



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REGIME DE VAZÃO DA UHE DE
PEDRA DO CAVALO NO COMPORTAMENTO ESPACIAL E
TEMPORAL DA SALINIDADE NO TRECHO FLUVIOESTUARINO
DO BAIXO CURSO DO RIO PARAGUAÇU À BAÍA DO IGUAPE.**

GABRIEL AGUADÊ DO COUTO

Salvador

2014



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REGIME DE VAZÃO DA UHE DE
PEDRA DO CAVALO NO COMPORTAMENTO ESPACIAL E
TEMPORAL DA SALINIDADE NO TRECHO FLUVIOESTUARINO
DO BAIXO CURSO DO RIO PARAGUAÇU À BAÍA DO IGUAPE.**

GABRIEL AGUADÊ DO COUTO

Dissertação apresentada a Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente, Águas e Saneamento.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Vânia Campos.

Co-Orientadora: Prof^a. Dr^a. Yvonilde Medeiros.

Salvador

2014

C871 Couto, Gabriel Agudê do.

Análise da influência do regime de vazão da UHE de pedra do cavalo no comportamento espacial e temporal da salinidade no trecho fluvioestuarino do baixo curso do Rio Paraguaçu à Baía do Iguape / Gabriel Agudê do Couto. – Salvador, 2014.

143 f. : il. color.

Orientadora: Profa. Dr^a Vânia Campos.

Co-orientadora: Profa. Dr^a. Yvonilde Medeiros.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2014.

1. Estuários. 2. Salinidade - Rio Paraguaçu. 3. Modelagem ambiental. I. Campos, Vânia. II. Medeiros, Yvonilde. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 628.162

MAASA

Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITECNICA

Gabriel Agudê do Couto

Análise da influência do regime de vazão da UHE de Pedra de Cavallo no comportamento espacial e temporal da salinidade no trecho fluvioestuarino do baixo Rio Paraguaçu à Baía do Iguape

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Vânia Palmeira Campos
Universidade Federal da BahiaProfa. Yvonilde Dantas Pinto de Medeiros
Universidade Federal da BahiaProfa. Dra. Magda Beretta
Universidade Federal da BahiaProf. Dr. Paulo Cesar Colonna Rosman
Universidade Federal do Rio de Janeiro

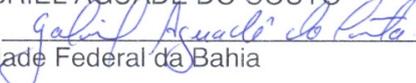
Salvador, 04 de abril de 2014

AUTORIZAÇÃO

Autorizo a reprodução e/ou divulgação total ou parcial da presente obra, por qualquer meio convencional ou eletrônico, desde que citada a fonte.

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO REGIME DE VAZÃO DA UHE DE
PEDRA DO CAVALO NO COMPORTAMENTO ESPACIAL E
TEMPORAL DA SALINIDADE NO TRECHO
FLUVIOESTUARINO
DO BAIXO CURSO DO RIO PARAGUAÇU À BAÍA DO IGUAPE.**

Nome do Autor: GABRIEL AGUADÊ DO COUTO

Assinatura do autor: 

Instituição: Universidade Federal da Bahia

Local: Salvador, BA

Endereço: Rua Aristides Novis, 02 - 4º andar, Federação - Salvador-BA

CEP. 40210-630

E-mail: gaguade@gmail.com

Dedico a DEUS, o arquiteto do universo, que tornou possível a realização desse sonho, colocando pessoas importantes que me auxiliaram na construção do aprendizado durante essa caminhada.

AGRADECIMENTO

Nesse momento especial tenho a oportunidade de reconhecer pessoas que foram importantes pra mim e de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho. Portanto, agradeço imensamente a:

Minha família, por ser a mola mestra que impulsiona a minha vida.

Minha orientadora Prof^a. Vânia Campos e co-orientadora Prof^a. Yvonilde Medeiros na constante formação do meu aprendizado na jornada acadêmica.

A Zanatta, Diretor da Empresa EDZA, pelo incentivo e credibilidade profissional.

Ao Prof. Paulo Rosman no processo de aprendizado da ferramenta de modelagem ambiental SisBaHiA.

Ao Prof. Fernando Genz pelas dicas e contribuições relevantes ao trabalho acadêmico.

Aos meus Amigos que me querem bem e agradeço também, as pessoas que não acreditaram em mim, porque serviu como incentivo e desafio para a conclusão dessa jornada.

RESUMO

Estuários são ambientes de transição entre o oceano e o continente, onde a água do mar é constantemente diluída pelas águas oriundas da drenagem continental, e a salinidade exerce fator determinante na caracterização desses ambientes, razão que, variações no padrão de concentrações determinam o deslocamento e a seleção do biota no ecossistema. A presença de barramento à montante regularizando o aporte de águas doce e materiais dissolvidos e particulados de origem fluvial no estuário exerce impactos consideráveis no processo de diluição das águas. Modelagem ambiental, utilizando-se da construção de cenários pelos modelos matemáticos, tem sido aplicada em estudos, com o objetivo de analisar tais impactos, no comportamento hidrodinâmico e da qualidade de água desses ambientes. O modelo SisBaHiA foi a ferramenta utilizada neste trabalho para a análise dos fenômenos envolvidos nos padrões de circulação das águas e o transporte e dispersão de sais no trecho do baixo curso do rio Paraguaçu à baía do Iguape. Os cenários propostos foram desenvolvidos levando em consideração os aspectos de quantidade, qualidade e sazonalidade das vazões como determinante na elaboração dos hidrogramas ambientais para ser incorporado no regime de operação da UHE Pedra do Cavalo, considerando os períodos hidrológicos característicos da região, as demandas prioritárias, o ecossistema e as populações ribeirinhas que habitam as margens do trecho fluvioestuarino, e utilizam-se dos recursos disponibilizados pelo ambiente. Os cenários modelados identificaram os padrões de circulação hidrodinâmica e a verificação da intrusão salina através da identificação da isohalina 5‰ no ambiente, relacionada com a magnitude das vazões operadas, auxiliando no processo de definição do ambiente que deverá ser mantido na região, atendendo aos diversos interesses da população e do ecossistema estuarino.

Palavras-Chave: Modelagem Ambiental, Salinidade, Intrusão Salina, Vazão Ambiental, Rio Paraguaçu.

ABSTRACT

Estuaries are transitional environments between the ocean and the land, where the sea water is constantly diluted by waters originating from continental drainage and salinity exerts a determining factor in the characterization of these environments, so that variations in the pattern of concentrations determine the displacement and selection of species in the ecosystem. The presence of barrier upstream regulating the supply of fresh water and dissolved and particulate materials of fluvial origin in the estuary exerts considerable impacts on the water dilution process. Environmental modeling, using the construction of scenarios by mathematical models, has been applied in studies aiming to analyze these impacts on the hydrodynamics and water quality of these environments. The SisBaHiA model was the tool used in this paper for the analysis of the events involved in the circulation patterns of water and transport and dispersion of salts in the stretch of the lower course of the Paraguaçu river to the Iguape bay. The proposed scenarios were developed taking into consideration the quantity, quality and seasonality of the flows to create environmental hydrographs to be incorporated into the operating plans of Pedra do Cavalo hydroelectric plant, considering the hydrological conditions characteristic of the region, the critical water demands, and the riverside ecosystems and populations that inhabit the banks of the fluvial estuarine stretch and use the resources of this environment. The modeled scenarios identified patterns of hydrodynamic circulation and verification of salt intrusion by identifying the 5‰ isohaline in the environment related to the magnitude of flows used to operate the plant, assisting in the process of determining the appropriate environment that should be maintained for the region, given the diverse interests of the estuarine population and ecosystem.

Key-words: Environmental Modeling, Salinity, Salt Intrusion, Environmental outflow, Paraguaçu river.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivo Geral	3
2.1. Objetivos Específicos.....	3
3. Revisão Bibliográfica	4
3.1. Estuários e suas classificações	4
3.1.1. Estuários quanto à variação da salinidade.....	7
3.1.2. Estuários quanto à dominância das forçantes no padrão de circulação	9
3.1.3. Estuários quanto à amplitude de maré	11
3.1.4. Estuários quanto à geomorfologia	11
3.1.5. Hidrodinâmica Estuarina.....	12
3.2. Salinidade	16
3.3. Barragens	19
3.3.1. Impactos ocasionados pela construção de barragens	22
3.3.2. Impactos da construção de barragens em estuários	23
3.4. Caracterização da área do estudo: A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu ..	24
3.4.1. Caracterização física do rio Paraguaçu	26
3.4.2. Caracterização do estuário do rio Paraguaçu	27
3.4.3. Caracterização do trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu	29
3.4.4. Caracterização da barragem Pedra do Cavalo.....	33
3.4.5. Possíveis impactos ocasionados pelas atividades na bacia	39
3.5. Modelagem matemática para a simulação hidrodinâmica e de qualidade da água	40
3.5.1. Fundamentos básicos do processo de modelagem.....	40
3.5.2. A Escolha do modelo computacional para a simulação hidrodinâmica e de qualidade de água	42
4. Metodologia	45
4.1. Modelagem matemática para a simulação hidrodinâmica e de qualidade de água	45
4.2. Definição dos parâmetros da modelagem: Modelagem geométrica do terreno.....	45
4.2.1. Definição do contorno terra e contorno aberto.....	46
4.2.2. Discretização espacial e temporal	47

