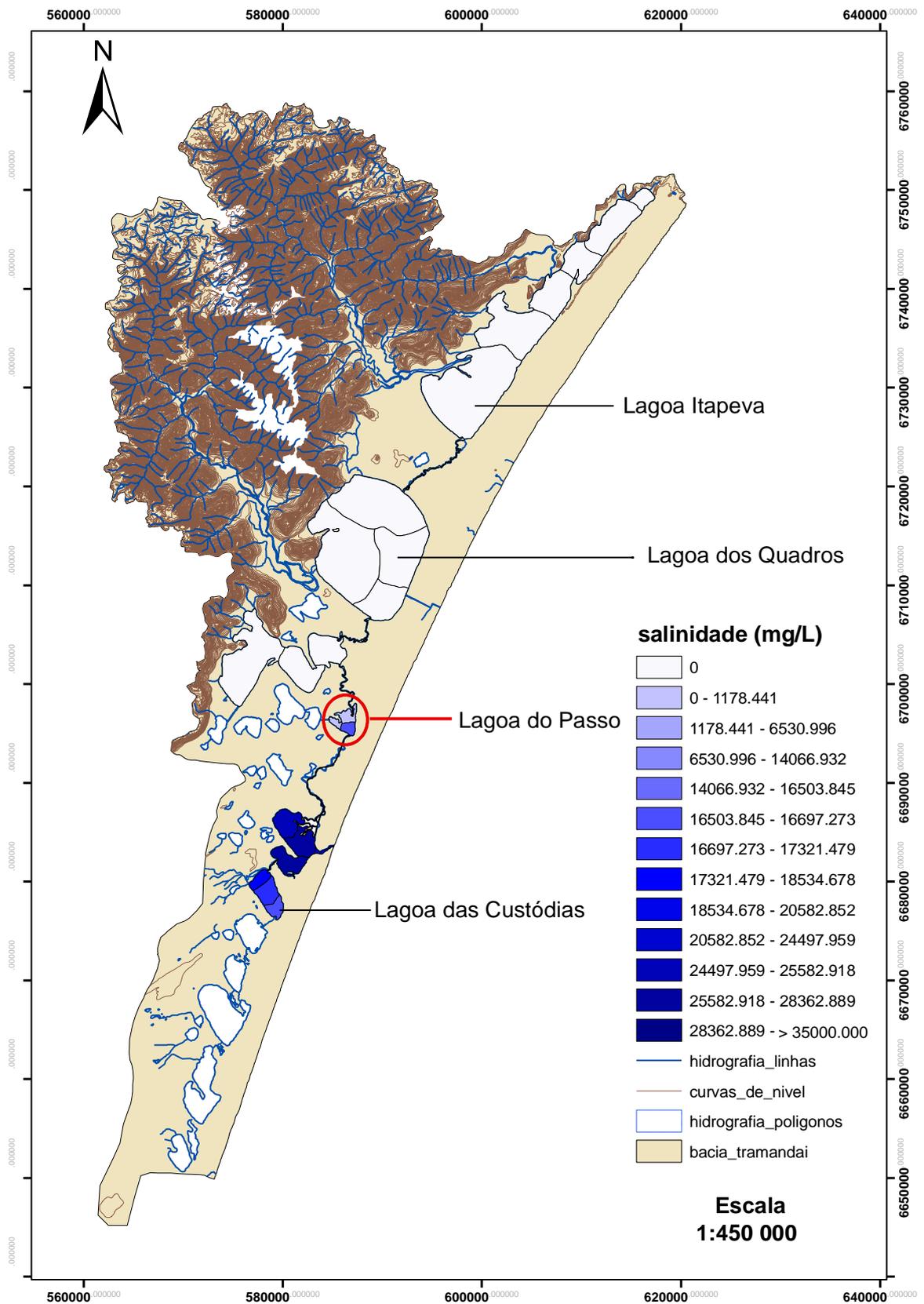
No estudo de caso, este procedimento foi feito para os dois principais rios que entram no sistema estuarino, os rios Três Forquilhas e Maquiné. A vazão inicial utilizada foi à mesma apresentada por Santos (2007) na representação da área em estudo, ou seja, 14,49m<sup>3</sup>/s e 15,16m<sup>3</sup>/s, respectivamente para o Rio Três Forquilhas e Maquiné.

A precipitação inicial utilizada também foi à apresentada por Santos (2007), que utilizou dados de estações pluviométricas para determinar a precipitação média anual na região, 1490mm. Com a área de drenagem da bacia de ambos os rios definiu-se a vazão média anual em unidade comum a precipitação (mm).

O resultado está apresentado nas Tabelas 5.1 (Três Forquilhas) e Tabela 5.2 (Maquiné).

**TABELA 5.1 – VAZÃO DO RIO TRÊS FORQUILHAS (M<sup>3</sup>/S) PARA DIFERENTES VALORES DE  $\alpha$  E  $\beta$ . EM NEGRITO A VAZÃO INICIAL, EM VERMELHO A SITUAÇÃO DE MAIOR SECA E EM AZUL A DE MAIOR CHEIA. EM AMARELO A SITUAÇÃO QUE REPRESENTA A DIMINUIÇÃO E O AUMENTO DE 20% DA VAZÃO AFLUENTE À BACIA.**

		$\alpha$ (PRECIPITAÇÃO)				
		0.8	0.9	1	1.1	1.2
$\beta$ (EVAPORAÇÃO)	0.8	11.59	14.16	16.73	19.30	21.87
	0.9	10.47	13.04	15.61	18.18	20.75
	1	9.35	11.92	14.49	17.06	19.63
	1.1	8.23	10.80	13.37	15.94	18.51
	1.2	7.11	9.68	12.25	14.82	17.39



**FIGURA 5.1 – REPRESENTAÇÃO DO MARCO REFERENCIAL, SITUAÇÃO PADRÃO NA BACIA DO RIO TRAMANDAÍ.**

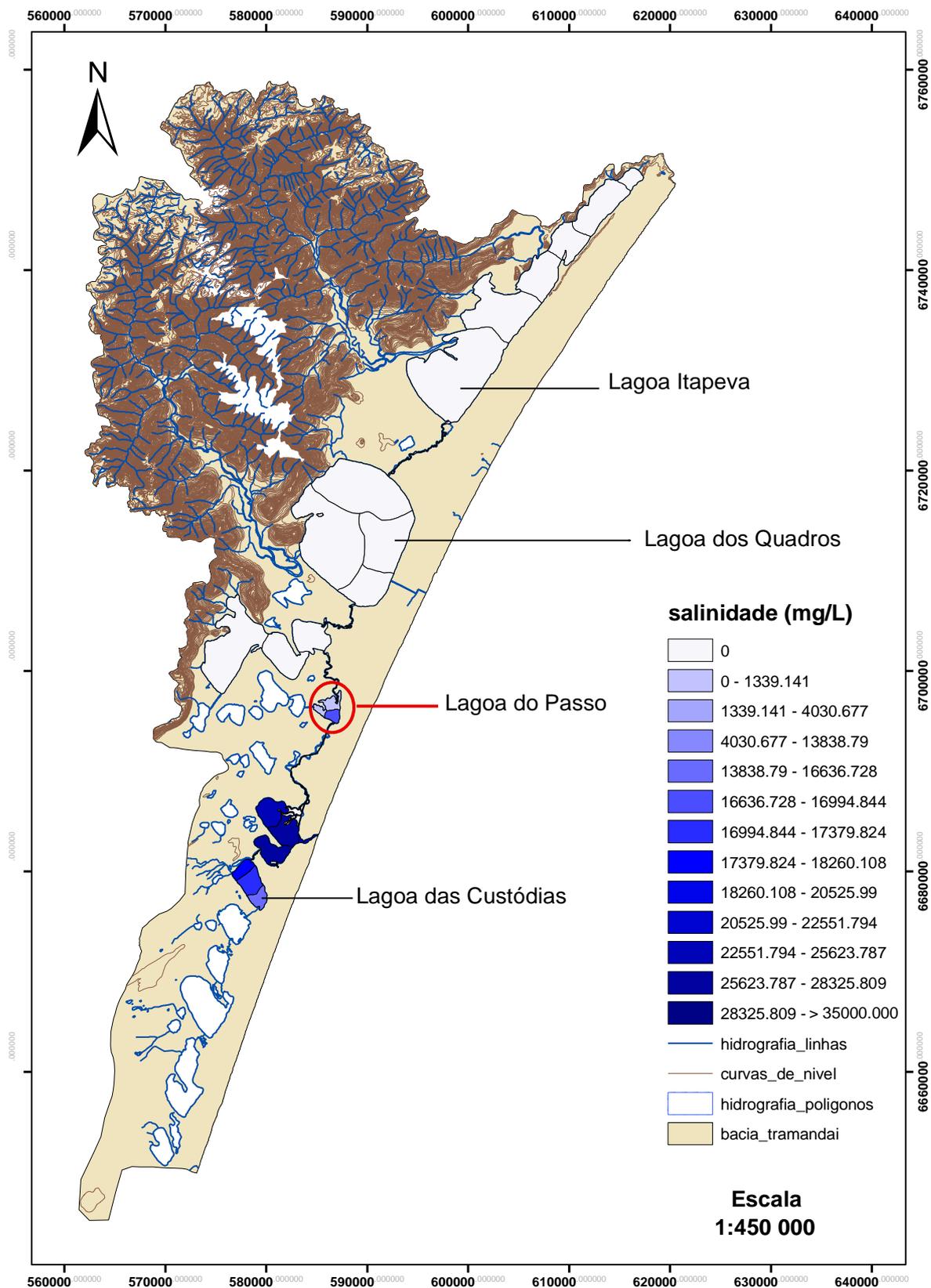
Com base nos resultados obtidos, observou-se que o cenário de maior escassez hídrica, para ambos os rios, diminui a vazão afluente em torno 50%; assim como o de maior cheia, aumentou a vazão afluente em torno de 50%. Logo, devido à falta de dados sobre todos os rios afluentes ao sistema estuarino, foi feita a extrapolação para todas as outras vazões, aumento de 50% e diminuição de 50% na vazão afluente aos segmentos. Isto foi feito mudando a vazão afluente nas linhas de interface do modelo que apresentam o aporte dos rios.

**TABELA 5.2 – VAZÃO DO RIO MAQUINÉ (M<sup>3</sup>/S) PARA DIFERENTES VALORES DE  $\alpha$  E  $\beta$ . EM NEGRITO A VAZÃO INICIAL, EM VERMELHO A SITUAÇÃO DE MAIOR SECA E EM AZUL A DE MAIOR CHEIA. EM AMARELO A SITUAÇÃO QUE REPRESENTA A DIMINUIÇÃO E O AUMENTO DE 20% DA VAZÃO AFLUENTE À BACIA.**

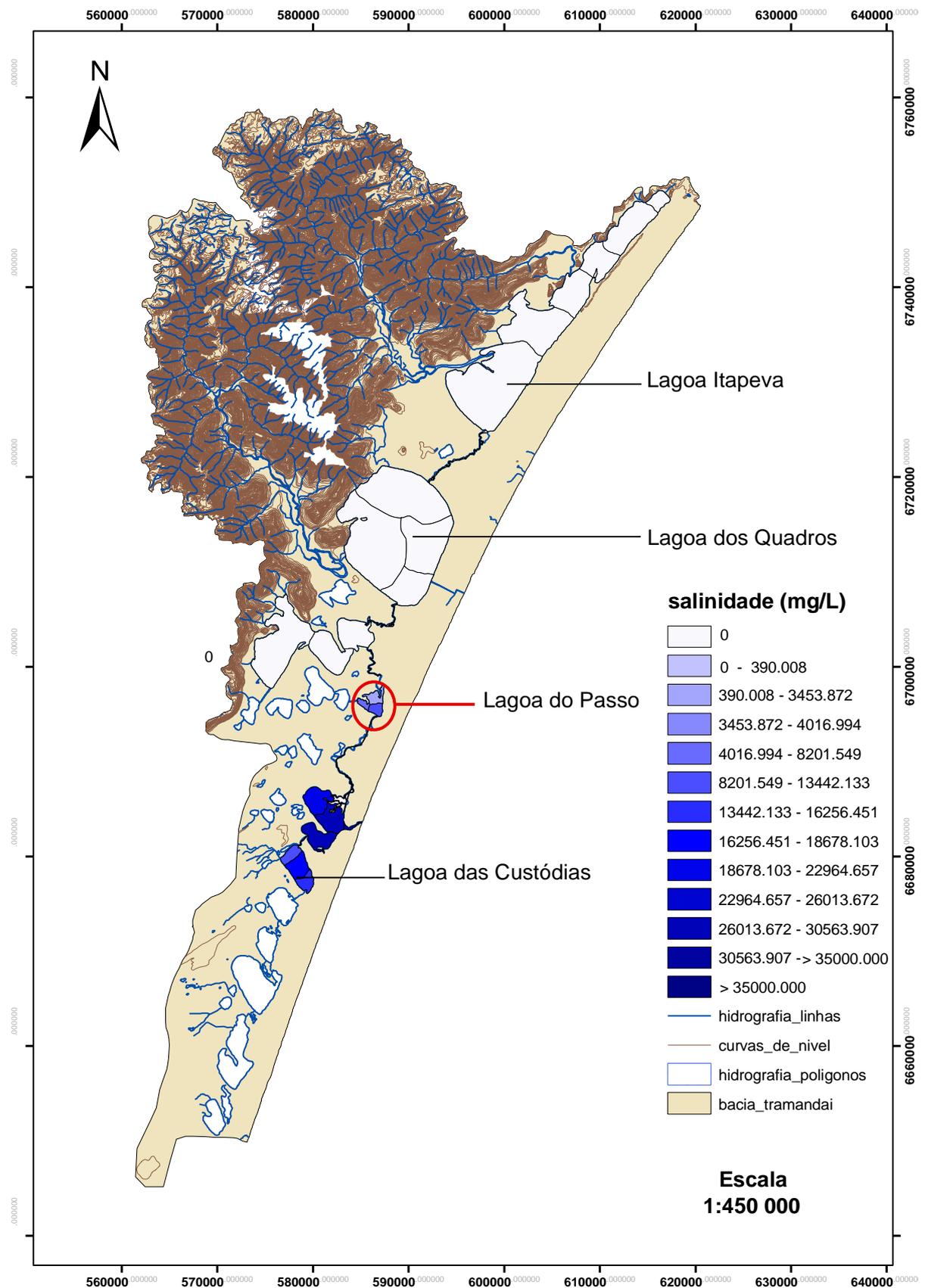
		$\alpha$ (PRECIPITAÇÃO)				
		0.8	0.9	1	1.1	1.2
$\beta$ (EVAPORAÇÃO)	0.8	12.13	14.69	17.26	19.83	22.40
	0.9	11.08	13.64	16.21	18.78	21.34
	1	10.03	12.59	15.16	17.73	20.29
	1.1	8.98	11.54	14.11	16.68	19.24
	1.2	7.92	10.49	13.06	15.63	18.19

Entretanto, devido à instabilidade numérica do modelo com as variações positivas e negativas de 50% na vazão, que gerou resultados sem significado físico, optou-se por utilizar variações nas vazões da ordem de 20% (valores em amarelo nas Tabelas 5.1 e 5.2). Esta variação de menos 20% na vazão representa a situação onde a precipitação e a evapotranspiração diminuem 20%. A variação de mais 20% da vazão representa um cenário de aumento da precipitação e da evapotranspiração em 20%. Da mesma maneira, essa variação positiva e negativa de 20% da vazão foi extrapolada para os outros rios afluentes às lagoas costeiras.