4.2.3.	Dados utilizados na modelagem e calibração	49
4.2.3.1.	Correntometria.....	49
4.2.3.2.	Condutividade elétrica, temperatura, profundidade e turbidez	51
4.2.3.3.	Discretização vertical da coluna de água	52
4.2.3.4.	Marés astronômicas e meteorológicas	54
4.2.3.5.	Vazão afluyente ao domínio da modelagem	56
4.3.	Procedimento para análise dos dados.....	57
4.4.	Processo de calibração e validação da modelagem.....	58
4.4.1.	Condições adotadas na simulação hidrodinâmica e de qualidade de água no processo de calibração e validação do modelo.....	59
4.4.2.	Processo de calibração hidrodinâmica	61
4.4.2.1.	Ponto Amostral 1 (PA 1).....	62
4.4.2.2.	Ponto Amostral 2 (PA 2).....	66
4.4.2.3.	Ponto Amostral 3 (PA 3).....	70
4.4.3.	Processo de calibração do modelo de qualidade da água	74
4.4.3.1.	Ponto Amostral 1 (PA 1).....	75
4.4.3.2.	Ponto Amostral 2 (PA 2).....	79
4.4.3.3.	Ponto Amostral 3 (PA 3).....	84
4.4.4.	Processo de validação hidrodinâmica	90
4.4.4.1.	Ponto Amostral 1 (PA 1).....	90
4.4.5.	Processo de validação do modelo de transporte de sais	95
4.4.5.1.	Ponto Amostral 1 (PA 1).....	95
5.	Cenários propostos para a simulação hidrodinâmica e da qualidade de água no trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu.....	97
	Condições hidrológicas dos cenários ano seco, ano úmido e ano 2011-2012	98
5.1.1.	Ponto Amostral 1 (PA 1)	99
5.1.2.	Ponto Amostral 2 (PA 2)	102
5.1.3.	Ponto Amostral 3 (PA 3)	104
5.2.	Condições hidrológicas do cenário vazão restrição máxima	113
6.	Considerações finais.....	115
7.	Recomendações	118
8.	Referências	119

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tipologia de leitos no canal fluvial (Adaptado de Cunha & Guerra, 2012).....	13
Tabela 2 - Classificação de ambientes costeiros em relação a salinidade (‰) (Adaptado de Venice, 1958).....	19
Tabela 3 - Principais características do reservatório (COELBA & CNO, 2000)	34
Tabela 4 - Principais características do barramento principal (COELBA & CNO, 2000).....	34
Tabela 5 - Principais características do dique 1 (COELBA & CNO, 2000).....	34
Tabela 6 - Principais características do dique 2 (COELBA & CNO, 2000).....	35
Tabela 7 - Principais características do vertedouro (COELBA & CNO, 2000)..	35
Tabela 8 - Dados de velocidade média e vazões medidas e simuladas no PA 1 em 25/02/2013.....	63
Tabela 9 - Dados de velocidade média e vazões medidas e simuladas no PA 2 em 26/02/2013.....	67
Tabela 10 - Dados de velocidades médias e vazões medidas e simuladas no PA 3 em 27/02/2013.....	71
Tabela 11 - Dados medidos e simulados de salinidade (‰) horária para o PA 1 no dia 25/02/2013.....	76
Tabela 12 - Dados medidos e simulados de salinidade horária para o PA 2 no dia..	82
Tabela 13 - Dados medidos e simulados de Salinidade (‰) para o PA 3 no dia 27/02/2013.....	87
Tabela 14 - Dados de velocidade média e vazões medidas e simuladas no PA 1 em 11/11/2011.....	92
Tabela 15 - Dados de Salinidade média na coluna d'água observadas e simuladas no PA 1 em 12/11/2011..	95

Lista de Figuras

Figura 1 - Principais setores de um estuário proposto por Dionne (1963) (Adaptado de Perillo, 1995)	5
Figura 2 - Delimitação funcional de um sistema estuarino, subdivisões geomorfológicas e os processos na ZR, ZM e ZC. (S = salinidade em ‰) (Adaptado de Miranda <i>et al.</i> , 2002 p.44).....	8
Figura 3 - Classificação de tipos de estuários segundo Pritchard (1952), junto ao padrão de estratificação vertical da salinidade em 4 diferentes pontos do estuário (Genz, 2006)	10
Figura 4 - Barragens e açudes construídos, em construção e projetados por bacia hidrográfica no Estado da Bahia em 2010 (GeografAR, 2010).....	21
Figura 5 - Caracterização da RPGA – X da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu-Bahia (INEMA, 2013).....	25
Figura 6 - Sistema do estuário do rio Paraguaçu formados pelos setores baixo curso do rio Paraguaçu, Baía do Iguape e Canal de São Roque, interligando-o à Baía de Todos os Santos/BA (INEMA/UFBA, 2013c).....	28
Figura 7 - Localização dos pontos amostrais (PA's) no baixo curso do rio Paraguaçu e demais regiões do estuário (INEMA/UFBA, 2012)	31
Figura 8 - Perfil da seção transversal do PA 1 realizado na campanha de fevereiro de 2013 (INEMA/UFBA, 2013a).....	32
Figura 9 - Perfil da seção transversal do PA 2 realizado na campanha de fevereiro de 2013 (INEMA/UFBA, 2013a).....	32
Figura 10 - Perfil da seção transversal do PA 3 realizado na campanha de fevereiro de 2013 (INEMA/UFBA, 2013a).....	33
Figura 11 - Visão parcial da barragem e reservatório de Pedra do Cavalo (Votorantim Energia, 2013).	35
Figura 12 - Fluxograma dos processos da modelagem (Adaptado de Rosman <i>et al.</i> , 2013)	40
Figura 13 - Mapa base contendo os contornos terra e aberto (limite de mar).....	47
Figura 14 - Malha do domínio da modelagem com elementos finitos quadrangulares.	48
Figura 15 - Perfilador acústico ADCP e embarcação de pequeno porte com o ADCP fixado.....	50
Figura 16 - Esquema de operação de medição de correntes utilizando o Perfilador Acústico de Correntes com efeito Doppler (ADCP) fixado à embarcação (INEMA/UFBA, 2013c).....	50

Figura 17 - Lançamento da sonda CTD e o Perfil da seção transversal do PA 3 no trecho fluvioestuarino (INEMA/UFBA, 2013c).....	52
Figura 18 - Mapa da batimetria do domínio da modelagem interpolado pelo SisBaHiA.....	53
Figura 19 - Representação das camadas dos MMP e MRP. A região cinza representa a área do terreno e as espessuras das camadas são ilustrativas (Rosman <i>et al.</i> , 2013)	54
Figura 20 - Constantes Harmônicas da estação 143-São Roque-BA (FEMAR, 2013)	55
Figura 21 - Curva de maré no estuário do rio Paraguaçu em Fevereiro de 2013.	56
Figura 22 - Variações de nível d'água medido em Cachoeira e simulado para o PA 1.....	62
Figura 23 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de nível d'água medidos e simulados no PA 1	63
Figura 24 - Velocidades médias observadas comparadas com as velocidades médias simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.....	64
Figura 25 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de velocidades medidas e simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013..	65
Figura 26 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.....	65
Figura 27 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.....	66
Figura 28 - Velocidades médias observadas comparadas com as velocidades médias simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.....	68
Figura 29 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de velocidades medidas e simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.	68
Figura 30 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.....	69
Figura 31 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.....	69
Figura 32 - Variações de nível d'água previsto em Najé e simulado para o PA 3.....	70
Figura 33 - Análise estatística entre os dados de nível d'água previsto em Najé e simulado no PA 3.....	71
Figura 34 - Velocidades medidas comparada com as velocidades medidas no PA 3 para o dia 27/02/2013.	72
Figura 35 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.....	73
Figura 36 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.....	73

Figura 37 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.....	74
Figura 38 - Variação vertical média da salinidade, temperatura e turbidez na coluna d'água no PA 1 (INEMA/UFBA, 2013a)	75
Figura 39 - Variação vertical horária da salinidade na coluna d'água no PA 1 (INEMA/UFBA, 2013a).....	76
Figura 40 - Salinidade média observadas e simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.....	77
Figura 41 - Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 12h (Baixa-mar).	78
Figura 42 - Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 18h (Preamar).....	79
Figura 43 - Variação vertical média da salinidade, temperatura e turbidez ao longo da coluna d'água para o PA 2 no dia 26/02/2013 (INEMA/UFBA, 2013a).....	80
Figura 44 - Variação vertical horária da salinidade ao longo da coluna d'água para o PA 2 no dia 26/02/2013 (INEMA/UFBA, 2013a).....	81
Figura 45 - Salinidade média observadas e simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.	82
Figura 46 - Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 12h (Baixa-mar)..	83
Figura 47 - Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 18h (Preamar). ...	84
Figura 48 - Variação vertical média da salinidade, temperatura e turbidez ao longo da coluna d'água na seção do PA 3 (INEMA/UFBA, 2013a).....	85
Figura 49 - Variação vertical horária da salinidade durante um ciclo completo de maré (13 horas) em regime de sizígia, ao longo da coluna d'água na seção PA 3 (INEMA/UFBA, 2013a).....	86
Figura 50 - Representação gráfica dos dados medidos e simulados de Salinidade horária no PA 3	87
Figura 51 - Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 12h (Baixa-mar).	88
Figura 52 – Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 18h (Preamar) ...	89
Figura 53 - Variações de nível d'água previsto em Cachoeira e simulado para o PA 1 no dia 10/11/2011	91
Figura 54 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de nível d'água previstos e simulados no PA 1.....	91
Figura 55 - Velocidades médias observadas comparadas com as velocidades médias simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.....	93
Figura 56 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de velocidades médias observadas e simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011	93