Para aplicar o BALANCE, para o cenário de mudanças climáticas, modificou-se a vazão de entrada nas linhas que representam os rios. O resultado obtido, para a situação de aumento da vazão de ambos os rios é apresentado na Figura 5.2, e para diminuição destas vazões na Figura 5.3.



**FIGURA 5.2 – MODELAGEM DO CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GERANDO AUMENTO DA VAZÃO AFLUENTE AO SISTEMA ESTUARINO EM 20%.**



**FIGURA 5.3 – MODELAGEM DO CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS GERANDO A DIMINUIÇÃO DA VAZÃO AFLUENTE AO SISTEMA ESTUARINO EM 20%.**

## 2.2 CENÁRIO DE AUMENTO DA DEMANDA DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

Considerando que o principal uso da água na área adjacente ao estuário do Rio Tramandaí é a irrigação, foi utilizado este uso para servir como base para simular uma situação de aumento da demanda de água.

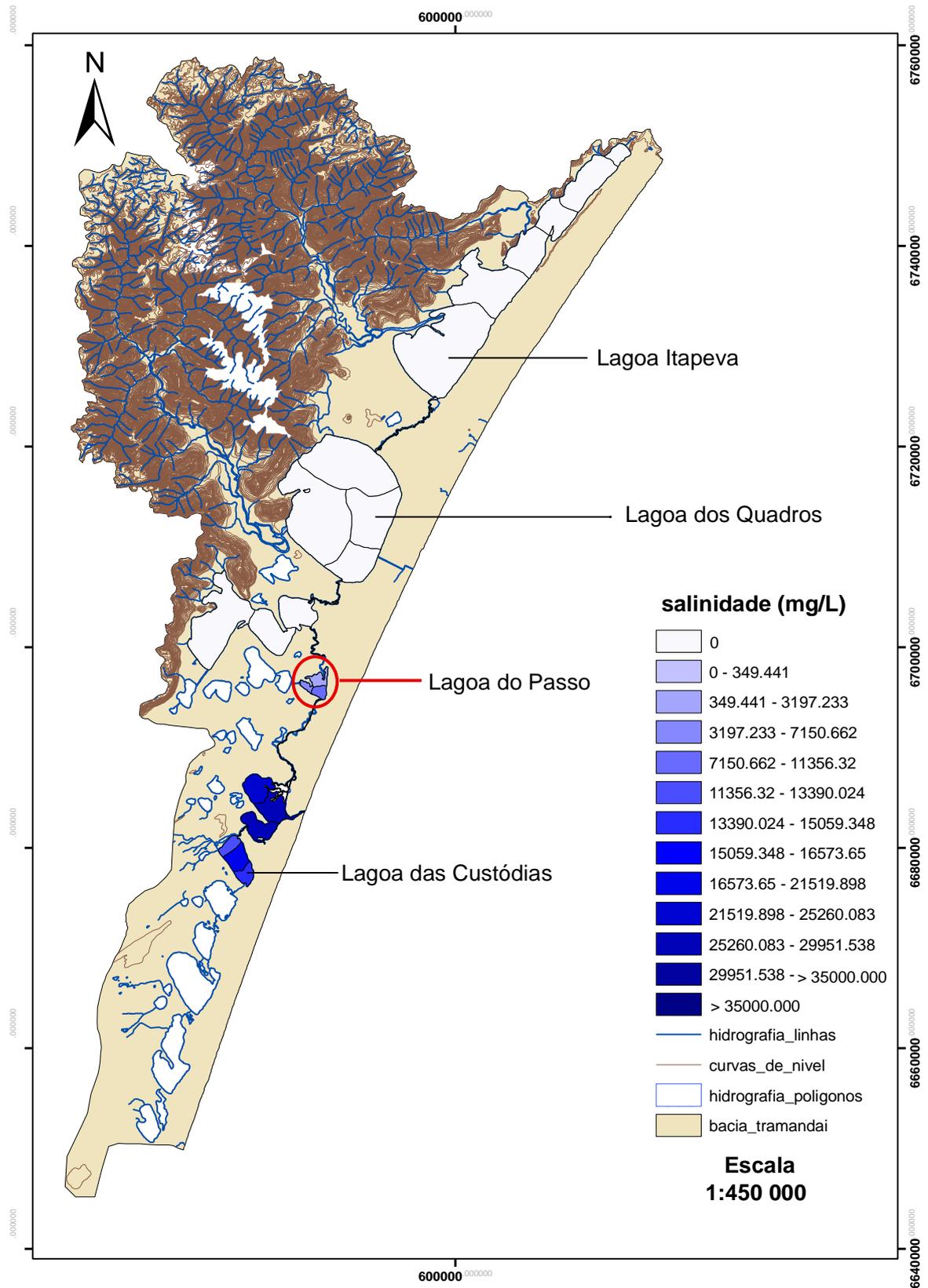
Para tanto, foi utilizada a base dos dados de entrada de Santos (2007), como fonte de demanda para irrigação. Considerou-se na variação da demanda de irrigação apenas a orizicultura, visto que é a cultura predominante na região.

Tradicionalmente, no estado do RS a necessidade média de água para a irrigação de arroz é de 2L/s.ha. Solos arenosos ou com maior gradiente de declividade necessitam de vazões maiores. Estima-se que, na bacia em questão, a demanda específica seja de 12.960 a 17.280m<sup>3</sup>/ha/safra (PROFILL, 2005b).

Utilizando a demanda para irrigação apresentada por Santos (2007) de 34.655.040m<sup>3</sup> por safra (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março) (2,674m<sup>3</sup>/s), e a média entre os valores recomendados de demanda específica para orizicultura (15.120m<sup>3</sup>/ha/safra), estima-se que a área de cultivo de arroz que utiliza água das lagoas e canais considerados no modelo seja de 2292ha.

Dobrando a área de arroz irrigado, ou seja, 4584ha, a demanda de água das lagoas será de 69.310.080m<sup>3</sup>. Considerando que 80% desta demanda é utilizada nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (PROFILL, 2005b), e que este é o período de maior estresse hídrico na bacia, utilizou-se 0,8 da demanda total concentrada em 3 meses para a conversão de m<sup>3</sup>/ano para para m<sup>3</sup>/s, para utilizar no modelo, resultando uma vazão de demanda de 7,13m<sup>3</sup>/s.

Estes dados foram colocados no modelo diretamente, apenas aumentando os valores das saídas de água nas linhas de interface do modelo, que representam a demanda para irrigação. O resultado obtido e apresentado na Figura 5.4.



**FIGURA 5.4 – MODELAGEM DO CENÁRIO DE AUMENTO DA DEMANDA DE IRRIGAÇÃO (AUMENTO DA ÁREA PLANTADA DE 2292HA PARA 4585HA).**

## 2.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para melhor representação e comparação dos resultados dos cenários da dinâmica da salinidade, a área de análise foi reduzida, concentrando o estudo no estuário. A delimitação do estuário do Rio Tramandaí foi feita baseada na própria definição de estuário e no resultado dos cenários. Assim, o estuário do Rio Tramandaí foi definido pelos corpos hídricos que apresentaram salinidade maior que 0,5‰.

Como a bacia do Rio Tramandaí apresenta dois subsistemas (norte e sul), com a conexão com o oceano entre os dois, o estuário também foi dividido em subsistema norte e sul (Figura 5.5), pois existem dois gradientes de salinidade, um em direção ao norte e outro em direção ao sul.

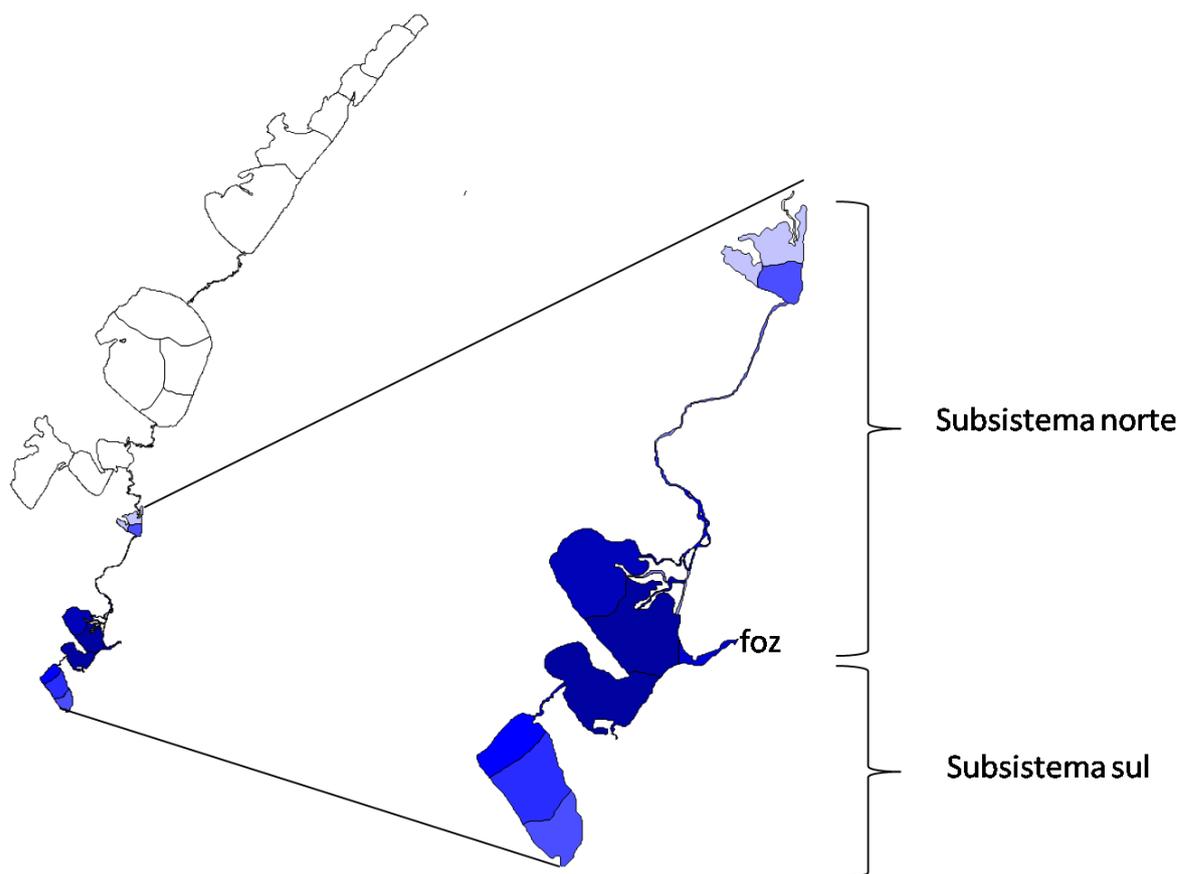


FIGURA 5.5 – SUBDIVISÃO DO ESTUÁRIO DO RIO TRAMANDAÍ E A LOCALIZAÇÃO DA FOZ.

Para representar o resultado da simulação dos cenários, os corpos hídricos dos dois subsistemas foram numerados, desde a foz (conexão com o oceano) até o último corpo com água salobra. A partir desta numeração, foram feitos gráficos da salinidade dos corpos, gradativamente desde a foz até o limite interior do estuário, tanto para sul como para norte (Figuras 5.6 e 5.7).

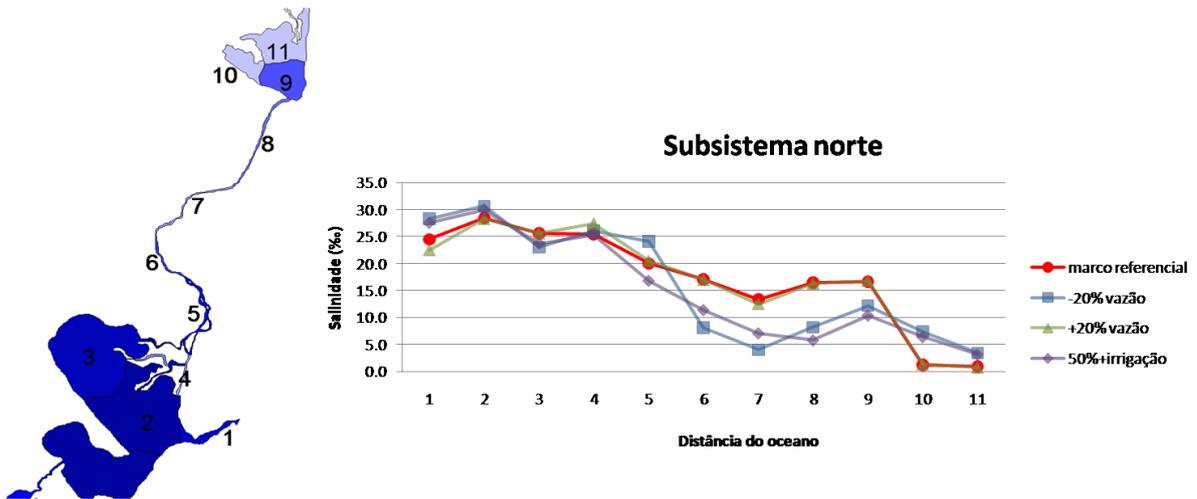


FIGURA 5.6 – SALINIDADE DOS CORPOS HÍDRICOS DO SUBSISTEMA NORTE DO ESTUÁRIO DO RIO TRAMANDAÍ.

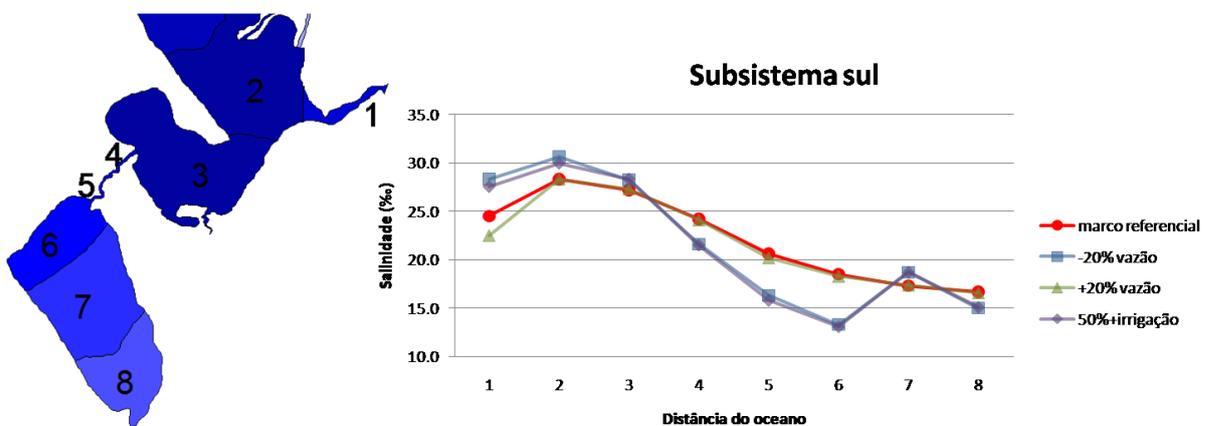


FIGURA 5.7 – SALINIDADE DOS CORPOS HÍDRICOS DO SUBSISTEMA SUL DO ESTUÁRIO DO RIO TRAMANDAÍ.

Nas figuras 5.6 e 5.7, observa-se uma diferença entre a situação padrão (marco referencial) em vermelho e os outros cenários, esta diferença representa o impacto ambiental que as diferentes condições (cenários) geraram na bacia do Rio Tramandaí.

Ao analisar o impacto dos cenários na bacia, tanto no subsistema norte como sul, a situação de aumento da vazão afluente à bacia (devido a variações climáticas) em 20% gera um impacto muito pequeno, ou seja, a diferença entre a salinidade do cenário padrão e esse é pequeno.