Figura 57 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.....	94
Figura 58 – Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.....	94
Figura 59 – Hidrogramas ambientais defluentes da usina para os períodos hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012.	98
Figura 60 - Vazões simuladas para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 1.....	100
Figura 61 – Salinidade (‰) para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 1.....	101
Figura 62 - Vazões simuladas para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 2.....	102
Figura 63 - Salinidade (‰) para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 2.....	103
Figura 64 - Vazões simuladas para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 3.....	104
Figura 65 - Salinidade (‰) para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 3.....	105
Figura 66 - Perfil longitudinal da Salinidade (‰) para o cenário ano seco e nas condições: a)maré de sizígia – período de cheia – preamar; b)maré de sizígia – período de cheia – baixa-mar; c)maré de sizígia – período de estiagem – preamar. d) maré de sizígia – período de estiagem – baixa-mar.....	107
Figura 67 - Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano seco e nas condições: a)maré de quadratura – período de cheia – preamar; b)maré de quadratura – período de cheia – baixa-mar; c)maré de quadratura – período de estiagem – preamar. d) maré de quadratura – período de estiagem – baixa-mar	108
Figura 68 - Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano úmido e nas condições: a)maré de sizígia – período de cheia – preamar; b)maré de sizígia – período de cheia – baixa-mar; c)maré de sizígia – período de estiagem – preamar. d) maré de sizígia – período de estiagem – baixa-mar.....	109
Figura 69 - Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano úmido e nas condições: a)maré de quadratura – período de cheia – preamar; b)maré de quadratura – período de cheia – baixa-mar; c)maré de quadratura – período de estiagem – preamar. d) maré de quadratura – período de estiagem – baixa-mar	110
Figura 70 - Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano 2011-2012 e nas condições: a)maré de sizígia – período de cheia – preamar; b)maré de sizígia –	

período de cheia – baixa-mar; c)maré de sizígia – período de estiagem – preamar. d) maré de sizígia – período de estiagem – baixa-mar.....	111
Figura 71 - Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano 2011-2012 e nas condições: a)maré de quadratura – período de cheia – preamar; b)maré de quadratura – período de cheia – baixa-mar; c)maré de quadratura – período de estiagem – preamar; d) maré de quadratura – período de estiagem – baixa-mar	112
Figura 72 - Vazões simuladas utilizando o hidrograma defluente da barragem para o cenário vazão restrição máxima no trecho fluvioestuarino e no instante que o nível de maré esteve mais alto.....	114
Figura 73 - Salinidade simuladas utilizando o hidrograma defluente da barragem para a vazão de vazão restrição máxima no trecho fluvioestuarino	115

Siglas, Abreviaturas e Símbolos

- ADCP – Perfilador Acústico de Correntes com efeito Doppler.
- ANA - Agência Nacional da Águas.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.
- APA – Área de Proteção Ambiental
- BBM - Building Block Methodology.
- BI – Baía de Iguape.
- BM – Baixa-mar.
- BTS - Baía de Todos os Santos.
- CEPRAM – Conselho Estadual do Meio Ambiente.
- CERB - Companhia de Engenharia Ambiental da Bahia.
- COPPE – Coordenação de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia.
- CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- CTD - Sonda Hidrográfica utilizada para medir condutividade, temperatura, profundidade e turbidez relativa.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação (Marinha do Brasil).
- EMBASA - Empresa Baiana de Saneamento S.A.
- Etr - Evapotranspiração Real.
- FEMAR - Fundação de Estudos do Mar.
- GeografAR - Geografia dos Assentamentos na Área Rural.
- IAPSO - International Association for the Physical Sciences of the Ocean
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- ICES – International Council for the Exploration of the sea.
- ICOLD - International Commission on Large Dams
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
- INEMA – Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos.
- INGÁ – Instituto de Gestão das Águas e Clima.
- JPOTS – Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards
- KCl – Cloreto de Potássio.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente.
- NR - Nível de Redução da maré.
- PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas.
- PM – Preamar.

PNRH – Plano Nacional de Recursos Hídricos

PSU (Practical Salinity Units).

Q – Vazão.

Q_{95} - Vazão de Estiagem.

Q_m – Vazão Média.

Q_{reg} – Vazão Regularizada.

RPGA - Região de Planejamento e Gestão das Águas.

SCOR – Scientific Committee on Oceanic Research

SisBaHiA – Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. SRH - Superintendência de Recursos Hídricos.

UFBA – Universidade Federal da Bahia.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UHE – Usina Hidrelétrica.

UHEPC – Usina Hidrelétrica de Pedra do Cavalo.

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.

1. INTRODUÇÃO

O estuário é uma zona de transição entre as águas do escoamento da bacia hidrográfica que se misturam às águas marítimas. É um ambiente costeiro que depende das condições das forçantes fluvial e de maré, que influenciam nos processos de circulação e troca de energia do ambiente, bem como nas características físicas, químicas e biológicas do meio. Entre tais características, a salinidade possui relevância na determinação da seletividade espacial dos organismos e podem variar a concentração de sais ao longo do corpo hídrico, tornando regiões mais ou menos propícias para alguns peixes e mariscos que podem ser cultivados e extraídos pelas comunidades ribeirinhas da região.

Mudanças no padrão de salinidade possuem efeitos na mobilidade do biota aquático ao longo do estuário, em diferentes estágios do ciclo de vida. Por causa dessas alterações, alguns organismos são encontrados em determinada faixa de salinidade, por serem sensíveis a grandes variações no ambiente.

A área em estudo (baixo curso do rio Paraguaçu) é classificada como uma região fluvioestuarina possuindo influência da forçante de maré, a presença de um barramento a montante e uma baía à jusante (Iguape). Tais características são especiais e peculiares, em especial pela extensão da Baía de Todos os Santos (BTS), onde está localizada a Baía de Iguape.

As informações, recursos financeiros e colaborações necessárias para o desenvolvimento do estudo foram disponibilizados pelo contrato n° 012/09 firmado em 29 de julho de 2009, entre o Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ), atual Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) e a Universidade Federal da Bahia (UFBA), referente ao Estudo do Regime de Vazões Ambientais a jusante da UHE de Pedra do Cavalo – Baía do Iguape, tendo em vista aos efeitos decorrentes da implantação da barragem e operação da usina hidroelétrica sobre o biota aquático e as atividades econômicas desenvolvidas na Baía do Iguape.

O objetivo daquele estudo consistiu na definição de um regime de vazão que atendesse às demandas, em quantidade, qualidade e distribuição de águas,

necessárias à manutenção dos componentes, funções e processos dos ecossistemas aquáticos dos quais as comunidades locais necessitam. Para o desenvolvimento daquele estudo foi adotada a metodologia de construção de blocos – *Building Block Methodology* (BBM) (KING, 2008), por envolver claramente, não apenas os aspectos biofísicos, mas também as questões socioeconômicas e institucionais da região.

A motivação de se estudar a variação temporal e espacial da salinidade no trecho fluviestuário do rio Paraguaçu que compreende a barragem de Pedra do Cavalo e todo o trecho a jusante até a baía de Iguape, foi a necessidade de se compreender e verificar as alterações na caracterização ambiental de trechos a jusante de barramentos, em decorrência da regularização do aporte de água, na determinação da condição ambiental e na característica do biota que se desenvolverá na região.

Corroborando também, como motivação para o estudo detalhado da variação do perfil longitudinal da salinidade e comportamento hidrodinâmico da região, registrados especificamente, no bloco de pesquisas socioeconômicas dos Estudos do Regime de Vazões Ambientais a jusante da UHE de Pedra do Cavalo – Baía de Iguape foram os relatos das populações ribeirinhas de Cachoeira e São Félix a exemplo de: “Estão aparecendo mariscos na região onde não se via, como o sururu, chumbinho e peixes de água salgada, que só era visto na região de Maragogipe”. “Isso está acontecendo, porque o rio está salgado. Tem sururu até embaixo da ponte de Cachoeira/São Félix” (informação verbal)¹.

Perillo (1995) destacou a influência da entrada de água doce no ambiente estuarino como sendo regulador dos processos existentes no meio:

“as descargas fluviais são de extrema relevância para a ocorrência dos processos físicos, químicos, biológicos e geológicos nos sistemas estuarinos. Neste tipo de ecossistema, variações na descarga de água doce influenciam os padrões de circulação e de mistura, a diluição e a intrusão do sal, o transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes, e também a regulação da distribuição das comunidades biológicas” (PERILLO, 1995, p.20).

Alber (2002) relatou sobre a importância da salinidade como fator determinante na caracterização dos ambientes estuarinos: “A salinidade é o determinante crítico das características de um estuário, e deslocamento na isohalina causados por variações na

¹ Notícia fornecida pelo Estudo de regime de vazões ambientais. Projeto Iguape Sustentável. Salvador, novembro de 2012.

entrada de água doce, pode afetar a distribuição da vegetação enraizada e de organismos sésseis”.

O regime de operação da barragem de Pedra do Cavalo possui grande importância na regulação da vazão afluente ao estuário e a baía de Iguape, além da funcionalidade de proteção contra enchentes nos períodos de cheias nas cidades de Cachoeira e São Félix, contudo, sendo determinante da quantidade e qualidade da água que escoar da bacia hidrográfica do rio Paraguaçu para o estuário, barrando os sedimentos naturais transportados da cabeceira do rio, diminuindo o aporte de água doce, tornando o ambiente mais salino, por causa do domínio da força de maré. Tais impactos trazem diversas consequências ao ambiente estuarino, como a perda da biodiversidade de espécies de modo geral, que é uma das principais características dos estuários.