O impacto dos outros dois cenários (seca – diminuição da vazão afluyente em 20% – e de aumento da área irrigada) é muito semelhante. No subsistema sul, a aproximação entre os resultados de ambos é maior. No subsistema norte, a variação entre os cenários ocorre principalmente nos segmentos 5, 6, 7, que correspondem ao Rio Tramandaí.

Tanto no subsistema norte como sul, há uma diminuição inesperada de salinidade nas duas condições de diminuição da vazão afluyente de água doce (situação de seca e de aumento da área irrigada), para os corpos hídricos que representam rios Tramandaí – subsistema norte – e Camarão – subsistema sul. Essa situação não apresenta significado físico, pois a diminuição da vazão afluyente de água doce diminui os níveis das lagoas, causando maior intrusão salina.

Para explicar essa anomalia, analisou-se a relação entre a salinidade simulada pelo modelo no marco referencial e a salinidade medida. Os dados brutos, assim como a correlação entre a salinidade medida e simulada, são apresentados no anexo C desta dissertação. Nas figuras 5.8 e 5.9 são apresentados os gráficos com as salinidades medidas e as simuladas para o cenário do marco referencial para o subsistema norte e sul, respectivamente.

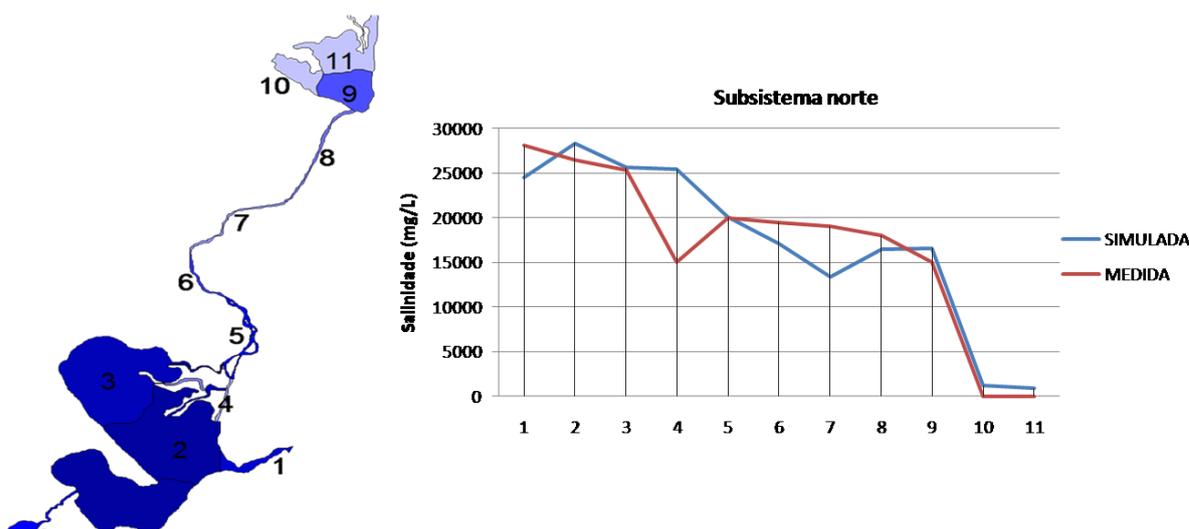


FIGURA 5.8 – DIFERENÇA ENTRE A SALINIDADE MEDIDA E A SIMULADA PARA O SUBSISTEMA NORTE.

No subsistema norte há uma grande variação do padrão de salinidade, sendo que, em alguns pontos, há tendências diferentes entre a salinidade simulada e a medida (pontos 1, 4 e 7). Estes pontos representam a Barra do Tramandaí (ponto 1), e o Rio Tramandaí (pontos 4 e 7). Santos (2007) relata que o polígono *trazfoz* (que representa a Barra do Tramandaí) possui o maior erro modelado de todos os polígonos do modelo e pode estar associado à instabilidade numérica do modelo. Nos polígonos do Rio Tramandaí, apesar da salinidade não apresentar o

mesmo padrão na simulação e na medição, alguns pontos (5 e 8) apresentam valores de salinidade bem próximos.

Nos polígonos que representam a Lagoa do Passo (pontos 9, 10 e 11), a simulação apresenta valores levemente maiores que a medição, porém seguindo o mesmo padrão. Esse fato atesta a eficiência da representação do modelo para esse corpo hídrico.

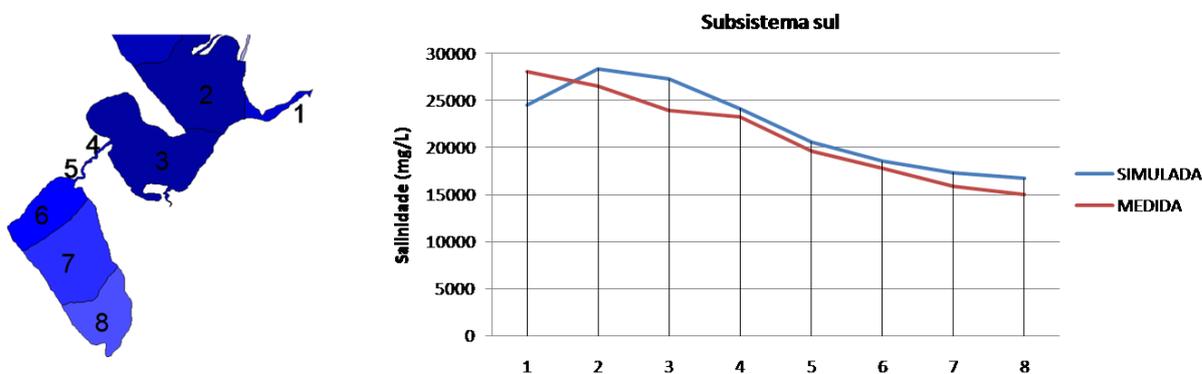


FIGURA 5.9 – DIFERENÇA ENTRE A SALINIDADE MEDIDA E A SIMULADA PARA O SUBSISTEMA SUL.

A discrepância entre a salinidade simulada e a medida no subsistema sul é bem menor. Neste, a salinidade medida e a simulada apresentam o mesmo padrão, com valores ligeiramente maiores de salinidade na simulação. Apenas o ponto 1 (segmento da Barra do Tramandaí, em comum com o subsistema norte) apresenta comportamento distinto, sendo a salinidade simulada menor que a medida. Santos (2007) justifica o resultado ótimo do subsistema sul em virtude dos menores aportes de água doce e da hidrodinâmica menos intensa.

Devido ao menor aporte de água doce e a hidrodinâmica menos intensa, no subsistema sul, a salinidade não varia muito em cada cenário. Além disso, a água dos corpos hídricos desse subsistema é sempre salobra, e os usuários estão adaptados essa condição de salinidade. Por esse motivo, o foco da análise da dinâmica da salinidade, visando subsídios à gestão integrada, não será o subsistema sul.

A parte sul do estuário é representada no modelo apenas pela Lagoa das Custódias. Apesar de ter ocorrido um aumento na salinidade nesta lagoa, se comparado o cenário do marco referencial com aumento de demanda e diminuição da vazão afluyente, esta lagoa possui águas naturalmente salobras (com salinidade variando entre 15 e 18‰) (Figura 5.1), devido à pequena afluência de água doce. No enquadramento dos corpos d'água da bacia do Rio Tramandaí, está lagoa foi classificada com Classe I de águas salobras. Nesta lagoa, não há

grande demanda de água, apenas pequenos pontos de captação de água para irrigação nos arroios afluentes ao estuário.

No subsistema norte, tanto os usuários como a FEPAM, consideram que os corpos do Rio Tramandaí (números 4, 5, 6, 7 e 8 da Figura 5.8) e da Lagoa do Passo (números 9, 10 e 11 da Figura 5.8) são de água doce, o que nem sempre acontece. Logo, para a análise da dinâmica da salinidade foi dado ênfase na Lagoa do Passo, local de conflito pelo uso da água na bacia e limite interior do estuário no subsistema norte. Nessa lagoa, os usos devem estar adaptados à variação da salinidade, mas este manancial é utilizado para dois importantes usos consuntivos na bacia: abastecimento público e irrigação.

Assim, a Figura 5.10 apresenta a concentração da salinidade nos três segmentos da Lagoa do Passo, para os diferentes cenários. Em todos os cenários, o efeito da salinidade é sentido até esta lagoa, apenas variando a concentração de sais em cada um.

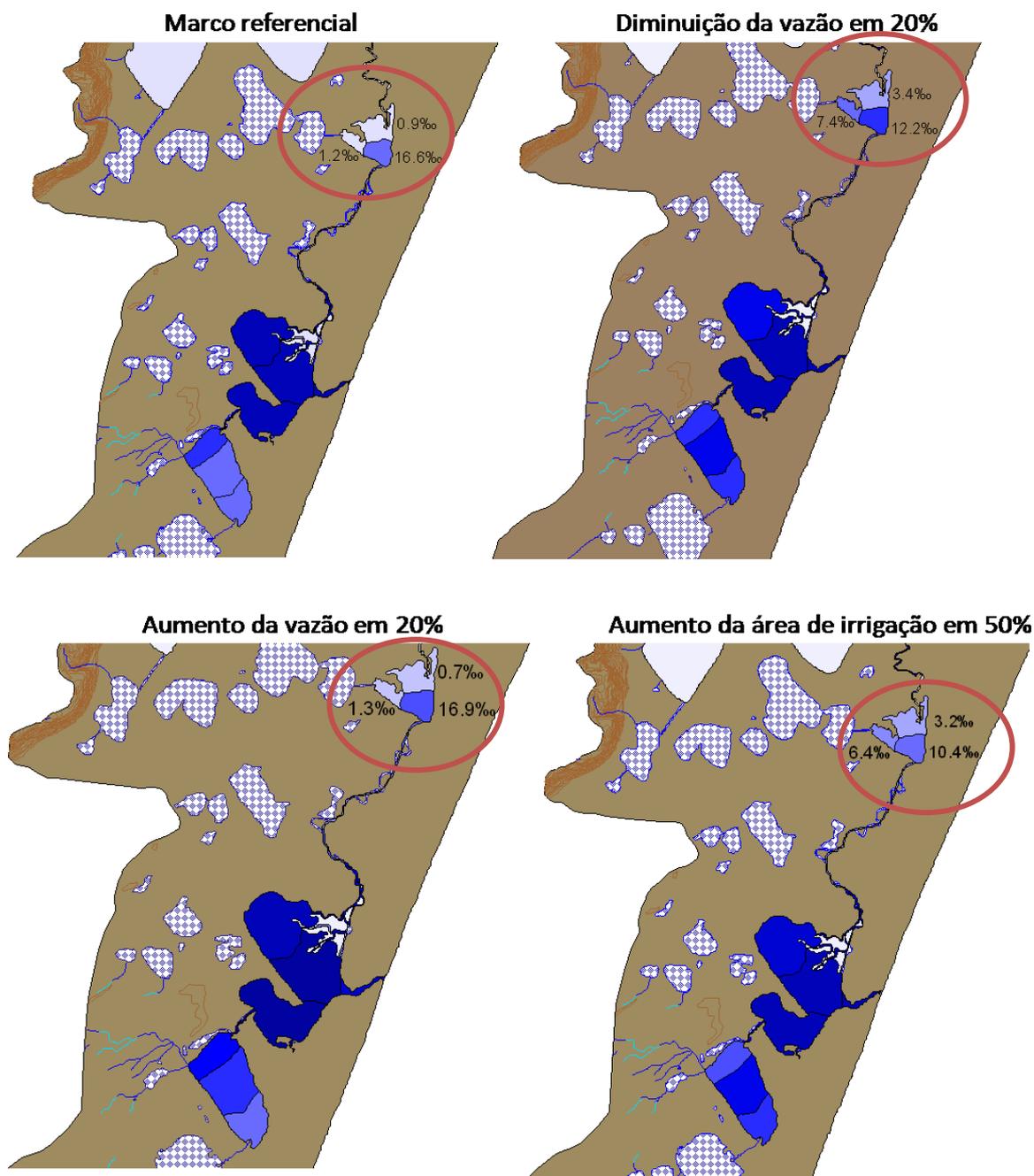
Considerando o resultado do balanço de massa para a Lagoa do Passo, apresentado na Figura 5.10, obtém-se, para o cenário do marco referencial é 0,9; 1,2 e 16,6‰ (Figura 5.1), respectivamente para o segmento superior direito, superior esquerdo e inferior da referida lagoa. No cenário de mudanças climáticas de seca a salinidade fica 3,4; 7,4 e 12,2‰ (Figura 5.3), respectivamente para os mesmos segmentos; e no de cheia fica 0,7; 1,3 e 16,9‰ (Figura 5.2). No cenário de aumento da área irrigada os valores são 3,2; 6,4 e 10,4‰ (Figura 5.4).

No segmento inferior da Lagoa do Passo, a salinidade se comporta de maneira diferente do esperado, aumentando quando há aumento da vazão de água doce e diminuindo com a diminuição do aporte de água doce.

Santos (2007) mencionou este evento, explicando que isto pode ocorrer devido a uma maior dispersão de sais na linha de fronteira do segmento inferior da Lagoa do Passo, ponto que apresenta uma retirada de água para irrigação. Assim, este ponto pode estar retirando sais da lagoa, diminuindo a concentração da salinidade. Se este processo se tornar contínuo ao longo do tempo, pode representar um problema para os irrigantes, visto que os sais vão acumular no solo, tornando-o improdutivo.

Entretanto, considerando a base teórica e as premissas consideradas por Hellweger (1997) no modelo BALANCE, a explicação de Santos (2007) pode não ser aplicável. Como o modelo não considera sumidouros nem fontes de salinidade além do próprio oceano, essa situação não

possui significado físico, sendo uma instabilidade do modelo. A instabilidade é observada apenas em um segmento da Lagoa do Passo, segmento este que possui linhas que apresentam saída de água (demanda). Nos outros segmentos, a instabilidade não ocorre.

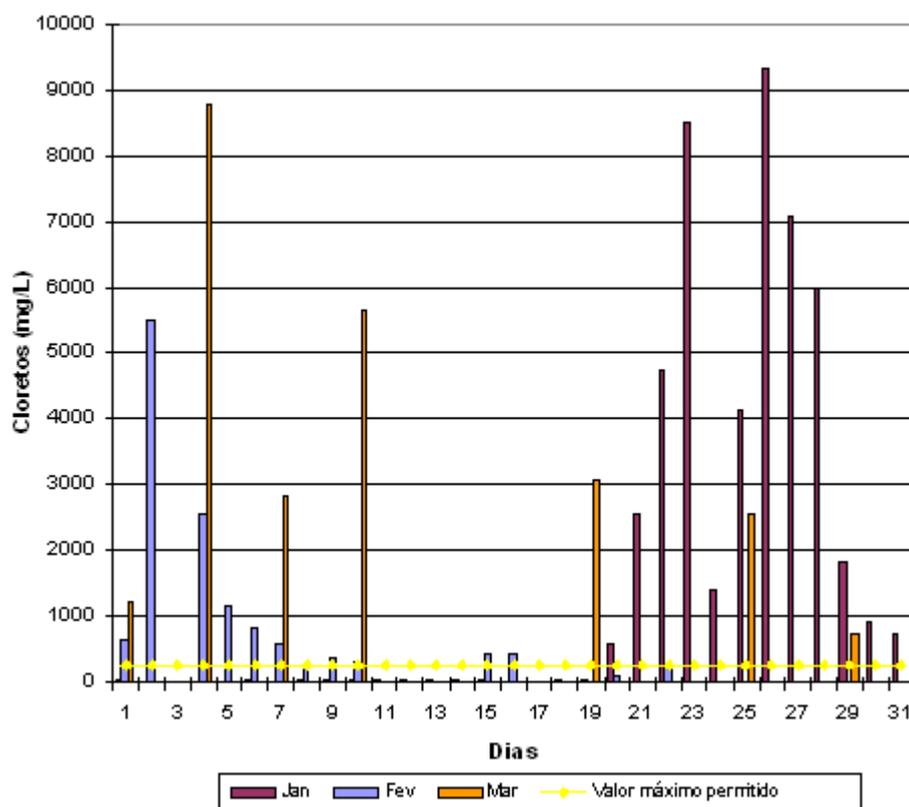


**FIGURA 5.10 – LAGOA DO PASSO (EM VERMELHO) NOS CENÁRIOS TESTADOS COM AS RESPECTIVAS SALINIDADES. A GRADAÇÃO DA SALINIDADE É REPRESENTADA PELA COR AZUL: MAIOR SALINIDADE MAIS FORTE AZUL.**

Analisando o comportamento da salinidade na Lagoa do Passo (dos segmentos sem instabilidade), surge um impasse: ao mesmo tempo em que o modelo de balanço de massa

define a Lagoa como sendo um corpo de água salobra (salinidade entre 0,5 e 30‰), esta é considerada como um ecossistema dulcícola classe I pelo enquadramento (SANTOS, 2007).