2. OBJETIVO GERAL

Analisar a variação espacial e temporal da salinidade no trecho a jusante da barragem de Pedra do Cavalo, visando contribuir na definição das vazões liberadas pela operação da usina hidroelétrica sobre a qualidade da água.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a circulação hidrodinâmica e padrões de salinidade em função do regime de vazões liberadas pela UHE de Pedra do Cavalo.
- Analisar com dados medidos em campo e simulados pelo modelo a variação longitudinal da salinidade no trecho fluviestuário que compreende o baixo curso do rio Paraguaçu, próximo a barragem Pedra do Cavalo à baía de Iguape.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será realizada a revisão da literatura para fundamentar os estudos realizados da compreensão e entendimento dos componentes e fenômenos envolvidos na região de estudo que será objeto desse trabalho. O capítulo foi subdividido em 5 subitens da seguinte forma. No primeiro bloco de subitens serão abordados os conceitos e definições de estuários e suas classificações baseadas nos aspectos da variação de salinidade, padrão de circulação, amplitude de maré, geomorfologia dos estuários e os processos, fenômenos e fatores que envolvem a circulação hidrodinâmica e o transporte de dispersão de substâncias. No segundo bloco serão descritos os processos, definições e conceitos sobre a salinidade e sua importância na caracterização ambiental. No terceiro bloco foram abordados os aspectos relevantes na construção de barragens para a matriz energética e os possíveis impactos ocasionados pela sua presença modo geral e especialmente, a montante de estuários. No quarto bloco serão descritas as caracterizações da área de estudo, desde a sua localização até as características peculiares do trecho fluvioestuarino de interesse. Por fim, no último bloco de subitens serão relatados os fatores relevantes na definição do modelo computacional e o processo de construção da modelagem que simulará a hidrodinâmica e o transporte de sais da região para as análises propostas pelo estudo.

3.1 ESTUÁRIOS E SUAS CLASSIFICAÇÕES

Os ecossistemas estuarinos são encontrados em todas as regiões litorâneas do globo, em diferentes condições climáticas e influência dos regimes fluvial e de marés. São considerados ambientes geológicos relativamente recentes e a sua formação está relacionada à inundação dos vales dos rios e planícies costeiras a partir de variações do nível do mar através dos processos eustáticos e isostáticos ou até mesmo por processos tectônicos, que ocorreram há cerca de 5.000 anos, ao final da última transgressão marinha (MIRANDA *et al.*, 2002).

Os estuários possuem inúmeras definições baseadas nas suas características físicas, químicas, biológicas, ecológicas, morfológicas e geológicas. Segundo as definições de diversos autores e algumas dessas, são citadas a seguir:

Dionne (1963) *in* Fairbridge (1980) *apud* Perillo (1995), definiu o estuário quanto à morfodinâmica como sendo:

“um braço de mar que penetra um vale fluvial até o limite de penetração da maré, sendo subdividido em três setores: o baixo estuário (estuário marinho), com conexão livre com o mar aberto, o médio estuário, com intensas misturas de água doce e salgada e o alto estuário (estuário fluvial), sem a presença de água salina, mas sujeito a ação das marés” (Dionne, 1963 in Fairbridge, 1980 apud Perillo, 1995 p. 25).

A Figura 1 representa a subdivisão morfodinâmica do estuário baseado na proposta de Dionne (1963).



Figura 1 - Principais setores de um estuário proposto por Dionne (1963) (Adaptado de Perillo, 1995).

Perillo (1995) identificou através de pesquisas em dicionários e enciclopédias que nos últimos 40 anos houve um avanço nas definições de estuário, relacionando mais de quarenta diferentes definições dos especialistas sobre estuário, abordando a importância da multi e interdisciplinaridade para se obter o adequado entendimento a cerca de um simples estuário ou mesmo para alcançar as peculiaridades existentes no ambiente. Portanto, baseado nas características físicas, químicas, biológicas, ecológicas e geológicas, o autor propõe a definição de estuário como:

“Estuário é um corpo de água costeiro semifechado que se estende seu limite até a influência da maré, dentro do qual a água marinha que entra por uma ou mais conexões com o mar aberto, ou qualquer outro corpo de água salina, é significativamente diluída com água doce proveniente da drenagem do continente, e pode sustentar espécies biológicas eurialinas em parte ou em todo o seu ciclo de vida” (PERILLO, 1995, p.26).

Em 2002, Miranda *et al.* apropriaram-se da definição de estuários como sendo:

“Estuário é um sistema de transição entre o continente e o oceano, apresentando altas complexidades. Do ponto de vista biológico são sistemas mais produtivos do

que os oceanos adjacentes e que os rios por apresentarem altas concentrações de nutrientes que favorecem a produção primária. Portanto, as descargas fluviais são de grande importância para os processos estuarinos e para manter o equilíbrio natural da zona costeira” (MIRANDA et al. 2002)

A definição clássica de estuários por Cameron e Pritchard, (1963 *apud* PERILLO, 1995), que foi modificada da versão original de Pritchard, (1952), adaptada por Dyer, (1997) e aceita por Miranda *et al.*, (2002) e por outros autores é que:

“Estuário é um corpo de água costeiro semiconfinado com ligação livre ao oceano, estendendo-se rio acima até o limite da influência da maré sendo que em seu interior a água do mar é significativamente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental” (MIRANDA et al. 2002)

Miranda *et al.*, (2002), descreveram que os estuários são ambientes importantes para o surgimento e desenvolvimento das cidades por serem propícios a instalações de portos comerciais e marítimos, constituindo uma importante conexão para o interior dos continentes, e há renovações constantes de suas massas d'águas pelo processo de mistura através da ação da força de maré, o que viabiliza o crescimento das atividades econômicas, sociais e de lazer nestes ambientes.

A entrada de água doce é amplamente reconhecida como um fator essencial para influenciar a produtividade biológica de estuários em todos os níveis básicos de interação, ou seja, com efeitos diretamente relacionados com as características físicas, químicas e biológicas desses ambientes.

Segundo Powell *et al.*, (2002) os papéis funcionais do aporte de água doce na ecologia de ambientes estuarinos foram cientificamente avaliados por pesquisadores anteriores (HACKNEY, 1978; CROSS & WILLIAMS, 1981; TEXAS DEPARTMENT OF WATER RESOURCES, 1982; SKRESLET, 1986; SKLAR & BROWDER, 1998; ALBER, 2002; ESTEVEZ, 2002) e acrescento alguns estudos realizados na mesma região de interesse (LIMA & LESSA, 2002; XAVIER, 2002; GENZ, 2006; LESSA, *et al.*, 2009). Os efeitos positivos são conhecidos pelos padrões de circulação estuarina, diluição da salinidade, transporte de sedimentos, fontes de nutrientes e a produção e diversidade de peixes costeiros comercialmente valiosos, enquanto que, a maioria dos efeitos negativos estão relacionados ao transporte de compostos tóxicos, poluentes e patógenos que são carregados pela drenagem continental para

dentro do estuário, aumento na salinidade, ocasionando alterações ambientais e o deslocamento do biota aquático sensíveis à modificação das características do ambiente natural.

Existem diversas classificações sobre estuário encontradas na literatura, e os autores classificam-no baseado na variação de salinidade das águas, padrão de circulação, amplitude de maré e características geomorfológicas. Segundo Kjerfve (1989), a maioria das classificações foi baseada nas características geomorfológicas, apesar de não haver um consenso entre os autores. A seguir são descritas as principais classificações de estuário.

3.1.1 ESTUÁRIOS QUANTO À VARIAÇÃO DA SALINIDADE

Dyer (1997) utilizou a classificação baseado nos padrões de variação de salinidade que foram introduzidos por Pritchard (1955) e está associada aos fatores hidrodinâmicos como o padrão de circulação das águas devido à variação das densidades, a influência das forçantes fluvial e de maré, onda e campo de vento.

A Figura 2 representa a subdivisão do estuário em zonas de acordo com a salinidade das massas d'água e predominância das forçantes fluvial e de maré, que determina o padrão de circulação e precipitação do material particulado e dissolvido constituinte das águas (MIRANDA *et. al.*, 2002). As zonas podem ser descritas como sendo:

- Zona de Maré do Rio (ZR): região onde a salinidade das águas é menor que 1‰, estando sob o domínio da forçante fluvial, mas sob influência da maré;
- Zona de Mistura (ZM): região onde a salinidade das águas está entre 1‰ a 35‰, ocorrendo a misturas das massas d'água. Também, nessa região, está inserida a zona de máxima turbidez que possui salinidade variando entre 4‰ a 8‰, possui uma maior concentração de materiais dissolvidos e particulados e ocorre equivalência das forçantes fluvial e de maré;
- Zona de Maré Oceânica ou Costeira (ZC): região localizada na desembocadura do estuário até o limite da pluma estuarina possui a

salinidade maior que 35‰, dependendo da região, e é influenciada pela forçante de maré.