A Estação de Tratamento de Água da CORSAN, localizada no segmento superior direito da Lagoa do Passo (Figura 5.10), que monitora diariamente, entre outros, os teores de cloretos, atesta a recorrente intrusão salina neste corpo de água (Figura 5.11). Na forte estiagem ocorrida nos anos de 2004 e 2005 no RS, a captação neste manancial precisou ser interrompida, em virtude dos níveis de cloretos muito acima do permitido.



**FIGURA 5.11 – GRÁFICO DOS TEORES DE CLORETOS ENCONTRADOS NO VERÃO DE 2005, NA ESTAÇÃO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA CORSAN, LAGOA DO PASSO.**

(FONTE: SANTOS, 2007).

A FEPAM, também realiza, desde 1993, o monitoramento da qualidade da água dos recursos hídricos superficiais da Região das Bacias Litorâneas, incluindo a Bacia do Rio Tramandaí. As coletas de água são de superfície, com frequência semestral, sendo uma amostragem na época de cheia e outra no período de estiagem. Entre os parâmetros analisados encontra-se a salinidade. A localização dos pontos amostrados no limite interior do estuário do Rio Tramandaí é apresentada na Figura 5.12 (RIO GRANDE DO SUL, 2010).

O monitoramento da FEPAM apresenta algumas limitações. A frequência amostral é de apenas 2 vezes ao ano, enquanto que a dinâmica dos corpos hídricos do sistema lagunar varia consideravelmente ao longo do ano. As amostragens são feitas em superfície, enquanto que a salinidade entra no estuário em forma de uma cunha salina em que a salinidade é maior no fundo e menor em superfície.

Apesar das limitações do monitoramento da FEPAM, que deve subestimar os valores de salinidade no estuário, os dados se mostram condizentes com o resultado do balanço de massa e são uma comprovação da boa representação da dinâmica na salinidade na bacia do Rio Tramandaí através do modelo utilizado.



**FIGURA 5.12 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DO GERCO/FEPAM NO LIMITE DO ESTUÁRIO DO RIO TRAMANDAÍ.**

O resultado do monitoramento dos pontos GER 13, GER 14 e GER 15, durante os anos de 1993 a 2009, estão apresentados na Tabela 5.3. Estes dados comprovam o resultado do modelo, que o limite da intrusão salina é a Lagoa do Passo e que o Rio Tramandaí é afetado pela intrusão salina.

O ponto a montante da Lagoa do Passo (GERCO 13) que apresentou salinidade zero em todas as campanhas, inclusive nas campanhas de 2005, evidencia que o limite do interno do estuário é a Lagoa do Passo.

**TABELA 5.3 – DADOS DE SALINIDADE (EM %) DO MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA DO GERCO/FEPAM.**

	<b>GER 13</b>	<b>GER 14</b>	<b>GER 15</b>
<b>DEZ/93</b>	0	0	8
<b>SET/94</b>	0	0	0
<b>AGO/95</b>	0	0	1
<b>MAR/97</b>	0	0	9
<b>FEV/MAR 1998</b>	0	0	0.5
<b>JUL/AGO 1998</b>	0	0	4.5
<b>FEV/MAR 1999</b>	0	0	7.2
<b>JUL/AGO 1999</b>	0	0	15.1
<b>FEV/MAR 2000</b>	0	0	0
<b>JUL/AGO 2000</b>	0	0	14.5
<b>FEV/MAR 2001</b>	0	0	0.15
<b>JUL/AGO 2001</b>	0	0	0.5
<b>FEV/MAR 2002</b>	0	0	9.6
<b>JUL/AGO 2002</b>	0	0	0.1
<b>FEV/MAR 2003</b>	0	0	9.9
<b>JUL/AGO 2003</b>	0	0	0.9
<b>JUL/AGO 2004</b>	0	0	22.2
<b>FEV/MAR 2005</b>	0	8.7	25.3
<b>JUL/AGO 2005</b>	0	0.6	26.4
<b>FEV/MAR 2006</b>	0	0	1.4
<b>JUL/AGO 2006</b>	0	0	0
<b>FEV/MAR 2007</b>	0	0	0
<b>JUL/AGO 2007</b>	0	0	0.5
<b>FEV/MAR 2008</b>	0	0	2.3
<b>JUL/AGO 2008</b>	0	0	5.6
<b>FEV/MAR 2009</b>	0	0	1.8

(FONTE: RIO GRANDE DO SUL, 2010).

Nos segmentos superiores a Lagoa do Passo (subsistema norte), como a Lagoa dos Quadros e Itapeva, a influência da salinidade é nula em todos os cenários simulados (Figuras 5.1 a 5.4). Os dados do monitoramento da FEPAM também comprovaram o resultado do balanço de massa. Este fato indica que estes são corpos de água doce e que não há efeito da limitação da disponibilidade hídrica devido à salinidade. Se houver um aumento considerável do nível do mar, esta situação poderia mudar. Entretanto, o aumento do nível do mar modificaria toda a hidrografia do sistema estuarino, não sendo possível simular está condição com o modelo utilizado, sendo necessários novos dados de entrada.

O complexo Lagoa Armazém – Tramandaí (Figura 4.2) compreende a região estuarina próximo da interface com o oceano, com salinidade mais altas do que em qualquer outra lagoa da bacia do Rio Tramandaí. Neste local, classificado pela FEPAM com Classe I de águas salobras, não há demanda para usos em que a salinidade é uma limitação. As principais atividades desenvolvidas utilizando os recursos hídricos nestas lagoas são lazer e pesca, não havendo demanda registradas para uso consuntivo. Logo, nas Lagoas Armazém e Tramandaí não são utilizadas para o estabelecimento de medidas de gestão para a problemática da limitação do uso da água devido à salinização.

Considerações devem ser feitas com relação às limitações do modelo utilizado. As ressacas (*storm surges*) são componentes oceânicas na zona costeira de grande relevância na intrusão salina na bacia do Rio Tramandaí, e não são contempladas no modelo. Ao utilizar médias anuais, tanto de precipitação, evapotranspiração, vazão e marés, as ressacas não entram no balanço de massa, por atuarem durante um intervalo de tempo determinado (alguns dias).

A ação dos ventos é outro fator que não é considerado pela modelagem, apesar de ser um fator determinante no escoamento do sistema lagunar.

Numa condição de ressaca, em conjunto com a ação do vento, pode ocorrer o represamento de água doce dentro do estuário, sendo que a intrusão salina pode ser marcante, afetando a disponibilidade hídrica no estuário.

## **2.4 MEDIDAS PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA DO RIO TRAMANDAÍ**

A PNRH e o PNGC preveem instrumentos a serem aplicados no planejamento e gestão dos recursos naturais e hídricos (já mencionados). Numa área estuarina, alguns destes instrumentos em especial podem ter um papel fundamental para gerenciar um recurso que tem se tornado escasso e essencial como a água.

No caso em estudo, observou-se que situações que diminuem a vazão de saída de água doce, maior consumo ou situações de mudanças climáticas, geram aumento na salinidade dos corpos lagunares, especialmente no limite interior do estuário, a Lagoa do Passo.

Este aumento na salinidade pode comprometer os usos da água. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), o abastecimento público não pode ser feito com salinidade superior a 1‰, senão sistema de dessalinização será necessário para tornar a água potável, o que torna

o tratamento de água muito mais caro e trabalhoso. Para irrigação, muitas vezes as culturas possuem certa tolerância à salinidade, no caso do arroz, por exemplo, a tolerância é de até 2,5‰ (ABAI, 1997), porém o solo não. Quando a água com alguma salinidade é introduzida no solo, esta infiltra juntamente com os sais. Quando ocorre um movimento ascendente de água no solo, os sais são levados até a superfície do solo, onde são acumulados. A planta desenvolvida em solo salino tem dificuldade de absorver nutrientes. Com o aumento da salinização, a terra pode se tornar improdutivo, com o solo degradado, e ser abandonada. A dessedentação animal não pode ser realizada com água salobra (salinidade acima 0,5‰) e o uso industrial também pode ser limitado devido à salinidade.

Assim, o principal conflito a ser gerenciado é a diminuição do recurso hídrico doce, devido à intolerância do usuário a concentrações de salinidade superiores a um determinado limite. Logo, os instrumentos mais aplicáveis a esta situação são os da PNRH, visto que esta procura manter a qualidade e quantidade do corpo de água, contemplando os múltiplos usuários. De certa forma, a essência do problema é a escassez de água doce, considerando a interligação entre os ambientes continental, costeiro e marinho.

O PNGC, apesar de priorizar a qualidade do ambiente costeiro e a biota, apresenta alguns instrumentos que podem ser aplicados na situação de escassez hídrica devido à ação marinha, principalmente o zoneamento ecológico-econômico costeiro e os planos de gerenciamento costeiro, estes interconectados com os instrumentos da PNRH, como a outorga, o enquadramento dos corpos de água e os planos de recursos hídricos.

Com os resultados obtidos para os cenários, a primeira medida para o planejamento e gestão seria analisar os instrumentos das PNRH e PNGC e a aplicabilidade destes na área estuarina. Algumas medidas complementares muitas vezes são necessárias, visto a especificidade do ambiente costeiro, para a aplicação da integração entre a bacia hidrográfica e a zona costeira.

## 2.4.1 APLICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO

### 2.4.1.1 ENQUADRAMENTO DOS CORPOS DE ÁGUA

O enquadramento dos corpos de água da Bacia do Rio Tramandaí foi concluído em 2009, como parte do plano de bacia. Neste enquadramento, a Lagoa do Passo e o Rio Tramandaí foram classificados como classe I e II de água doce (Figura 4.5), respectivamente, não considerando como área estuarina estes dois corpos de água.

Observado os dados do modelo de balanço de salinidade, e os dados de Santos (2007), a salinidade apresenta valores maiores do que 0,5‰, nesses dois corpos, devendo, portanto, ser considerada como água salobra, de acordo com a Resolução CONAMA Nº 357/2005.

No RS, a Lei Estadual Nº 10.350/1994, que define a Política Estadual de Recursos Hídricos, determina que o enquadramento deva ser proposto pelo comitê de bacia. Assim, com base na Resolução CONAMA Nº 357/2005, o comitê pode estabelecer novas medidas para o enquadramento. Na bacia do Rio Tramandaí já existe (conforme o item 4.5) uma proposta de enquadramento, entretanto ainda não foi oficializada.

A salinidade pode ser introduzida com um parâmetro para monitoramento dos corpos de água costeiros – estuarinos, assim como é a DBO<sub>5</sub>, o oxigênio dissolvido, etc., principalmente em alguns corpos hídricos da bacia do Rio Tramandaí, onde esta variável pode limitar os usos da água. Com base na Resolução CONAMA Nº 357/2005, o comitê de bacia do Rio Tramandaí é que deve estabelecer a introdução de um novo parâmetro no enquadramento de seus corpos.

Através da compreensão da dinâmica da salinidade, observa-se que a introdução da salinidade como um parâmetro a ser controlado poderia ser feita nos corpos: Lagoa das Custódias, Lagoa Armazém, Lagoa de Tramandaí, Rio Tramandaí e Lagoa do Passo, que são os corpos que apresentam influência salina de acordo com os cenários simulados. Entretanto, como a Lagoa das Custódias, a Lagoa Armazém, e a Lagoa de Tramandaí, já estão classificadas como água salobra (salinidade até 30‰), e possuem seus usos adaptados a estas condições, não seria necessária a introdução do monitoramento da salinidade.

O Rio Tramandaí e a Lagoa do Passo, de outra forma, são considerados como sendo corpos de água doce, entretanto, de acordo com o modelo, com as medições da CORSAN e da FEPAM, são afetados pela intrusão salina. Para estes dois corpos, a introdução da salinidade como parâmetro deve ser aplicada.

O comitê de bacia, ao analisar os dados do monitoramento da salinidade no Rio Tramandaí e na Lagoa do Passo, deve considerar com cuidado a questão das variações climáticas. Conforme o apresentado nos resultados da dinâmica da salinidade (Figura 5.10), no caso de mudanças climáticas gerarem diminuição em 20% da vazão de água doce afluente ao sistema estuarino, a salinidade pode aumentar mais do que numa situação de aumento da área irrigada. Nos segmentos superiores da Lagoa do Passo, para aumento da área irrigada, a salinidade fica 3,2 e 6,4‰. Nos mesmos segmentos para uma situação de diminuição da vazão afluente, a salinidade fica 3,4 e 7,4‰. Se a situação de diminuição da vazão se tornar comum, talvez seja

mais interessante modificar o local de retirada de água da bacia, para os corpos mais ao norte da bacia (como a Lagoa das Malvas, do Palmital e da Pinguela – Figura 4.5) ou modificar a localização das atividades econômicas para que utilizem água da Lagoa dos Quadros ou da Lagoa Itapeva.

#### 2.4.1.2 ZEEC

É interessante a integração do enquadramento com o zoneamento ecológico-econômico costeiro (ZEEC). O ZEEC é um instrumento de planejamento e gestão que visa à integração do ordenamento territorial, considerando os aspectos ambientais (recursos hídricos, biota, solo) e as atividades econômicas humanas. O ZEEC é concretizado na concessão da licença ambiental para instalação de novos empreendimentos na bacia costeira.

No ZEEC do Litoral Norte, em várias zonas, é citado que o uso do solo não pode alterar a dinâmica dos recursos hídricos superficiais e do lençol freático das lagoas de maneira a provocar a salinização destes corpos. Considerando as diretrizes do ZEEC, as zonas 3,4, 9 e 11 (campos, áreas úmidas novas, áreas úmidas antigas e araucárias) (Figura 4.6) possuem potencial para a atividade agropecuária, incluindo o cultivo de arroz (principal cultivo da região). De acordo com a Figura 4.6, que apresenta a localização destas zonas na bacia, a área com potencial para agropecuária possui uma grande porcentagem da área total da bacia.

Através da compreensão da dinâmica da salinidade no estuário do Rio Tramandaí, foi verificado que, em alguns corpos hídricos do sistema estuarino, não há suporte para a instalação de atividades que exijam grande demanda de água doce. Estes corpos são a Lagoa das Custódias, Lagoa Armazém, Lagoa de Tramandaí e Lagoa do Passo. Entretanto, o ZEEC do Litoral Norte do RS permite a instalação de atividades agropecuárias no entorno destas lagoas (Figura 4.6).

Um exemplo para esta situação pode ser dado pelo cenário de aumento da área irrigada. De acordo com o modelo, se a área de plantação de arroz na bacia duplicar, utilizando a mesma técnica de irrigação atual – por inundação, a salinidade aumenta na Lagoa do Passo, de 0,9 para 3,2‰ e de 1,2 para 6,4‰ em dois segmentos superiores desta lagoa (Figura 5.10). Se esta situação se concretizar, os próprios irrigantes serão prejudicados, pois o excesso de sais na água de irrigação contamina o solo, deixando-o improdutivo.

Portanto, durante a concessão do licenciamento ambiental para aumento da área de cultivo de arroz na bacia, além de considerar o ZEEC, deve-se utilizar, como base teórica, os resultados

obtidos no balanço de salinidade da área. A influência da salinidade pode afetar não só o ecossistema, mas as atividades econômicas, em virtude da limitação de água em qualidade necessária para o uso antrópico.

Da mesma forma que o enquadramento pode utilizar o parâmetro da salinidade para monitorar a qualidade de água que nos corpos de água da bacia (lagoas, rios e canais), em função dos usos que se deseja para estes, a dinâmica da salinidade pode complementar o ZEEC.

O ZEEC, já existente, pode não ser efetivo se não considerar o processo físico integrado do estuário. A integração do ZEEC com a compreensão da dinâmica da salinidade se torna uma ferramenta para o manejo do uso do solo na bacia do Rio Tramandaí, que pode ser aplicada para a concessão de licenças ambientais nesta área. O uso do solo na bacia deve ser avaliado em função da demanda de uso da água e a esta relacionada com a intrusão salina, durante o processo de licenciamento.

#### 2.4.1.3 OUTORGA

A outorga de uso de recursos hídricos pode ser aplicada na bacia costeira como uma ferramenta que limite a demanda, visando controlar a intrusão salina. Muito se discute sobre regularização da outorga em estuários, se a água salobra se enquadra na definição de recursos hídricos, passível de outorga. Na prática, observa-se, no caso da bacia do Rio Tramandaí, que há demanda de água em estuários, em locais afetados pela intrusão salina (em água salobra), para os mais diversos usos: abastecimento público, irrigação e dessedentação animal. Logo, se há demanda, há uso da água como um insumo produtivo, como um recurso. Assim, porque não existir a outorga em estuários? Na bacia do Rio Tramandaí, quando efetivada a outorga, será um caso onde há outorga em estuário, só que o estuário não é totalmente reconhecido como tal, ou seja, parte do estuário é classificada como um corpo de água doce, caso este do Rio Tramandaí e da Lagoa do Passo.

Considerando que a Bacia do Rio Tramandaí, se localiza inteiramente no estado do RS, é competência estadual a emissão da outorga, e o órgão responsável é o Departamento de Recursos Hídricos. Não foi estabelecida a outorga na bacia em questão, mas, com a finalização do plano de recursos hídricos da bacia, há a previsão da aplicação da outorga, como uma medida muito eficaz no planejamento do território em função da demanda hídrica.

Quando efetivada a outorga na bacia em questão, o modelo de balanço de salinidade pode ser útil para estimar a quantidade máxima de água que pode ser retirada da bacia, sem que haja

aumento da intrusão salina. Entretanto, o modelo responde de maneira diferente, dependendo de onde é o ponto de captação de água. Por exemplo, se a demanda é retirada na Lagoa Itapeva (norte da bacia, longe da conexão com o mar), a intrusão salina não sofre alteração; se a mesma demanda é no Rio Tramandaí, a intrusão salina pode aumentar mais no limite do estuário, ou seja, na Lagoa do Passo.

Este comportamento do modelo pode representar a situação real, visto que o sistema de lagoas funciona como um reservatório, que armazena água e libera de maneira gradual para o estuário. Como num reservatório, a retirada de água das lagoas ao norte não vai afetar significativamente a vazão a jusante. Como o Rio Tramandaí e a Lagoa do Passo estão à jusante na bacia, quase na foz, o efeito da regularização é menor, o que se reflete no aumento da salinidade.

Considerando o exposto, na bacia do Rio Tramandaí a vazão máxima outorgável não pode ser única para a bacia inteira, mas devem ser estabelecidos valores específicos de retirada vazão para cada lagoa, rio e canal da bacia.

Conforme simulado no modelo, a retirada de água doce nos corpos hídricos mais ao norte (Lagoa dos Quadros e Lagoa Itapeva), não afeta significativamente a dinâmica da salinidade no estuário do Rio Tramandaí. Logo, para a emissão da outorga para estes corpos, não há necessidade de levar em consideração o balanço de salinidade, mas sim dados de disponibilidade hídrica em cada local. Contudo, deve-se ter cautela ao emitir outorga nesses corpos, pois, apesar de o modelo não responder a essa situação, a excessiva retirada de água das lagoas ao norte pode diminuir a vazão afluente no estuário e afetar a disponibilidade hídrica devido à intrusão salina.

Para a emissão de outorga nos corpos que pertencem ao estuário, principalmente na Lagoa do Passo e no Rio Tramandaí, a compreensão da dinâmica da salinidade é essencial. A aplicação do modelo de balanço de salinidade comprovou que o aumento da retirada de água doce na Lagoa do Passo diminui a disponibilidade hídrica, ao aumentar a salinidade no estuário. Entretanto, o modelo não funciona como uma ferramenta que determina diretamente da vazão máxima que pode ser retirada da bacia sem comprometer a dinâmica da salinidade e a disponibilidade hídrica. O modelo mostrou a influência, mas não é um processo direto onde se indica até onde é “permitida” a intrusão salina e o modelo gera a vazão mínima que deve aportar ao estuário para manter uma determinada condição de salinidade.

Todavia, durante o processo de determinação da vazão outorgável para a Lagoa do Passo e Rio Tramandaí, a dinâmica da salinidade deve ser observada. O modelo pode ser utilizado através do processo de tentativa e erro. Simulando uma vazão  $x$  de demanda adicional em um destes corpos hídricos, observa-se como se comporta a dinâmica da salinidade. Através deste processo a vazão outorgável pode ser estimada.

#### 2.4.1.4 COBRANÇA

De acordo com a PNRH, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos pode ser aplicada em locais onde já existem outorga, com o intuito de induzir o consumo consciente e a observar o valor econômico da água.

A instituição da cobrança pelo uso da água ainda é muito discutida. Alguns estados possuem menção deste instrumento em suas políticas de recursos hídricos e a estão aplicando, como, por exemplo, Ceará e São Paulo. No entanto, outros preveem a utilização deste instrumento nas águas de seu domínio, mas não tem intenção de aplica-la. No RS, a PERH, prevê a cobrança, e existem bacias que estão avançando na direção de efetivação deste instrumento, como, por exemplo a bacia do Rio Santa Maria.

Na bacia do Rio Tramandaí, observa-se uma situação em que a cobrança pode ser aplicável na gestão de recursos hídricos e da zona costeira. Os plantadores de arroz, que tem área garantida na bacia pelo ZEEC para agricultura, não possuem disponibilidade hídrica correspondente para manter a irrigação por inundação. A cobrança pelo uso da água bruta, como um instrumento econômico, pode ser o instrumento ideal para gestão desse impasse. Através da cobrança, o produtor rural é incentivado a gastar o mínimo de água possível, pois está pagando por ela, e logo procura técnicas alternativas de irrigação, que utilizem menor quantidade de água, com o gotejamento ou a aspersão.

A aplicação da cobrança pelo uso da água é um instrumento agressivo, que choca os empresários que necessitam de água como um insumo produtivo. A aplicação da cobrança como instrumento de gestão de recursos hídricos na zona costeira pode ser útil, porém as características particulares de cada estuário devem ser analisadas. No caso do estuário do Rio Tramandaí, observou-se que a situação dos irrigantes de arroz pode ser gerida utilizando a cobrança, mas talvez, a simples limitação da outorga possa gerar o mesmo efeito. Cada estuário possui características físicas e socioeconômicas que facilitam ou não a aplicação deste instrumento.

O modelo de balanço de salinidade não é uma ferramenta para aplicação da cobrança. O suporte dado pela compreensão da dinâmica da salinidade se traduz mais em relação à outorga. Esta dinâmica não gera a aplicabilidade da cobrança, como gera para a outorga. Situações de escassez hídrica extrema é que geram esta necessidade de cobrança. No caso do estuário do Rio Tramandaí, o conflito pelo uso da água ainda não é tão forte a ponto de justificar a aplicação de uma medida tão extrema como a cobrança. O comitê de bacia é que deve analisar a necessidade ou não da instituição da cobrança com o apoio de todos os usuários e envolvido na questão.

#### 2.4.1.5 PLANO DE BACIA HIDROGRÁFICA

O plano da bacia do Rio Tramandaí já está em fase de elaboração. As etapas A e B já foram concluídas e está em discussão a fase C, que corresponde ao programa de ação, onde metas e estratégias são estabelecidas para harmonizar os usos e a qualidade da água.

Os usos da água da bacia foram definidos através do enquadramento dos corpos de água, logo, na fase C do plano, irá ser definido como atingir os objetivos de qualidade de água estabelecidos. Como já mencionado, o enquadramento não considera o parâmetro da salinidade na Lagoa do Passo, corpo crítico para intrusão salina e fonte de água para diversos usos, o que pode comprometer os usos que estão sendo propostos para esta lagoa. Na fase C, a questão da intrusão salina neste corpo deve ser discutida, pois irá limitar os usos desejáveis para a Lagoa do Passo, como sendo classe I água doce (Resolução CONAMA Nº 356/2005). Nesta situação o modelo de balanço de salinidade pode ser útil para exemplificar situações futuras de intrusão salina, prevendo assim como a intrusão salina irá se comportar em face ao aumento na demanda e como esta questão pode ser manejada. O aumento excessivo na demanda da bacia é insustentável, visto que a disponibilidade hídrica já está em vias de saturação.

Na fase C do plano de bacia também deve ser discutida a questão da influência das condições climáticas na intrusão salina. Com o modelo utilizado, observa-se que variações nas condições climáticas que gerem uma diminuição da vazão em 20% podem corresponder a um grande aumento da área de influência da salinidade na bacia do Rio Tramandaí. Esta questão deve ser tratada com cuidado pelo comitê de bacia. Uma proposta seria a utilização da outorga sazonal, porém surge um paradigma quando há uma situação de aridez juntamente com menor disponibilidade de retirada de água, principalmente para irrigação. Uma solução seria a limitação do uso de corpos hídricos que pertençam ao estuário (que são apresentam influência

da intrusão salina), dando preferência para as lagoas, rios e canais mais a montante, que não são afetados pela intrusão salina.

Também na fase C, deve ser incluído o modelo de balanço como uma ferramenta necessária para a gestão de recursos hídricos desta bacia. Como esta fase compreende o plano de ação, juntamente com metas e estratégias, o modelo entra como meio para que estas medidas de ação sejam aplicadas. Através da compreensão da dinâmica da salinidade serve como um instrumento útil para o monitoramento ambiental de uma zona estuarina. Assim, da mesma forma que o enquadramento dos corpos serve como base para o monitoramento e fiscalização, o balanço de salinidade serve para determinar a salinidade “padrão” dos corpos estuarinos, para que, se esta salinidade for superada, medidas de controle podem ser aplicadas com o intuito de diminuir a retirada de água doce na bacia e controlar a intrusão salina.

O plano de bacia determina as diretrizes que devem ser observadas durante a gestão de uma bacia hidrográfica. Neste contexto, a dinâmica da salinidade atua apenas como referência a ser utilizada juntamente com o plano, e não na formulação ou descrição do plano.

A partir dos resultados do balanço de sais para o estuário do Rio Tramandaí, observou-se que o Rio Tramandaí e a Lagoa do Passo compreendem corpos críticos para a gestão, que sofrem intrusão salina, mas os usos da água nestes locais estão adaptados para uso de água doce, e não salobra. Esta particularidade deve constar no plano, e na fase C, contemplar as metas e estratégias para estes corpos estuarinos. Aí entra o balanço de salinidade, para estabelecer metas condizentes com a realidade da disponibilidade hídrica de cada corpo.

O plano de bacia deve contemplar explicitamente a problemática da limitação da disponibilidade hídrica em função do aumento de salinidade, principalmente no caso do Rio Tramandaí e a Lagoa do Passo, e os meios de contorná-la, através do controle da demanda de água doce.

Existem casos em que houve limitação da disponibilidade hídrica devido à salinização (vide caso do verão de 2004/2005, quando o abastecimento público teve que ser suspenso). Nas fases A e B, este conflito foi citado, mas sem muita ênfase, o que pode complicar a gestão ambiental futura da região. Na fase C, esta problemática deve ser levada em consideração, na elaboração das metas e estratégias para efetivar as práticas de gestão dos recursos hídricos. O modelo de balanço de salinidade deve ser apresentado ao comitê como forma de reforçar a importância deste problema e como um meio de gerenciá-lo.

Uma condição necessária para resolver esta problemática é a integração entre o plano da bacia do Rio Tramandaí com o plano de gerenciamento costeiro do Litoral Norte do RS, avaliando a interconexão entre zona costeira e os recursos hídricos nos processos decisórios.

Este processo está em evolução na bacia do Rio Tramandaí. O comitê da bacia, juntamente com a FEPAM (responsável pelo gerenciamento costeiro) deve assumir o papel nesta questão, tanto na gestão de recursos hídricos, como na integração da gestão costeira e resolvendo conflitos existentes. A aplicação do ZEEC e no plano deve ser feita através do comitê, sempre considerando os fatores que podem limitar a disponibilidade hídrica, como a intrusão salina.

#### 2.4.1.6 OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Considerando o entendimento da dinâmica da salinidade no estuário do Rio Tramandaí, obtido através deste estudo, algumas proposições devem ser expostas.

Os corpos hídricos da Lagoa do Passo e Rio Tramandaí compõem o estuário, visto que a salinidade destes foi superior a 0,5‰ em todos os cenários testados, incluindo o marco referencial. Estes corpos devem ser geridos com extrema atenção, pois, apesar de sua salinidade, são considerados como corpos de água doce e existem várias atividades antrópicas (principalmente abastecimento e irrigação) que utilizam seus mananciais como fonte de água doce. Nas proximidades da Lagoa do Passo e Rio Tramandaí, se localiza as cidades de Tramandaí e Imbé, que estão crescendo e atraindo novos empreendimentos.

O ideal seria que, as atividades que necessitem maior demanda por água não se concentrem próximo à Lagoa do Passo e ao Rio Tramandaí, pois, de acordo com o resultado do cenário de aumento da área de irrigação, o aumento da retirada de água nesses corpos aumenta a salinidade no estuário limitando a disponibilidade hídrica dos usuários já instalados.

Observado o exposto, e considerando que os corpos hídricos mais ao norte da bacia, especialmente o Canal São Pedro, Lagoa dos Quadros, Rio Cornélios e Lagoa Itapeva, apresentam maiores volumes de água e vazão, as atividades que demandem volumes consideráveis de água deveriam preferencialmente instalar-se na proximidade destes corpos ao norte, ao invés dos corpos estuarinos da Lagoa do Passo e Rio Tramandaí. Os corpos ao norte, além de estarem a uma maior distância da foz do estuário, apresentam maior disponibilidade hídrica nos meses de dezembro a março em virtude do regime de chuva maior nesta época do ano nas nascentes dos rios Maquiné e Três Forquilhas, justamente a época que

se utiliza a irrigação (PROFILL, 2005a). Esses corpos também não sofrem com a salinização devido à intrusão salina. .