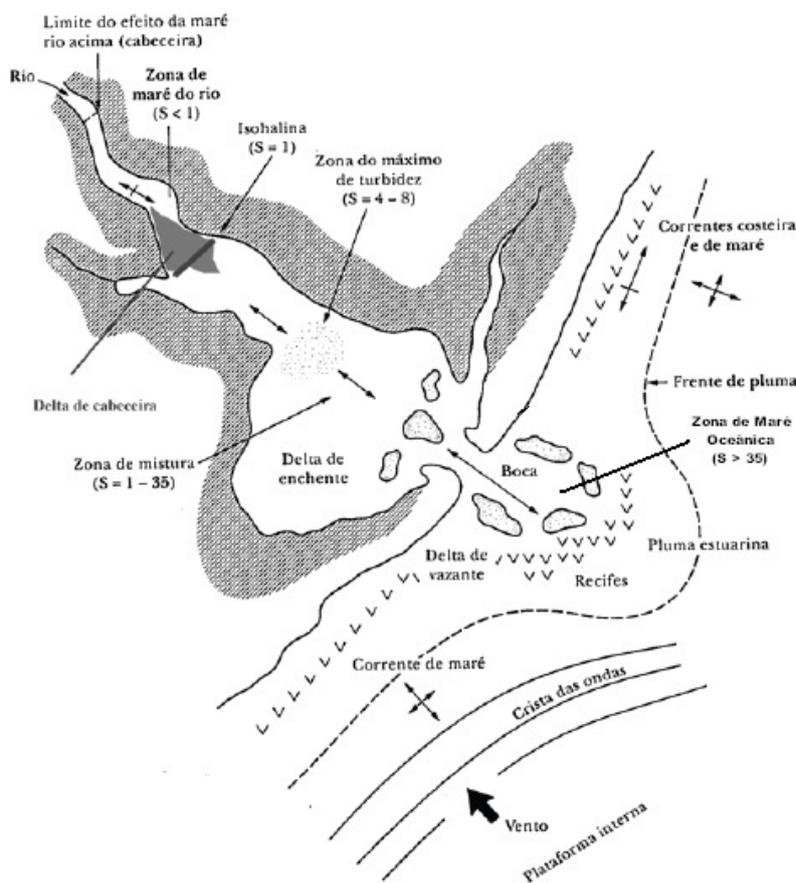


Figura 2 - Delimitação funcional de um sistema estuarino, subdivisões geomorfológicas e os processos na ZR, ZM e ZO. (S = salinidade em ‰) (Adaptado de Miranda *et al.*, 2002 p.44).

Baseado nas definições de estuário com as abordagens geomorfológicas realizadas por Dionne (1963) e Kjerfve (1989), que subdividiam os estuários em zonas, os processos reinantes são mais relevantes na zona fluvial (ZR) e na zona de mistura (ZM). Na ZR os movimentos podem ser unidirecionais e a massa d'água é predominantemente de origem fluvial. Na região de transição entre a ZR e a ZM, a velocidade resultante é praticamente próxima a zero ou nula, não ocorrendo o transporte de materiais dissolvidos e particulados pelas águas, favorecendo ao processo de floculação, que com o aumento de massa dos materiais, precipitam no fundo, aumentando a formação de sedimentos. Portanto, essa região é considerada como a zona de máxima turbidez, onde há a predominância do transporte difusivo na coluna d'água e conseqüentemente, a diminuição do aporte de nutrientes para as demais zonas a montante do estuário. Nessa região, também, possibilita a formação

de bancos no fundo pelo acúmulo de materiais, o que torna mais difícil a navegação de embarcações (MIRANDA *et al.*, 2002).

3.1.2 ESTUÁRIOS QUANTO À DOMINÂNCIA DAS FORÇANTES NO PADRÃO DE CIRCULAÇÃO

Os estuários também podem ser classificados quanto à variação vertical da salinidade na coluna d'água, podendo variar de estratificado ou de cunha salina para bem misturado ou homogêneo. Estuário em que a força fluvial é predominante sobre a força de maré é classificado como estratificado ou de cunha salina, ou seja, valor de salinidade é bem menor nas águas superficiais, do que nas águas de fundo, caracterizando a alta variabilidade salina no perfil vertical da coluna d'água (DYER, 1997). Portanto, o aporte de nutrientes do rio para as zonas adjacentes do estuário é realizado na superfície das águas, ocorrendo pouca difusão e acumulação do sedimento fluvial no fundo do estuário.

Quando a força de maré é dominante em relação à força fluvial o estuário é classificado como sendo bem misturado ou homogêneo, ou seja, não existe variação vertical significativa de salinidade ao longo da coluna d'água. As concentrações de sal na massa de água são verticalmente equivalentes na superfície e fundo do estuário, ocorrendo variação apenas na direção longitudinal a montante do estuário (DYER, 1997).

Entretanto, quando a força fluvial e a força de maré são equivalentes o estuário é classificado como parcialmente misturado. Neste tipo de estuário a variação do gradiente de salinidade ocorre de maneira gradativa tanto na coluna d'água quanto ao longo do estuário (Figura 3) (DYER, 1997).

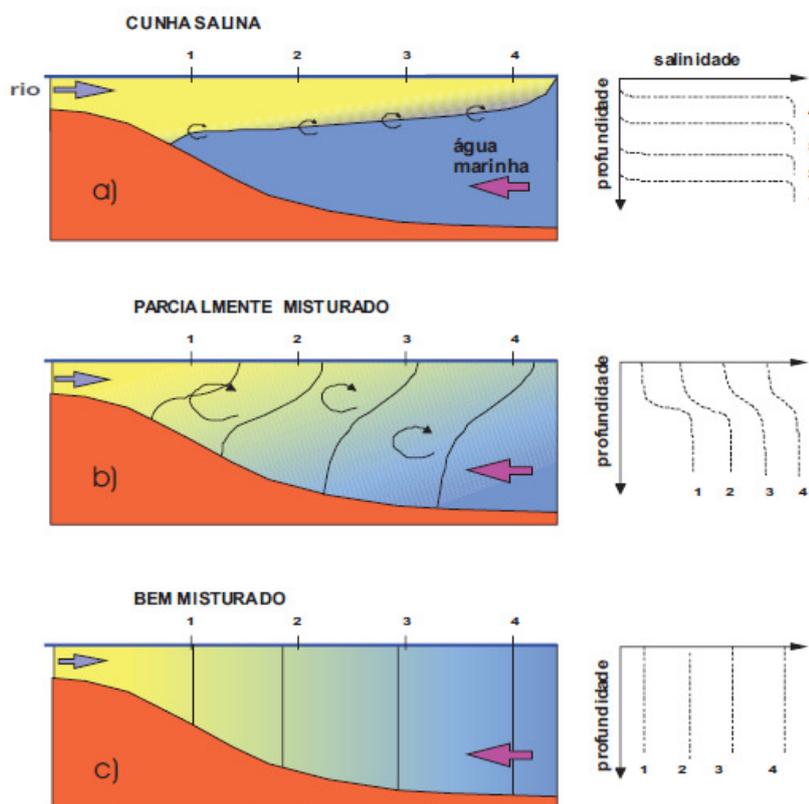


Figura 3 - Classificação de tipos de estuários segundo Pritchard (1952), junto ao padrão de estratificação vertical da salinidade em 4 diferentes pontos do estuário (Genz, 2006).

Estuários de cunha salina e parcialmente misturados podem apresentar característica muito distinta, denominada de zona de turbidez máxima. Nesta região é observada uma concentração de sedimentos em suspensão que pode ser cerca de 100 vezes superior as regiões a montante e a jusante (SILVA, 2011). Segundo Dyer (1997), na zona de turbidez máxima, um grande volume de sedimento em suspensão pode ficar retido dentro do corpo estuarino e passar por varias etapas antes de precipitar.

Vale ressaltar que um estuário pode apresentar dois ou mais tipos de classificação de suas águas quanto à estratificação vertical da salinidade, podendo variar de bem misturado na zona de maré oceânica à jusante para parcialmente misturado ou estratificado nas zonas a montante do estuário. Tais características são dependentes das condições hidrodinâmicas que dominam os trechos do estuário, a sazonalidade das vazões fluviais associadas ao regime de vazão do rio ou por possuir um barramento, regularizando a vazão fluvial afluente ao estuário.

3.1.3 ESTUÁRIOS QUANTO À AMPLITUDE DE MARÉ

Segundo Dalrymple *et al.*, (1992) *apud* Perillo (1995), considerando a abordagem de Hayes (1975), quanto à classificação dos estuários relacionada com alturas de marés, a classificação evolutiva do ambiente se dar pela relativa importância de três fatores: vazão do rio, ondas e ciclo de maré. Tais fatores contribuem para a formação do prisma triangular característico dos diferentes ambientes costeiros.

Hayes (1975), *apud* Perillo, (1995), propôs uma classificação baseada na análise morfológica da formação de bancos de areia associados com características de estuários conhecidos dependendo da amplitude da maré. O autor utilizou o esquema dado por Davies (1964), para classificação litorânea com base na altura de maré, e associou a classificação de três tipos de estuários: Estuários de micromarés para marés com altura inferior a 2 metros, estuários de mesomarés para marés com altura entre 2 a 4 metros e estuários de macromares para marés com alturas maiores que 4 metros.

3.1.4 ESTUÁRIOS QUANTO A GEOMORFOLOGIA

Kjerfve (1989) relatou que a classificação de estuário geralmente possui uma abordagem geomorfológica, e cada classificação possui comportamentos dinâmicos semelhantes em relação ao padrão de circulação e mistura das águas. Assim sendo, a classificação com abordagem geomorfológica foi definida em quatro principais caracterizações abaixo:

1) Estuários de planície costeira: são encontrados abundantemente em costas com ampla planície litorânea, sendo considerados como estuários clássicos e mais comuns, tendo sua formação por inundação de um vale fluvial, que se assemelham com canal no formato “V” e grandes áreas inundadas. Sua calha central é mais larga e profunda em direção a boca do estuário, geralmente, não ultrapassando a profundidade de 20 m.

2) Estuário de pântanos salgados: geralmente, não possuem influência da vazão fluvial, possuindo grandes áreas intermareal com vegetação presente. O padrão de

circulação da água é de predominância de canais de maré com ligação ao oceano pelas aberturas na restinga. O tamanho do estuário é proporcional ao tamanho da área do pântano drenado e normalmente, a seção transversal do canal principal possui duas profundidades, uma região rasa em torno de 10 m e um canal mais profundo não excedendo 25 m, ocorrendo geralmente próximo a junção da maré.