Ao contrário, a Lagoa do Passo, assim como os corpos hídricos do subsistema sul, apresentam o período de maior disponibilidade hídrica não corresponde aos meses de verão. Acredita-se que os efeitos da declividade da lâmina d'água dos canais que interligam as lagoas a montante e jusante, influência das variações do nível do mar, ventos e evaporação expliquem esta alteração (PROFILL, 2005a). Isto gera outra condição desfavorável para a utilização destes mananciais, que são afetados diretamente pela intrusão salina.

Outra dúvida que surge com relação ao sistema estuarino do Rio Tramandaí é se a solução para controlar a intrusão salina relacionada a mudanças climáticas, seria a implementação de medidas estruturais, como barramentos ou reservatórios.

Através de intervenções estruturais, como os barramentos para criação de reservatórios, pode-se regularizar a vazão afluente, mantendo uma determinada vazão durante todo o ano. Desta maneira, o efeito de secas e cheias extremas é minimizado.

Entretanto, a bacia do Rio Tramandaí possui grande parte de sua topografia numa área plana, e aproximadamente no nível do mar, e a implantação de reservatórios inundaria uma área muito grande, o que poderia não ser desejável. Além disso, a própria hidrografia do local, com as várias lagoas interligadas, já funcionam da maneira análoga a um reservatório.

Considerando apenas o resultado do balanço de salinidade como meio de responder ao questionamento da efetividade da aplicação de medidas estruturais, a resposta poderia ser outra.

A metodologia proposta para a simulação da dinâmica da salinidade utiliza dados de vazão média anual, porém no caso de uma situação de seca, a metodologia de Mendes *et al* (2010) pode ser aplicada e a relação da seca com salinidade do estuário pode ser estimada. Se um reservatório for implantado, de maneira que a vazão afluente ao estuário se mantenha relativamente constante, esta vazão é aplicada no modelo e a dinâmica da salinidade para este novo cenário é determinada. Desta maneira, a dinâmica da salinidade se mostra útil, também como ferramenta para determinar os benefícios ou desvantagens da implantação de medidas estruturais de gestão numa bacia hidrográfica costeira.

Contudo, conforme já exposto, a própria topografia da bacia do Rio Tramandaí não favorece o estabelecimento de medidas estruturais, principalmente por ser excessivamente plana. Mas o

modelo de balanço de salinidade pode ser utilizado em outros estudos de caso para estudar a viabilidade ou não de medidas estruturais.

Para contornar o problema decorrente de secas extremas na bacia do Rio Tramandaí, outras medidas dever ser propostas para conservar a disponibilidade hídrica de longo prazo. Por exemplo, recuperação da vegetação ciliar, que ajuda manter o efeito de amortecimento das lagoas; estabelecer um monitoramento hidro – climatológico, a fim de prever com antecedência às secas e tentar remediar os possíveis efeitos adversos; utilizar como fonte alternativa de água os mananciais subterrâneos; reutilização da água, etc.

## 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 3.1 CONCLUSÃO

A conclusão da presente dissertação foi dividida em duas partes. Primeiramente, é apresentada a conclusão relativa ao método proposto, ou seja, a utilidade do balanço de salinidade como ferramenta para a gestão de bacias hidrográficas costeiras. Na segunda parte, considerações específicas são feitas sobre as conclusões obtidas na aplicação da metodologia no estudo de caso, a bacia do Rio Tramandaí.

#### 3.1.1 EM RELAÇÃO À METODOLOGIA

A conclusão geral em relação ao método proposto nesta dissertação é que o balanço de salinidade tem se mostrado eficaz na descrição de um ambiente estuarino. Assim, voltando à hipótese levantada no primeiro capítulo: *A compreensão do balanço de salinidade num ambiente estuarino é uma ferramenta útil para a gestão de recursos hídricos na zona costeira?* E considerando todo o desenvolvimento deste estudo, chega-se a resposta afirmativa.

O modelo de balanço de salinidade se mostrou uma ótima ferramenta para a gestão de recursos hídricos na zona costeira, em áreas com intrusão salina marcante, apesar da limitação inerente a um modelo matemático, que adota uma série de simplificações. Esse também é útil na compreensão da dinâmica dos ambientes estuarinos – costeiros e na avaliação da disponibilidade hídrica na zona costeira.

Para a aplicação dos instrumentos da PNRH e PNGC numa situação de bacia hidrográfica costeira, pode-se definir a compreensão da dinâmica da salinidade do estuário em questão como sendo o elo entre os instrumentos de gestão já existentes e as características peculiares das bacias costeiras.

Os instrumentos que se mostraram em sintonia direta com o modelo de balanço de salinidade foram o enquadramento dos corpos de água, o zoneamento ecológico-econômico costeiro (ZEEC) e a outorga de uso de recursos hídricos. Para estes, a utilização do modelo é complementar e reforça a gestão integrada.

No enquadramento, a dinâmica da salinidade entra para definir um novo parâmetro a ser observado e monitorado para o caso de bacias costeiras. Isto se justifica no fato que a

salinidade também pode comprometer a utilização da água doce, assim como a  $DBO_5$  ou o oxigênio dissolvido, entre outros.

O balanço de salinidade se mostrou eficaz como suporte à outorga, sendo que o modelo permite facilmente simular um aumento na demanda de usuários já existentes, ou a introdução de um novo usuário na bacia. Os cenários de aumento de demanda servem com suporte a tomada de decisão relativa à outorga.

A compreensão da dinâmica da salinidade complementa o ZEEC ao estabelecer a inter-relação entre o uso do solo da zona costeira (representado pelo próprio ZEEC) e a disponibilidade hídrica numa bacia costeira (representado pelo modelo de balanço de sais). Observa-se que a aplicação do ZEEC deve ser feita integrada à dinâmica da salinidade, pois os usos previstos em cada área do ZEEC podem não ser possíveis em virtude da limitada disponibilidade hídrica devido à influência da salinidade, além de haver o comprometimento de outras atividades que utilizem os recursos hídricos.

Em outros instrumentos, como a cobrança e os planos de recursos hídricos e de gerenciamento costeiro, a compreensão da dinâmica da salinidade facilita a gestão integrada. O modelo de balanço de massa introduz o efeito marinho na bacia hidrográfica, que é necessário, pois o ambiente da bacia forma um contínuo com o oceano.

O modelo de balanço de salinidade também se mostrou útil para verificação sobre a necessidade de medidas estruturais que complementem a gestão integrada, sempre considerando as particularidades de cada bacia.

Outras aplicações para a dinâmica da salinidade como ferramenta para a gestão podem surgir durante a aplicação desta em cada estudo de caso específico.

### 3.1.2 EM RELAÇÃO À BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TRAMANDAÍ

O modelo de balanço de salinidade se mostrou eficiente para a gestão de recursos hídricos na bacia do Rio Tramandaí, uma bacia costeira.

O modelo de representação dinâmica da salinidade deve ser aplicado no âmbito do comitê da Bacia do Rio Tramandaí para simular condições futuras de demanda de água nos vários corpos do sistema lagunar, e assim servir como base para a outorga de uso de recursos hídricos (através do enquadramento) e o licenciamento ambiental (através do ZEEC) no Litoral Norte do RS.

A metodologia proposta permitiu o mapeamento da salinidade no estuário, e ainda permite a criação de novos mapas de salinidade em função da retirada de água doce da bacia ou de condições ambientais (meteorológicas). A partir da comparação dentre o mapeamento da salinidade considerando o uso do solo hoje na bacia e o que se deseja no futuro, pode-se estimar a máxima demanda permitida em cada corpo da bacia, para que um máximo tolerado de salinidade se mantenha no limite do estuário (Rio Tramandaí e Lagoa do Passo). O modelo sugere que, se houver um aumento na demanda de irrigação em 50% a salinidade aumentará no estuário, limitando a disponibilidade hídrica, principalmente na Lagoa do Passo, que é fonte de água para abastecimento público e irrigação.

Desta forma, as principais considerações que devem ser observadas na gestão dos recursos hídricos da bacia do Rio Tramandaí são:

- ✓ Durante o processo de licenciamento de novos empreendimentos que utilizem recursos hídricos, deve ser dada preferência para a implantação desses no subsistema norte, próximo às Lagoas dos Quadros e Itapeva, devido a maior capacidade de regularização da vazão e do grande volume de água destes corpos;
- ✓ Devem ser estabelecidos limites de salinidade no estuário, considerando a dinâmica da salinidade – resultado do marco referencial – e os usos da água;
- ✓ Com base no limite estabelecido, a salinidade deve ser monitorada nos corpos estuarinos da bacia, visando não apenas preservar o interesse dos usuários de recursos hídricos e as suas necessidades de qualidade, mas também preservar os organismos estuarinos, que possuem parte do seu ciclo de vida no mar e parte em água mais doce, e que estão adaptados a uma variação de salinidade e podem não tolerar situações extremas;
- ✓ A limitação da demanda de recursos hídricos pode ser aplicada através da licença ambiental, não concedendo licenciamento para atividades que demandem mais água que o suportável pelo sistema;
- ✓ A outorga de uso de recursos hídricos deve ser feita para cada corpo hídrico e não para a bacia como um todo, visto que a retirada de água em diferentes corpos gera efeitos diferentes na intrusão salina;
- ✓ A vazão outorgável deve ser menor nos corpos pertencentes ao estuário, como o Rio Tramandaí e a Lagoa do Passo. Já nas lagoas e rios ao norte do sistema, como a Lagoa

dos Quadros e Itapeva, a vazão outorgável pode ser maior em função da maior disponibilidade hídrica e regularização da vazão;

- ✓ O abastecimento público do Litoral Norte do RS deve ser feito preferencialmente nos corpos hídricos acima da Lagoa do Passo, para evitar a intrusão salina em épocas de seca e principalmente no verão.

### **3.2 LIMITAÇÕES DO ESTUDO**

O modelo aplicado na bacia do Tramandaí não contempla uma importante condicionante da hidrodinâmica no local: a ação do vento, que pode represar a água doce dentro da bacia, causando maior intrusão salina e comprometendo a disponibilidade hídrica. Também não é prevê a ação das ressacas, outro fator relevante para a dinâmica da salinidade na bacia do Rio Tramandaí.

Há, também, as limitações inerentes do modelo, devido às simplificações aplicadas. Um modelo é a representação do mundo real, e está sempre em processo de aperfeiçoamento. As limitações inerentes ao BALANCE são observadas através da comparação entre as salinidades medidas e as simuladas.

Nem todos os instrumentos de gestão de recursos hídricos da PNRH podem ser aplicados para bacias costeiras apenas utilizando como ferramenta a compreensão da dinâmica da salinidade na zona estuarina.

No caso da outorga de uso de recursos hídricos, o modelo de balanço de massa não fornece a vazão mínima afluyente ao estuário necessária para impedir a intrusão salina, além dos limites “normais”. O modelo é apenas uma das ferramentas, que permite estimar o comportamento da intrusão salina em face de um aumento de demanda determinado. Para determinar a vazão outorgável numa bacia costeira, outras condicionantes devem ser levantadas como a análise da disponibilidade hídrica de cada corpo que forma o estuário.

Outra limitação da metodologia é a relativa complexidade de aplicação do modelo. A dinâmica da salinidade tem se mostrado eficiente como ferramenta para gerir bacias costeiras, entretanto, não é uma ferramenta que pode ser aplicada facialmente pelo comitê de bacia. A gestão de bacias hidrográficas é centralizada na figura do comitê, que integra todos os interessados na bacia, e decide o que é interessante ser aplicado a nível local. Para que o

modelo de balanço de salinidade seja aplicado, há a necessidade de um técnico capacitado para tanto, o que muitas vezes não é disponível nesta instância administrativa.

### **3.3 PROPOSTAS PARA ESTUDOS FUTUROS**

O resultado desta dissertação gerou algumas ideias para complementação da temática dos processos de gestão integrada bacia hidrográfica – zona costeira. A seguir são apresentadas algumas destas ideias como sugestões para estudos futuros.

- ✓ Considerando a realidade brasileira, onde há um forte aparato legal, porém dissociando bacia – zona costeira e que nem sempre está sendo aplicado efetivamente, seria interessante comparar as políticas nacionais de gestão do ambiente de interface recursos hídricos e zona costeira com políticas de outros países, que apresentam a mesma problemática. Pode-se, assim, comparar historicamente o processo de gestão integrada e analisar que ferramentas funcionaram ou não em outra realidade. Esta análise pode ser útil, ao servir de exemplo para a realidade brasileira, onde deve haver a verificação da aplicabilidade das medidas que funcionaram em outros locais, para avançar no processo de gestão da zona costeira e de bacia hidrográfica. Os erros cometidos em outros locais também podem servir como aprendizado, utilizando a comparação entre o que funciona ou não, e o como funciona, no Brasil e fora.
- ✓ O presente estudo também demonstrou a importância dos estudos de caso do processo de gestão integrada de bacia hidrográfica – zona costeira, ao estabelecer uma base teórica e um aparato legal consistente para o processo de gestão integrada tanto em nível nacional como em nível de bacia. Seria interessante aplicar a metodologia proposta neste trabalho em outras bacias costeiras do Brasil, que possuem limitações na disponibilidade de água doce devido à intrusão salina, analisando os instrumentos da PNRH e PNGC na bacia, como estão sendo ou poderiam ser aplicados. Posteriormente, poderia ser feita uma análise comparativa com a bacia do Rio Tramandaí, considerando que esta é uma bacia em que a gestão integrada está em processo e há grande interesse dos órgãos públicos em aplicá-la efetivamente.
- ✓ Outra recomendação seria a elaboração de um modelo mais complexo para a área da bacia do Rio Tramandaí, que contemple a ação do vento e as ressacas, e que possa ser mais representativo.

## 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAI. 1997. Associação Brasileira de Arroz Irrigado. Documento Nº 57 - Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. Pelotas, RS : s.n.
- BRASIL. 1997a. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei Nº 8.001, de 13 de março de 1990.
- . 1997b. Resolução CIRM Nº 005, de 03 de dezembro de 1997. Aprova o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro II (PNGC II).
- . 2001. Resolução CNRH Nº 17, de 29 de maio de 2001. Estabelece diretrizes complementares para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas.
- . 2004. Decreto Nº 5.300, de 7 de dezembro de 2004. Regulamenta a Lei Nº 7.661, de 16 de maio de 1988, que institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro, dispõem sobre regrese ocupação da zona costeira e estabelece critérios de gestão da orla marítima, e dá outras providências.
- . 2005. Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de poluentes, e dá outras providências.
- . 2008a. Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil. Brasília : Ministério do Meio Ambiente. 241p.
- . 2008b. Proposta de Resolução CNRH Nº xx, de 27 de março de 2008. Estabelece diretrizes adicionais que devem ser incluídas nos planos de recursos hídricos de regiões que contenham trechos da zona costeira. 6p.
- BRUSSIOS, S. 2009. SETUR - Secretaria do Estado do Turismo RS. Acesso em: 9 de setembro de 2009. <http://www.turismo.rs.gov.br/portal/index.php?q=atrativo&id=2705&bd=&fg=2>.

- CLIMANÁLISE. 1986. Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Cachoeira Paulista : INPE/INEMET.
- GRUBER, N.L.S., BARBOZA, E.G. e NICOLODI, J.L. 2003. Geografia dos Sistemas Costeiros e Oceanográficos: Subsídios para a Gestão Integrada da Zona Costeira. GRAVEL. Janeiro de 2003, 1: 81-89.
- HAASE, J.; STRINGUINI, M.H.; SILVA, M.L.B.C.; RODRIGUES, M.L.K. e KOCH, S.M.V. 2003. Qualidade das Águas Superficiais do Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul. IN: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- HELLWEGER, F. 1997. BALANCE - Map Based Surface Water Quality Model. [Online]. Acesso em: 27 de novembro de 2008. <http://www.crwr.utexas.edu>.
- HELLWEGER, F. e MAIDMENT, D. 1997. CCBPARAM, Corpus Christi Bay Water Quality Model Parameter Estimation. Acesso em: 27 de novembro de 2008. <http://www.ce.texas.edu>.
- HOUAISS, A., VILLAR, M.S. e FRANCO, F.M.M. 2001. Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa. 1ª Edição. Rio de Janeiro : Objetiva, 2925p.
- KLEIN, A.H.F. 1998. O Clima Regional. IN: U. Seeliger, C. Odebrecht e J.P. Castello (eds.). Os Ecossistemas Costeiro e Marinho do Extremo Sul do Brasil. Rio Grande : Ecoscientia, pp. 5-7.
- MACHADO, C.J.S., MIRANDA, N. e PINHEIRO, A.A.S. 2004. A Nova Aliança entre Estado e Sociedade na Administração da Coisa Pública: Descentralização e Participação na Política Nacional de Recursos Hídricos. IN: C.J.S. Machado (ed.). Gestão de Águas Doces. Rio de Janeiro : Interciência, pp. 3-38.
- MAIDMENT, D.R. 1993. GIS and Hidrology Modeling. IN: M.F. GOODCHILD, B.O. PARKS e L.T. STEYAERT. Environmental Modeling with GIS. New York : Oxford University Press, pp. 147-167.
- MALUF, J.R.T. 2000. Nova Classificação Climática do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.1, pp. 141-150.
- MENDES, C.A.B. e CIRILO, J.A. 2001. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação. 1ª Edição. Porto Alegre : ABRH, 536 p.

- MENDES, C.A.B.; ORDOÑEZ, J.E.S. e BECKER, M. 2010. Análise Hidrológica em face de Cenários de Variabilidade Climática: o Caso do Pantanal. Artigo aceito para publicação na **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**.
- MIRANDA, L.B., CASTRO, B.M. e KJERFVE, B. 2002. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários**. São Paulo : EDUSP, 2002. 411p.
- NICOLODI, J.L., ZAMBONI, A. e BARROSO, G.F. 2009. Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica Amazônica. **Revista de Gestão Costeira Integrada**. 9 (2):9-32, 2009.
- NIELS, I., DYHR-NILSEN, M. e HASSING, J. 2002. **Linking Fresh Water Resources Management and Coastal Zone Management**. Draft : FreshCo Partnership, 2002. 12p.
- OFFICER, C.B. 1983. Physics of Estuarine Circulation. IN: B.H. Ketchum (ed.). **Estuaries and Enclosed Seas**. Amsterdam : Elsevier, 26, pp.15-41, (Ecosystems of the World).
- OLSEN, S.B., PADMA, T.V. e RICHTER, B.D. 2006. Guía para el Manejo del Flujo de Agua Dulce a los Estuarios. Narragansett, Rhode Island : Centro de Recursos Costeiros de la Universidad de Rhode Island, 42p.
- PICKAVER, A. e SADACHARAN, D. 2007. The Benefits of Inter-linking Coastal and River Management: twenty case studies world-wide. **Coastal Reports 10**. 64p.
- PRITCHARD, D.W. 1955. Estuarine Circulation Patterns. **Proc. Am. Soc. Eng.** 81 (717):111.
- . 1967. What is an estuary: Physical viewpoint. IN: G.H. Lauff (ed.) **Estuaries**. Washington, D.C., American Association for the Advancement of Science, pp. 3-5.
- PROFILL, Engenharia e Meio Ambiente Ltda. 2004. 1ª Etapa do Plano de Bacia do Rio Tramandaí. **Relatório Temático A.1 - Diagnóstico da Dinâmica Social da Bacia**. Acesso em: 13 de novembro de 2009. <http://www.comitetramandai.com.br/documentos.php>.
- . 2005a. 1ª Etapa do Plano de Bacia do Rio Tramandaí. **Relatório da Fase A - Consolidação do Diagnóstico e Balanço Hídrico**. Acesso em: 13 de novembro de 2009. <http://www.comitetramandai.com.br/documentos.php>.

- . 2005b. 1ª Etapa do Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí. **Relatório Temático A.3 - Diagnóstico e Prognóstico das Demandas Hídricas**. Acesso em: 18 de dezembro de 2009. <http://www.comitetramandai.com.br/documentos.php>.
- PUGH, D.T. 1987. **Tides, Surges and Mean Sea Level**. Chichester : John Wiley & Sons, 472p.
- QUENZER, A.M. 1998. A GIS assessment of the total loads and water quality in the Corpus Christ Bay System. Thesis Bureau of Engineering Research. The University of Texas at Austin. 253p.
- RANGEL, M.L, et al. 2009. Sistema de Monitoramento Hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí e das captações Superficiais da Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN. Acesso em: 11 de novembro de 2009. <http://www.agbpa.com.br/CD/artigos/Poster%20-%20PDF%20OK/SISTEMA%20DE%20MONITORAMENTO.pdf>.
- RIO GRANDE DO SUL. 1999. Decreto Nº 39.637, de 28 de julho de 1999. Cria o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí.
- . 2000. FEPAM. Diretrizes ambientais para o desenvolvimento dos municípios do Litoral Norte. Acesso em: 21 de dezembro de 2009. [www.fepam.rs.gov.br](http://www.fepam.rs.gov.br)
- . 2009a. SEMA - Secretaria Estadual de Meio Ambiente. Acesso em: 15 de maio de 2009. <http://www.sema.rs.gov.br/sema/html/rhcontra.htm>.
- . 2009b. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí. Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí. Acesso em: 13 de novembro de 2009. [http://www.comitetramandai.com.br/arquivos/11\\_Relatorio\\_Sintese.pdf](http://www.comitetramandai.com.br/arquivos/11_Relatorio_Sintese.pdf).
- . 2010. FEPAM. Acesso em: 13 de março de 2010. [http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/monitor\\_agua\\_litoral.asp](http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/monitor_agua_litoral.asp).
- SANTOS, E.R.O. 2000. A Gestão da Água em Ambientes Costeiros: uma Contribuição à Análise da Disponibilidade Hídrica das sub-Bacias das Lagoas do Morro do Forno e do Jacaré, Litoral Norte, RS. **Dissertação de Mestrado UFSC**.
- . 2007. Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zona Costeira Aplicada ao Sistema Estuarino do Rio Tramandaí. **Tese de Doutorado UFSC**.

- SATO, K., AMANO, K. e YASUDA, Y. 2000. Integrating GIS and water quality model: a case study in a volcanic watershed, in Japan. 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Alberta, Canada : s.n..
- SILVA, A.L.L. 2001. Subsídios Teóricos para Gestão Integrada de Bacia Hidrográfica e Zona Costeira: Estudo de Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí/RS. **Tese de Doutorado UFSC.**
- SILVEIRA, A.J.M. 2004. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. IN: C.E.M. (org.) Tucci. **Hidrologia, Ciência e Aplicação.** 4ª Edição. Porto Alegre : Editora da UFRGS, pp. 35-51.
- SINHA, P.C.; RAO, Y.R.; RAO, A.D. e DUBE, S.K. 2008. Modelling Circulation and Salinity in Estuaries. IN: C. R. Murthy, P. C. Sinha and Y. R. Rao. **Modelling and Monitoring of Coastal Marine Processes.** Springer Netherlands: pp. 86-101.
- TABAJARA, L.L.C.A. 1994. Aspectos Hidrodinâmicos e Sedimentológicos do Sistema Lagunar-Estuarino de Tramandaí, RS. **Dissertação de Mestrado UFRGS.**
- THOMANN, R. e MUELLER, J.A. 1987. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control.** Nova York : Harper Collins, 644p.
- UNEP/MAP/PAP. 1999. Conceptual Framework an Planning Guidelines for Integrated Coastal Area and River Basin Management. Split : Priority Actions Programme, 78p.
- UNESCO. 1981. Tenth report of the Join Panel on Oceanographic Tables and Standarts. **UNESCO Technical Paper in Marine Science.** Vol. 36. Acesso em: 10 de novembro de 2009. <http://unesdoc.unesco.org/images/0004/000461/046148eb.pdf>
- ZORZAL, R.; FASSARELLA, J.A.C. e MENDONÇA, A.S.F. 2009. Desenvolvimento de uma Interface para Sistema de Suporte à Decisão para Análise de Alternativas Locacionais para Emissários de Efluentes. IN: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais do Evento.**

**ANEXO A: RELAÇÃO DOS MUNICÍPIOS  
ABRANGIDOS PELA FAIXA TERRESTRE DA ZONA  
COSTEIRA**

O presente anexo foi publicado no Diário Oficial da União Nº 9, de 14 de janeiro de 1998, Seção I, páginas 36 e 37, como parte integrante do PNGC II (BRASIL, 1997b).

Salienta-se que, em função da criação de novos municípios que se enquadrem na faixa terrestre da zona costeira, dentro dos critérios estabelecidos, caberá ao Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, no âmbito da Secretaria de Coordenação dos Assuntos do Meio Ambiente, promover a necessária atualização dessa listagem e disponibilizá-la aos usuários interessados.

### **Relação dos Municípios Abrangidos pela Faixa Terrestre da Zona Costeira**

#### **Amapá**

Oiapoque, Calçoene, Amapá, Itaubal, Macapá, Santana, Cutias, Mazagão, Pracuúba, Tartarugalzinho e Vitória do Jari.

#### **Pará**

Afuá, Chaves, Soure, Salvaterra, Cachoeira do Arari, Barcarena, Belém, Ananindeua, Santo Antonio do Tauá, Colares, Benevides, Vigia, São Caetano de Odivelas, Curuçá, Marapanim, Magalhães Barata, Maracanã, Salinópolis, São João de Pirabás, Primavera, Bragança, Augusto Corrêa, Vizeu, Santa Bárbara do Pará, Quatipuru, Abaetetuba, Anajás, Breves, Curralinho, Gurupá, Igarapé-Miri, Limoeiro do Ajuru, Marituba, Muaná, Ponta de Pedras, Santa Cruz do Arari, Santarem Novo, São João da Ponta, São Sebastião da Boa Vista e Tracuateua.

#### **Ceará**

Chaval, Barroquinha, Camocim, Cruz, Jiboca de Jericoacoara, Acaraú, Fortim, Itarema, Amontada, Itapipoca, Trairi, Paraipaba, Paracuru, São Gonçalo de Amarante, Caucaíia, Fortaleza, Maracanaú, Maranguape, Horizonte, Pacajus, Itaitinga, Guaiúba, Pacatuba, Eusébio, Aquiraz, Pindoretana, Cascavel, Beberibe, Aracati, Icapuí, Granja e Itaiçaba.

#### **Maranhão**

Carutapera, Luís Domingues, Godofredo Viana, Cândido Mendes, Turiaçu, Bacuri, Cururupu, Cedral, Guimarães, Bequimão, Alcântara, Cajapió, São João Batista, Anajatuba, Santa Rita, Rosário, São Luís, Raposa, Paço do Lumiar, São José de Ribamar, Axixá, Icatu, Humberto de Campos, Primeira Cruz, Barreirinhas, Tutóia e Araiõeses.

## **Paraíba**

Mataracá, Baía da Traição, Rio Tinto, Lucena, Cabedelo, João Pessoa, Bayeux, Santa Rita, Condé, Pitimbu, Caaporã e Alhandra.

## **Piauí**

Cajueiro da Praia, Ilha Grande, Parnaíba, Luiz Correia e Buriti dos Lopes.

## **Rio Grande do Norte**

Grossos, Tibau, Areia Branca, Mossoró, Carnaubais, Macau, Guamaré, Galinhos, São Bento do Norte, Pedra Grande, Touros, Maxaranguape, Rio do Fogo, Ceará-Mirim, Extremoz, Natal, Parnamirim, Nísia, Floresta, Senador Georgino Avelino, Goianinha, Arês, Tibau do Sul, Vila Flôr, Canguaretama, Baía e Formosa.

## **Pernambuco**

Goiana, Itapissuma, Itamaracá, Agarassu, Abreu e Lima, Paulista, Olinda, Recife, Camaragibe, São Lourenço da Mata, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Cabo, Ipojuca, Sirinhaém, Rio Formoso, Tamandaré, Barreiros, São José da Coroa Grande, Araçoiaba e Itaquitinga.

## **Alagoas**

Maragogi, Japaratinga, Porto de Pedras, São Miguel dos Milagres, Passo de Camaragibe, Barra de Santo Antônio, Maceió, Pilar, Satuba, Paripueira, Santa Luzia do Norte, Coqueiro Seco, Marechal Deodoro, Barra de São Miguel, Roteiro, São Miguel dos Campos, Coruripe, Piaçabuçu, Feliz Deserto e Penedo.

## **Sergipe**

Brejo Grande, Pacatuba, Indiaroba, Pirambu, Santa Luzia do Itanhy, Barra dos Coqueiros, Laranjeira, Santo Amaro das Brotas, Riachuelo, Aracaju, Maruim, Nossa Senhora do Socorro, Rosário do Catete, São Cristóvão, Itaporanga D'Ajuda, Estância, Ilhas das Flores e Neópolis.

## **Bahia**

Jandaíra, Conde, Esplanada, Cardeal da Silva, São Felix, Mata de São João, Itanagra, Camaçari, Dias D'Ávila, Lauro de Freitas, Salvador, Simões Filho, Aratuípe, Candeias, Taperoá, São Francisco do Conde, Madre de Deus, Santo Amaro, Cachoeira, Saubara, Maragogipe, Salinas da Margarida, Itaparica, Vera Cruz, Jaguaripe, Valença, Cairú, Nilo

Peçanha, Ituberá, Igrapiúna, Camamu, Marau, Itacaré, Uruçuca, Ilhéus, Una, Canavieira, Belmonte, Santa Cruz de Cabrália, Porto Seguro, Prado, Alcobaça, Caravelas, Nova Viçosa e Mucuri.

### **Espírito Santo**

Conceição da Barra, São Mateus, Jaguaré, Linhares, Sooretama, Aracruz, Fundão, Serra, Vitória, Cariacica, Vila Velha, Viana, Guarapari, Anchieta, Piúma, Presidente Kennedy, Itapemirim, Marataízes e Cachoeiro do Itapemirim.

### **Rio de Janeiro**

São João da Barra, São Francisco de Itabapoana, Campos dos Goytacazes, Quissamã, Carapebus, Macaé, Casimiro de Abreu, Rio das Ostras, Armação dos Búzios, Cabo Frio, São Pedro d'Aldeia, Arraial do Cabo, Araruama, Saquarema, Maricá, Itaboraí, Niterói, São Gonçalo, Magé, Guapimirim, Duque de Caxias, Rio de Janeiro, São João do Meriti, Nilópolis, Nova Iguaçu, Queimados, Japeri, Belford Roxo, Itaguaí, Seropédica, Mangaratiba, Angra dos Reis e Parati.

### **São Paulo**

Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião, Ilha Bela, Bertioga, Guarujá, Santos, Cubatão, São Vicente, Praia Grande, Mongaguá, Itanhaém, Peruíbe, Iguape, Cananéia, Ilha Comprida, Barra do Turvo, Cajati, Itariri, Jacupiranga, Juquiá, Miracatu, Pariquera-açu, Pedro de Toledo e Registro.

### **Paraná**

Quaraqueçaba, Antonina, Morretes, Paranaguá, Pontal do Paraná, Matinhos e Guaratuba.