3) Lagunar: possui superfície livre extensa, uniformemente rasa, localizados paralelamente à linha da costa, com profundidade inferior a 2 m, possuindo canais subaquáticos pouco desenvolvidos e a circulação hidrodinâmica é influenciada pelo cisalhamento do vento. As variações internas das marés são de pouca intensidade, comparadas com os demais estuários, e podem ser relacionados como estuários de manguezais em formação.

4) Estuários barrados por restingas: são diferenciados pela presença de bancos arenosos formados pelo processo de sedimentação costeira que limita a ação das correntes e ondas à embocadura do estuário, possuindo variações sazonais de localização e morfologia devido à mudanças na vazão fluvial, intensidade e frequência das tempestades. São estuários mais rasos que os de planície costeira e podem formar restinga e isolar um vale afogado normal ou um embaiamento extenso ao longo da linha da costa.

5) Fiordes: são vales profundos formados no gelo, podendo chegar até 800 m de profundidade no interior da bacia e na região próxima a embocadura, denominada de soleira, é mais rasa variando entre 10 a 90 m. A seção transversal possui o formato de "U", com deposição de materiais carregados pelas geleiras.

3.1.5 HIDRODINÂMICA ESTUARINA

Os movimentos hidrodinâmicos dos estuários são influenciados pelas atuações dos fenômenos físicos, químicos, climatológicos, oceanográficos e hidrológicos, que de modo geral, associados à morfologia do ambiente, proporcionam a dinâmica peculiar da massa d'água e de todas as substâncias e elementos presentes nela (MIRANDA *et. al.*, 2002). Tais movimentos são governados pelas equações de Navier-Stokes para o escoamento turbulento de fluidos e representa o princípio da conservação da quantidade do movimento, associado às equações da continuidade do volume, de

estado e do transporte dos constituintes presentes na equação de estado. Em Rosman *et. al.*, (2013) estão detalhadas as formulações matemáticas das equações mencionadas anteriormente.

As principais forçantes e fatores que envolvem a hidrodinâmica estuarina são: Morfologia do ambiente, Marés Oceânicas, Ondas, Ventos e Gradiente de Salinidade.

Segundo Cunha & Guerra (2012), as características das *tipologias de leito, canais e padrões de drenagem* de uma bacia hidrográfica, quando analisadas concomitantemente e associadas à geometria e à hidráulica, possibilitam a hidrodinâmica peculiar das águas correntes, convergem para os processos erosivos, de transporte e deposição de materiais (sedimentos) no canal fluvial. O autor definiu o leito fluvial como sendo o espaço ocupado pelo escoamento da massa d'água e dos materiais particulados e dissolvidos, dependente da topografia e frequência das descargas de água no canal fluvial.

A Tabela 1 apresenta a classificação utilizada por Cunha & Guerra (2012) a partir da proposta elaborada por TRICART (1966):

Tabela 1 - Tipologia de leitos no canal fluvial

TIPO DE LEITO	CARACTERÍSTICAS
Leito Vazante	Parte do canal por onde correm, preferencialmente, para o escoamento das águas baixas. Normalmente ele serpenteia entre as margens do leito menor, acompanhando o talvegue.
Leito Menor	Leito bem delimitado, encaixado entre as margens, geralmente, bem definidas, cuja frequência das águas impede o crescimento da vegetação.
Leito Maior	Leito maior periódico ou sazonal, ocupado pelas águas do rio regulamente e, pelo menos uma vez no ano durante as cheias.
Leito Excepcional	Leito maior excepcional é ocupado durante as cheias excepcionais no decorrer das enchentes.

Fonte: Adaptado de Cunha & Guerra, 2012.

A velocidade de escoamento das águas em um rio é dependente de diversos fatores como a declividade longitudinal, o volume da massa d'água, o perfil da seção transversal, o coeficiente de rugosidade do fundo e o tipo de sedimento. Tais fatores influenciam no perfil da velocidade longitudinal e vertical da água, possibilitando

variações ao longo do canal fluvial (TRICART, 1966 *apud* CUNHA & GUERRA, 2012).

Com a abordagem referente ao transporte de sedimento, Dronkers (1986), destaca a atuação fundamental do aporte fluvial para o estuário e a criação de uma estrutura de fluxo longitudinal da massa d'água, através da diferença de densidade, possibilitando o aumento da velocidade de corrente do fundo do canal para a maré enchente e uma diminuição próxima à superfície da água. Porém, na maré vazante, o fluxo ocorre inversamente, onde se observa um aumento da velocidade próxima a superfície da massa d'água e uma redução no fundo do canal do estuário.

Dyer (1995) destacou a importância da corrente residual como determinante na direção do fluxo das águas e na caracterização do padrão de circulação estuarina, podendo ser denominada circulação gravitacional ou bombeamento de maré.

Na circulação gravitacional, que é típica de estuário estratificado com movimento bidirecional em sentidos opostos (forçantes fluvial e de maré) resultante da diferença de densidade entre as águas do rio e do mar, possibilita a variação vertical e longitudinal da salinidade na coluna d'água. Nesse padrão de circulação devem ser observadas as velocidades residuais de corrente em relação ao transporte de sedimento, pois essas que irão determinar a origem e o tipo de sedimento no estuário.

No bombeamento da maré o padrão de circulação é dominado por marés de sizígia, possibilitando a mistura das águas ao longo da coluna d'água. Quando não ocorre contribuição da forçante fluvial o estuário é dominado pelo ciclo de maré, e o regime de enchente e vazante é quem irá determinar a direção do fluxo. E quando ocorre à predominância da forçante fluvial em relação à forçante de maré, possibilita que as águas de origem fluvial sejam bombeadas para fora do estuário, transportando os sedimentos fluviais para a zona de maré oceânica (ZC).

Nos períodos de pluviosidade alta ocorre o aumento da drenagem pela bacia hidrográfica, e por consequência, o aumento da vazão fluvial, possibilitando a ocorrência de condições hidrodinâmicas peculiares, derivando em importantes consequências no processo de sedimentação dos materiais transportados pelas águas. Tal situação pode ocasionar a ressuspensão de sedimentos, poluentes e

contaminantes depositados no fundo do estuário e transportá-los em direção ao oceano. Ademais, as vazões com maior magnitude nesse período, podem fazer com que não ocorra a intrusão salina no estuário, diminuindo a salinidade, tornando possível a alteração da caracterização do ambiente estuarino.

A forçante de maré possui papel fundamental na renovação e mistura das massas d'água, na variação de salinidade, no transporte de sedimentos e nutrientes nos estuários. Em águas rasas, a amplificação ou o amortecimento da maré dependem da geometria, da batimetria e da extensão do estuário (PERILLO, 1995; DYER, 1995 e 1997). O estreitamento momentâneo das margens do estuário e sob a condição de pouco atrito, possibilita a compressão lateral da maré, o que ocasiona o aumento da altura de maré através do princípio de conservação de volume (maré hipsincrônica). Sob condição de maior atrito lateral ou um alargamento das margens no estuário, ocorre o amortecimento da energia empregada pela maré, diminuindo sua altura e amplitude da onda progressiva ao longo do estuário (maré hiposincrônica). E quando os efeitos das margens uniformes não havendo alargamento ou estreitamento abrupto e da fricção lateral forem iguais, a altura de maré será constante até o seu limite de influência no estuário (maré sincrônica) (NICHOLS & BIGGS, 1985).

O fenômeno de deformação da onda de maré, relacionado com a amplificação ou amortecimento da onda, possibilita a geração de tempos diferentes de enchente e vazantes no estuário, e que estuários dominados pela forçante de maré possuem um curto tempo de enchente e com correntes de marés mais fortes, resultando em um maior aporte de sedimento oceânicos para dentro do estuário, no sentido estuário acima (LESSA *et al.*, 2001).

O vento exerce uma tensão de cisalhamento sobre a superfície da massa d'água, deslocando-a, o que forma pequenas ondas superficiais que auxiliam no deslocamento das correntes estuarinas. Este fenômeno possui papel fundamental na aeração superficial da coluna d'água, na mistura e dispersão vertical de substâncias constituintes e presentes nas águas. A variação da densidade das massas d'água, também proporciona o deslocamento vertical de substâncias através do transporte difusivo, facilitando o processo de sedimentação no estuário.

3.2 SALINIDADE

Salinidade é um escalar adimensional constituinte da água que possibilita a caracterização das massas de água, as condições de usos múltiplos para atender as diferentes demandas, determina também, as diversas propriedades físico-químico-biológicas, como a densidade, o tipo de fauna e a flora que habitam o ambiente. É também, influenciada diretamente pela temperatura e pressão, alterando a capacidade de dissolução dos sais na água, conseqüentemente, modificando a sua densidade. O símbolo que representado a salinidade é partes por mil (‰) ou Practical Salinity Unit (PSU) sigla em inglês ou Unidade Prática de Salinidade (UPS).

Diante da difícil tarefa de se determinar o valor padrão de salinidade para a água do mar, por se tratar de um parâmetro que é influenciado por outros fatores como a temperatura, a densidade e a pressão, e que possui uma variabilidade regional, foi então que em 1964, criou-se um painel de cientistas nomeados pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), International Council for the Exploration of the Sea (ICES), Scientific Committee on Oceanic Research (SCOR) e International Association for the Physical Sciences of the Ocean (IAPSO) com o objetivo de se estabelecer tabelas e padrões internacionais diversos.

A 1ª tarefa deste grupo foi estabelecer o padrão da tabela de salinidade do mar por clorinidade e condutividade para todos os oceanos e mares do mundo (UNESCO, 1981). Então, em Outubro de 1966, o grupo de cientistas estabeleceu a “*Tabela Internacional de Oceanografia*” para a salinidade, sendo elaborada da relação de condutividade elétrica da amostra.

Uma solução precisamente específica de cloreto de potássio (KCl) foi escolhida para reproduzir o padrão de condutividade elétrica. A avaliação foi feita na concentração desta solução, que produz a relação da condutividade a temperatura de 15°C com o respectivo padrão da água do mar (Oceano Atlântico Norte), cuja clorinidade foi certificada a 19,3740‰, nesse caso, a salinidade foi exatamente 35‰ sobre a escala prática de salinidade anterior. Por convenção, a salinidade da água do mar, para a nova escala prática de salinidade de 1978, foi definida por 35‰, para garantir a continuidade da escala anterior. A tabela foi elaborada com a temperatura padrão a 15°C para salinidades variando de 29‰ a 42‰, juntamente com a correção da

tabulação com medidas em outras temperaturas, além da temperatura padrão, para as temperaturas entre 10 °C a 31 °C (UNESCO, 1981).

Diversas amostras foram enviadas para outros laboratórios para realizarem as medições com diferentes equipamentos. Estes resultados foram baseados na definição da escala prática de salinidade de 1978, sendo recomendado o algoritmo para calcular a salinidade prática através da relação de condutividade em todas as temperaturas e pressões na faixa de interesse oceanográfico. Este foi o padrão adotado durante todo o encontro realizado em Sidney, B.C., Canadá no período de 1 a 5 de setembro de 1980 (UNESCO, 1981).

Segundo Stewart (2003), a escala prática de salinidade foi definida oficialmente como sendo:

$$S = 0.0080 - 0.1692 R_t^{1/2} + 25.3851 R_t + 14.0941 R_t^{3/2} \quad \text{Eq. (1a)}$$

$$- 7.0261 R_t^2 + 2.7081 R_t^{5/2} + \Delta S$$

$$R_T = C(S, t, 0) / C(KCl, t, 0) \quad \text{Eq. (1b)}$$

$$\Delta S = \left[\frac{(t - 15)}{1 + 0.0162 (t - 15)} \right] + 0.0005 - 0.0056 R_t^{1/2} - 0.0066 R_t \quad \text{Eq. (1c)}$$

$$- 0.0375 R_t^{3/2} + 0.636 R_t^2 - 0.0144 R_t^{5/2}$$

$$2 \leq S \leq 42$$

Onde, $C(S, t, 0)$ é a condutividade da amostra de água do mar, à temperatura T e à pressão atmosférica normal, e $C(KCl, t, 0)$ é a condutividade do padrão da solução de cloreto de potássio (KCl) à temperatura T e pressão atmosférica padrão. A solução de KCl padrão contém uma massa de 32,4356 gramas de KCl em uma massa de 1 kg de solução.

A razão da salinidade pode ser simplificada pelo relacionamento da condutividade elétrica da amostras de água do mar a 15 °C para solução de KCl contendo 32,4356 de KCl em uma massa de 1 kg de solução de mesma pressão e temperatura (PSS, 1978).

$$R_{15} = C(S, 15, 0) / C(35, 15, 0) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde $C(S, 15, 0)$ é a condutividade da amostra de água do mar a 15 °C e a pressão atmosférica zero (nível do mar), tendo uma salinidade derivada de S (Eq. 1b), e C

(35, 15, 0) é a condutividade padrão da água do mar conforme definido em "Copenhagen" Millero (1996). Stewart (2003), relata que a equação (Eq. 2) não é uma nova definição de salinidade, é simplesmente a definição de salinidade através da clorinidade como uma função da condutividade da água do mar em relação à condutividade da água do mar padrão.

O autor descreve que a relação entre a condutividade e a salinidade possui uma precisão a cerca de $\pm 0,003$ na salinidade e o erro associado é muito pequeno, ocorrendo apenas, quando há a presença do dióxido de silício (SiO_2), que influencia na densidade, mas não altera a condutividade da massa de água (STEWART, 2003).

O processo de salinização da água só é possível por causa de propriedades físico-químicas como polaridade e a mais alta constante dielétrica entre os líquidos comuns, tornando possível solubilizar facilmente substâncias iônicas, sendo estas características peculiares que fazem da água líquida ser considerada o solvente universal e estar presente em toda a matéria viva.

A molécula da água possui uma estrutura simples e polar devido à distribuição desigual de densidades dos elétrons, que através da atração eletrostática dos íons, possibilita a formação de ligações covalentes denominadas de pontes de hidrogênio, que favorecem a ligação entre outras moléculas de água.

O processo de dissolução dos sais ou reação de hidratação do soluto, consiste na capacidade da água em romper as ligações iônicas dos sais, separando o material dissolvido em íons de carga positiva (cátions) e íons de carga negativa (ânions), que se desprendem do sólido e pela atração eletrostática ligam-se a outras moléculas de água formando um composto iônico estável, impossibilitando que o íon se ligue novamente ao sólido, aumentando conseqüentemente a condutividade elétrica da solução aquosa.

A Tabela 2 apresenta a caracterização dos ambientes costeiros quanto à salinidade como sendo: Oligohalino, Mesohalino, Polihalino, Euhalino e Hiperhalino, baseado na classificação de Venice (1958).

Tabela 2 - Classificação de ambientes costeiros em relação a salinidade (‰)

Zona	Salinidade (‰)
Hiperhalina	> ≈40
Euhalina	≈40 - ≈30
Mixohalina	(≈40) ≈30 - ≈0,5
Mixoeuhalina	> ≈30 mas < euhalina mar adjacente
(Mixo) polihalina	≈30 - ≈18
(Mixo) mesohalina	≈18 - ≈5
(Mixo) oligohalina	≈5 - ≈0,5
Límnica (água doce)	< ≈0,5

Fonte: Adaptado de Venice, (1958).

A Resolução CONAMA 357/05 (BRASIL, 2005), que determina sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes para o seu enquadramento, além de outras disposições, estabelece a classificação das águas em doce, salobra e salina, relacionada às faixas de concentrações de salinidade (‰) quantificadas na amostra. As definições adotadas para a classificação são:

- **Águas doces:** águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰;
- **Águas salobras:** águas com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰;
- **Águas salinas:** águas com salinidade superior a 30‰.

3.3 BARRAGENS

O aumento significativo da demanda hídrica pela população para os múltiplos usos, bem como para a geração de energia hidrelétrica, tem levado ao constante represamento dos rios, sendo o principal modelo de captação de água e geração de energia do Brasil. Entretanto, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no ano de 2012 no Brasil, existem em operações 377 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) com potência total de geração de 216 MW, 433 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) com 3,870 mil MW e 181 Usinas Hidrelétricas (UHE) com uma capacidade total instalada de 78,371 mil MW.

A geração de energia elétrica pelas hidrelétricas segue como sendo a principal fonte energética no país, representando 66,90% da potência instalada, porém, observa-se uma queda de sua participação na matriz energética nacional que em 2010 representou a capacidade total de 68,53%, 71% em 2009 e 73% em 2008. As termelétricas representam 26,90% da capacidade instalada, e as PCHs com 3,30%. Além dessas fontes, também compõem a matriz energética nacional as usinas nucleares com potencial de 1,71%, usinas eólicas com 1,21% e 0,18% geradas pelas CGHs (ANEEL, 2012).

Com base nas definições estabelecidas pela Lei nº12.334/2010, BRASIL (2010), que dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens, a definição do termo barragem é:

“qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas” (BRASIL, 2010, p.2).

Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), existem registradas 37.640 barragens com altura superior a 15 m, conforme a 2ª atualização publicada em 2011 da 4ª edição do inventário que foi realizado em 2006. Para cada barragem são solicitadas mais de 30 informações estatísticas, entre elas dados geográficos, os dados da barragem, o vertedouro, o reservatório, o responsável, bem como importantes dados ambientais.

Germani *et al.*, (2012) realizaram o inventário no Estado da Bahia dos empreendimentos do tipo barragem, açude e represa, resultando no total de 645 empreendimentos. Deste total, foram identificados 543 empreendimentos em operação, 40 empreendimentos na fase de construção e 62 empreendimentos projetados. A Figura 4 representa a distribuição espacial dos empreendimentos agrupados por bacia hidrográfica, destacando-se os empreendimentos que estão situados na bacia do rio Paraguaçu, onde está situada a região de interesse desse estudo.