### **Santa Catarina**

Itapoá, São Francisco do Sul, Joinville, Araquari, Balneário Barra do Sol, Barra Velha, Imaru, Piçarras, Penha, Navegantes, Itajaí, Balneário Camboriú, Camboriú, Itapema, Porto Belo, Tijucas, Governador Celso Ramos, Biguaçu, Florianópolis, São José, Palhoça, Paulo Lopes, Garopaba, Imbituba, Laguna, Jaguaruna, Içara, Araranguá, Sombrio, São João do Sul, Bombinhas, Guaruva, Passo de Torres, Santa Rosa do Sul, Balneário Arroio do Silva e Balneário Gaivota.

## **Rio Grande do Sul**

Torres, Arroio do Sal, Três Cachoeiras, Três Forquilhas, Maquiné, Capão da Canoa, Terra da Areia, Xangrilá, Osório, Imbé, Tramandaí, Cidreira, Palmares do Sul, Viamão, Mostardas, Barra do Ribeiro, Tapes, Tavares, Camaquã, Arambé, São José do Norte, São Lourenço do Sul, Rio Grande, Pelotas, Arroio Grande, Jaguarão e Santa Vitória do Palmar.

**ANEXO B: ANEXO I DO  
DECRETO FEDERAL Nº. 5300/2004**

O anexo I do Decreto Federal N.º 5300/2004, expõem uma orientação para o estabelecimento do Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro (ZEEC). Como a apresentação de uma orientação aplicação de instrumentos de gestão não é muito comum nas legislações referentes a recursos hídricos / zona costeira, este anexo é totalmente reproduzido abaixo.

## ANEXO I

### QUADRO ORIENTADOR PARA OBTENÇÃO DO ZONEAMENTO

ZONAS	CRITÉRIOS DE ENQUADRAMENTO DE ÁREAS	METAS AMBIENTAIS
<p><b>1</b> Zona que mantém os ecossistemas primitivos em pleno equilíbrio ambiental, ocorrendo uma diversificada composição funcional capazes de manter, de forma sustentada, uma comunidade de organismos balanceada, integrada e adaptada, podendo ocorrer atividades humanas de baixos efeitos impactantes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ecossistema primitivo com funcionamento íntegro;</li> <li>✓ Cobertura vegetal íntegra com menos de 5% de alteração;</li> <li>✓ Ausência de redes de comunicação local, acesso precário com predominância de trilhas, habitações isoladas e captação de água individual;</li> <li>✓ Ausência de cultura com mais de 1 ha (total menor que 2%);</li> <li>✓ Elevadas declividades, (média acima de 47%, com riscos de escorregamento);</li> <li>✓ Baixadas com drenagem complexa com alagamentos permanentes / frequentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Manutenção da integridade e da biodiversidade dos ecossistemas;</li> <li>✓ Manejo ambiental da fauna e flora;</li> <li>✓ Atividades educativas.</li> </ul>
<p><b>2</b> Zona que apresenta alterações na organização funcional dos ecossistemas primitivos, mas capacitada para manter em equilíbrio uma comunidade de organismos em graus variados de diversidade, mesmo com a ocorrência de atividades humanas intermitentes ou de baixo impacto, em áreas terrestres, a zona pode apresentar assentamentos humanos dispersos e pouco populosos, com pouca integração entre si.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ecossistema funcionalmente pouco modificado;</li> <li>✓ Cobertura vegetal alterada entre 5 e 20% da área total;</li> <li>✓ Assentamentos nucleados com acessos precários e baixos níveis de eletrificação e de caráter local;</li> <li>✓ Captação de água para abastecimento semicoletivas ou para áreas urbanas;</li> <li>✓ Áreas ocupadas com culturas, entre 2 e 10% da área total (roças e pastos)</li> <li>✓ Declividade entre 30 e 47%</li> <li>✓ Baixadas com inundação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Manutenção funcional dos ecossistemas e proteção aos recursos hídricos para o abastecimento e para a produtividade primária, por meio de planejamento do uso, de conservação do solo e saneamento simplificado;</li> <li>✓ Recuperação natural;</li> <li>✓ Preservação do patrimônio paisagístico;</li> <li>✓ Reciclagem de resíduos</li> <li>✓ Educação ambiental.</li> </ul>
<p><b>3</b> Zona que apresenta os</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ecossistema primitivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Manutenção das</li> </ul>

ZONAS	CRITÉRIOS DE ENQUADRAMENTO DE ÁREAS	METAS AMBIENTAIS
ecossistemas primitivos parcialmente modificados, com dificuldades de regeneração natural pela exploração ou supressão, ou substituição de alguns de seus componentes pela ocorrência em áreas de assentamentos humanos com maior integração entre si.	<ul style="list-style-type: none"> <li>parcialmente modificado;</li> <li>✓ Cobertura vegetal alterada ou desmatada entre 20 e 40%;</li> <li>✓ Assentamento com alguma infraestrutura, interligados localmente (bairros rurais);</li> <li>✓ Culturas ocupando entre 10 e 20% da área;</li> <li>✓ Declividade menor que 30%;</li> <li>✓ Alagadiços eventuais;</li> <li>✓ Valor do solo baixo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>principais funções do ecossistema;</li> <li>✓ Saneamento e drenagem simplificados;</li> <li>✓ Reciclagem de resíduos;</li> <li>✓ Educação ambiental;</li> <li>✓ Recuperação induzida para controle da erosão e manejo integrado de bacias hidrográficas;</li> <li>✓ Zoneamento urbano, turístico e pesqueiro.</li> </ul>
<b>4</b> Zona que apresenta os ecossistemas primitivos significativamente modificados pela supressão de componentes, descaracterização dos substratos terrestres e marinhos, alteração das drenagens ou da hidrodinâmica, bem como pela ocorrência em áreas terrestres de assentamentos rurais ou periurbanos descontínuos interligados, necessitando de intervenções para sua regeneração parcial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ecossistema primitivo muito modificado;</li> <li>✓ Cobertura vegetal desmatada ou alterada entre 40 e 50% da área;</li> <li>✓ Assentamentos humanos em expansão relativamente estruturados;</li> <li>✓ Infraestrutura integrada com as áreas urbanas;</li> <li>✓ Glebas relativamente bem definidas;</li> <li>✓ Obras de drenagem e vias pavimentadas;</li> <li>✓ Valor do solo baixo a médio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Recuperação das principais funções do ecossistema/ monitoramento da qualidade das águas;</li> <li>✓ Conservação ou recuperação do patrimônio paisagístico;</li> <li>✓ Zoneamento urbano, industrial, turístico e pesqueiro;</li> <li>✓ Saneamento ambiental localizado.</li> </ul>
<b>5</b> Zona que apresenta a maior parte dos componentes dos ecossistemas primitivos, degradada ou suprimida e organização funcional eliminada devido ao desenvolvimento de áreas urbanas e de expansão urbana contínua, bem como atividades industriais, de apoio, terminais de grande porte, consolidados e articulados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ecossistema primitivo totalmente modificado;</li> <li>✓ Cobertura vegetal remanescente, mesmo que alterada, presente em menos de 40% da área, descontinuamente;</li> <li>✓ Assentamentos urbanizados com rede de área consolidada;</li> <li>✓ Infraestrutura de corte;</li> <li>✓ Serviços bem desenvolvidos;</li> <li>✓ Polos industriais;</li> <li>✓ Alto valor do solo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Saneamento ambiental e recuperação da qualidade de vida urbana, com reintrodução de componentes ambientais compatíveis;</li> <li>✓ Controle de efluentes;</li> <li>✓ Educação ambiental;</li> <li>✓ Regulamentação de intervenção (reciclagem de resíduos) na linha costeira (diques, molhes, píers, etc.);</li> <li>✓ Zoneamento urbano/industrial;</li> <li>✓ Proteção de mananciais.</li> </ul>

**ANEXO C: DADOS DA VALIDAÇÃO DO MODELO  
BALANCE PARA A BACIA DO RIO TRAMANDAÍ**

Para melhor compreensão e análise da eficiência do modelo aplicado na presente dissertação, os dados que deram origem aos gráficos das figuras 5.8 e 5.9, são apresentados abaixo.

Assim, os valores de salinidade obtidos na simulação do marco referencial e os observados (medidos) para o subsistema sul da bacia do Rio Tramandaí estão apresentados na Figura C.1, juntamente com a identificação de cada ponto no sistema lagunar. Com esses dados foi feita uma análise de correlação, chegando a um valor  $R = 0,912385$ , o que indica que o modelo representa satisfatoriamente o ambiente da referida bacia no subsistema sul. A Figura C.2 relaciona os valores de salinidade simulada e medida.

### Subsistema sul

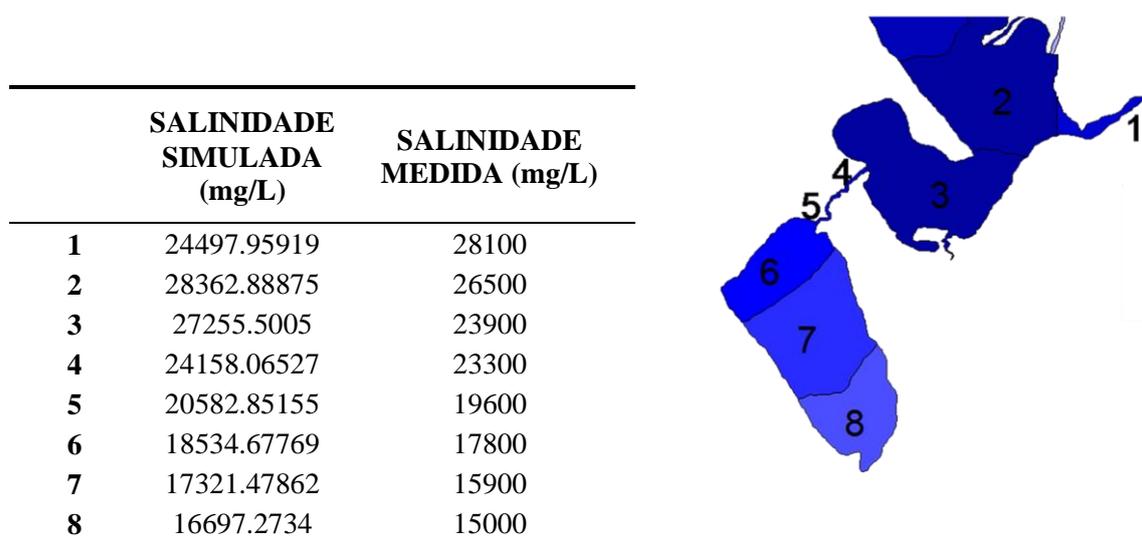


FIGURA C.1 – VALORES DO SUBSISTEMA SUL UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO UTILIZADO.

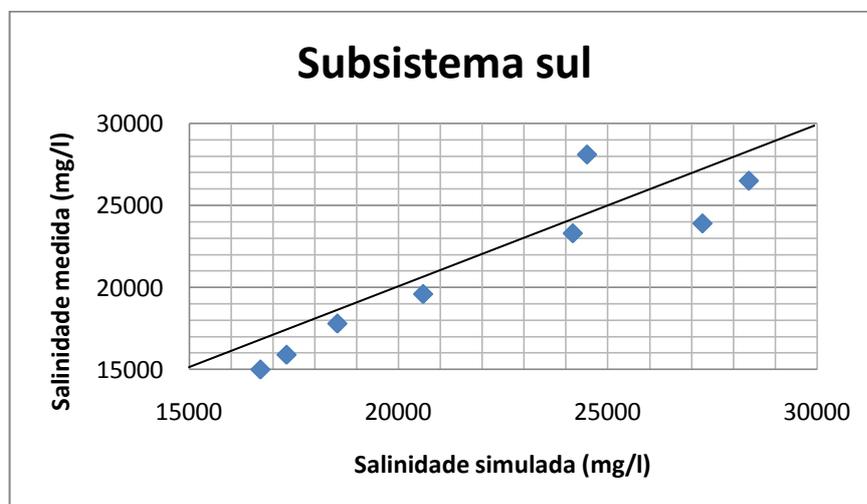


FIGURA C.2 – RELAÇÃO ENTRE A SALINIDADE MEDIDA E A SIMULADA PARA O CENÁRIO DO MARCO REFERENCIAL.

Para o subsistema norte, os dados correspondentes para a simulação (situação atual) e os observados – medidos em campo – são apresentados na Figura C.3. Com os dados do subsistema norte o índice de correlação obtido foi  $R = 0,903549$ , o que também indica que o modelo representou bem o subsistema norte. A Figura C.4 relaciona a salinidade simulada e a medida.

### Subsistema norte

	SALINIDADE SIMULADA (mg/L)	SALINIDADE MEDIDA (mg/L)
1	24497.95919	28100
2	28362.88875	26500
3	25582.91777	25300
4	25426.15954	15000
5	20031.35904	20000
6	17057.66607	19500
7	13358.4223	19000
8	16503.8453	18000
9	16611.70946	15000
10	1178.4409	0.0
11	856.77558	0.0

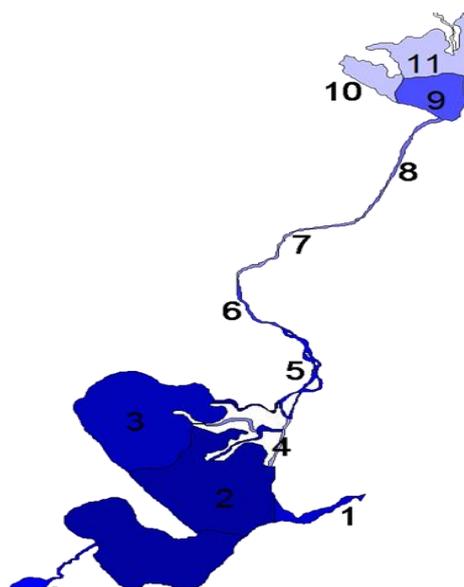


FIGURA C.3 – DADOS DO SUBSISTEMA NORTE UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO UTILIZADO.

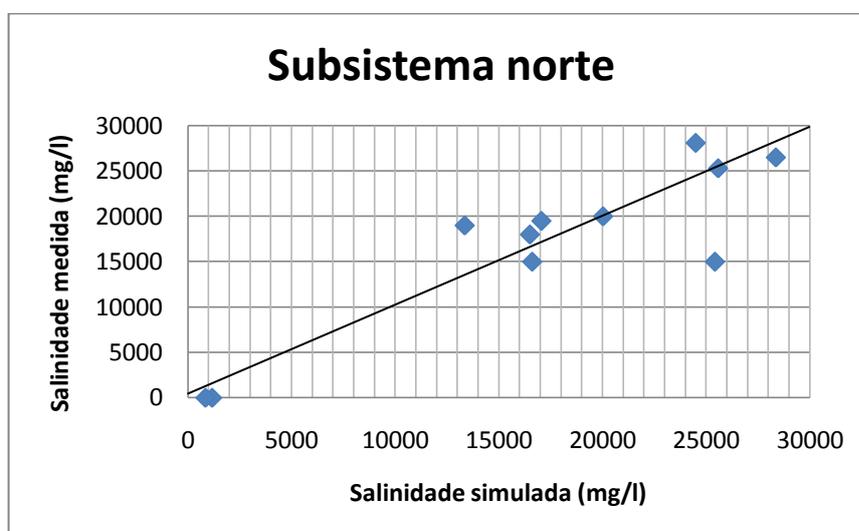


FIGURA C.4 – RELAÇÃO ENTRE A SALINIDADE MEDIDA E A SIMULADA PARA O CENÁRIO DO MARCO REFERENCIAL.