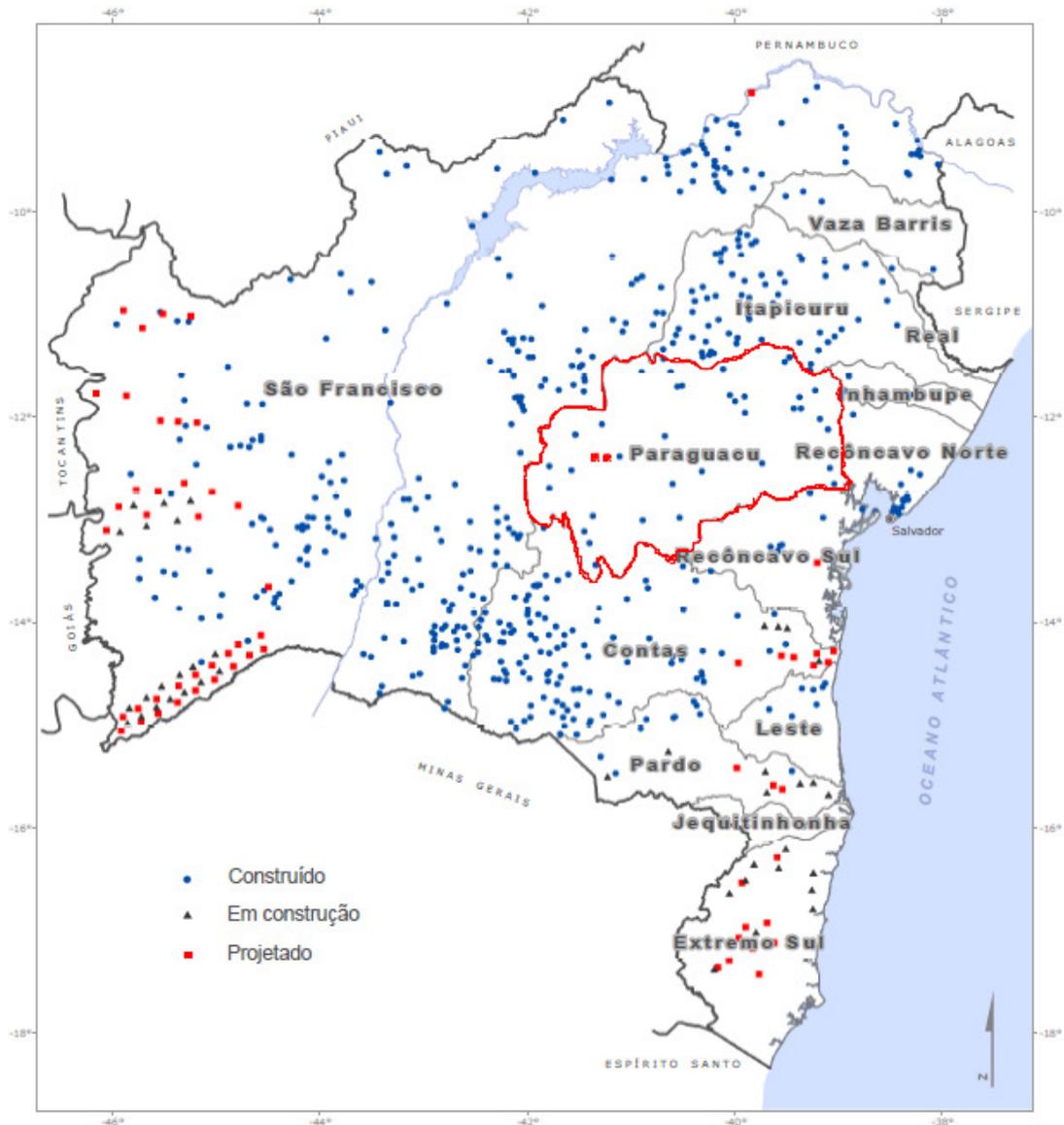


Figura 4 - Barragens e açudes construídos, em construção e projetados por bacia hidrográfica no Estado da Bahia em 2010 (GeografAR, 2010).

Segundo o inventário sócioambiental de barragens no Estado da Bahia realizado pelo projeto A Geografia dos Assentamentos na Área Rural (GeografAR) desenvolvido pela UFBA e apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no Estado existem 103 barragens em operação e mais 40 barragens em processo de instalação, estando todas sob o monitoramento do órgão ambiental estadual (INEMA). Porém, das 103 barragens em operação, 50 barragens foram identificadas com a existência de algum tipo de conflito socioambiental (GEOGRAFAR, 2012).

3.3.1 IMPACTOS OCASIONADOS PELA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

Existem várias razões positivas que justificam a construção de barramento em cursos de rios. Os aspectos positivos mais relevantes são: a) o armazenamento de água para o consumo humano, animal, agricultura e industrial; b) o controle de enchentes e a melhoria da navegação; c) a retenção do sedimento; d) a melhoria da qualidade da água; e) o aumento do fornecimento de energia elétrica. Tais aspectos foram favoráveis ao desenvolvimento das sociedades e a ocupação de áreas que de outra forma não poderiam ser habitadas (COLLIER *et al.*, 2000).

Porém, existem também aspectos negativos decorrentes da implantação e restrições de operação das barragens, que alteram a variabilidade das vazões naturais dos rios, e a readequação a uma nova situação de fluxo energético, ocasionam impactos diversos à jusante do barramento. Os impactos decorrentes dessas alterações em trecho de rio são: a) regularização das vazões impossibilitando a variabilidade do regime natural (TUCCI, 1993); b) diminuição do transporte de sedimento e nutrientes à jusante do barramento (POWELL *et al.*, 2002).

Conforme apontado nos estudos desenvolvidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) para as bacias hidrográficas verificado em BRASIL (1997) que diz respeito a:

“a implantação e operação dos reservatórios de perenização exercem um papel controlador desta alteração, através do aumento do tempo de residência da água, levando à decantação dos sólidos em suspensão no fundo do reservatório”.

Collischonn (2008) relatou que além dos impactos ambientais oriundos das atividades antrópicas em torno de bacias hidrográficas, possuem também, impactos sociais causados por instalações de barragens e operação de usinas hidrelétricas em área povoadas, necessitando a remoção de pessoas que habitam a área que será inundada pelo reservatório, identificando também, possíveis impactos culturais como a perda de sítios arqueológicos, ou até mesmo, a perda de lugares sagrados para culturas indígenas e manutenção do patrimônio genético.

As comunidades afetadas por estes impactos, na maioria, não conseguem associar negativamente à construção de uma usina hidrelétrica na área de seu município, pelo fato da existência de compensação financeira obrigatória, revertida para o

município, objetivando proporcionar retorno dos recursos para a população, o aumento da oferta de emprego à população motivada pela construção do empreendimento (COLLISCHONN, 2008).

Portanto, foram levantados alguns aspectos positivos e negativos, com o objetivo de exemplificar apenas alguns pontos relevantes, que de fato, estão relacionados à peculiaridade da presença de barramento a montante de estuário, não sendo parte do escopo do trabalho, o aprofundamento na temática referente a construção ou não de barramento em curso d'água.

3.3.2 IMPACTOS DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS EM ESTUÁRIOS

Os principais impactos oriundos da implantação de barragens em estuários são devido à regularização das vazões naturais à jusante, a redução e contenção do aporte de sedimentos e nutrientes para o interior do estuário, provocando modificações no biota aquático ao longo do curso d'água. Segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD) (1989; CARVALHO, 2000 *apud* GENZ, 2006), as comunidades biológicas que se distribuem ao longo do canal, podem ser muito afetada pelo aumento da quantidade de material com maior diâmetro no leito, por mudanças no crescimento da vegetação ripária e pelo avanço da intrusão salina à montante do estuário.

As alterações nas vazões variam em função do tamanho e regime de operação do reservatório, das demandas hídricas para atender aos múltiplos usos, dos dispositivos de descarga e de limitações à jusante. A seguir, descrevo alguns estudos realizados na região estuarina do rio Paraguaçu e regiões adjacentes relacionados às alterações no estuário decorrentes da regularização das vazões:

- a) A expansão ou retração da penetração do sal (RAMOS, 1993; LIMA & LESSA, 2002; GENZ, 2006; LESSA *et al.*, 2009);
- b) A mudança nas características de propagação da maré (RAMOS, 1993; XAVIER, 2002; GENZ, 2006; LESSA *et al.*, 2009)
- c) As flutuações no nível d'água e das vazões (RAMOS, 1993; GENZ, 2006; LESSA *et al.*, 2009);

Powell *et al.* (2002), enfatizaram a necessidade de se firmarem acordos entre os órgãos gestores e suas equipes em conjunto com cientistas de universidades para trabalhar em um esforço de consenso na investigação de estuário com a presença de barramento à montante, objetivando o desenvolvimento de normatizações sobre a necessidade do aporte de água doce, podendo ser implementadas na política de gestão das águas. Devido ao aumento da demanda hídrica e os crescentes conflitos gerados pelos usuários de águas, existe uma crescente necessidade de se incorporar os resultados desses estudos nas regras de operação das barragens de modo que minimizem os danos causados ao meio ambiente, permitindo a otimização dos usos dos recursos hídricos.

Portanto, a ferramenta empregada para otimização e análise dos resultados obtidos pelos estudos sobre o aporte de água doce em estuário, segundo Powell *et al.*, (2002), são os modelos matemáticos e conforme o levantamento realizado pelo autor sobre trabalhos que abordaram a utilização da ferramenta na solução de problemas de gerenciamento da entrada de água doce são: MARTIN, (1987); BAO *et al.*, (1989); TUNG *et al.*, (1990); MATSUMOTO, (1990); MATSUMOTO *et al.*, (1994); ESTEVEZ, (2002). Adiciono também, os trabalhos com a mesma temática: LIMA & LESSA, (2002); XAVIER, (2002); GENZ, (2006); LESSA, *et al.*, (2009).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAGUAÇU

A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu situa-se aproximadamente entre os paralelos 11°11' a 13°42' S e os meridianos 38°48' a 42°07' W, responsável pela drenagem da área de 54.528 km², totalmente inserida no Estado da Bahia. De acordo com os dados adotados pela Agência Nacional de Águas (ANA) das estações hidrometeorológicas, a disponibilidade hídrica calculada dos indicadores para precipitação média anual é de 1.048 mm, a vazão média sendo, $Q_m = 172,31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a vazão de estiagem, $Q_{95} = 15,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. A Figura 5 é a representação espacial da Região de Planejamento e Gestão das Águas (RPGA-X) da bacia do rio Paraguaçu, seguindo a definição estratégica do órgão ambiental do Estado da Bahia.

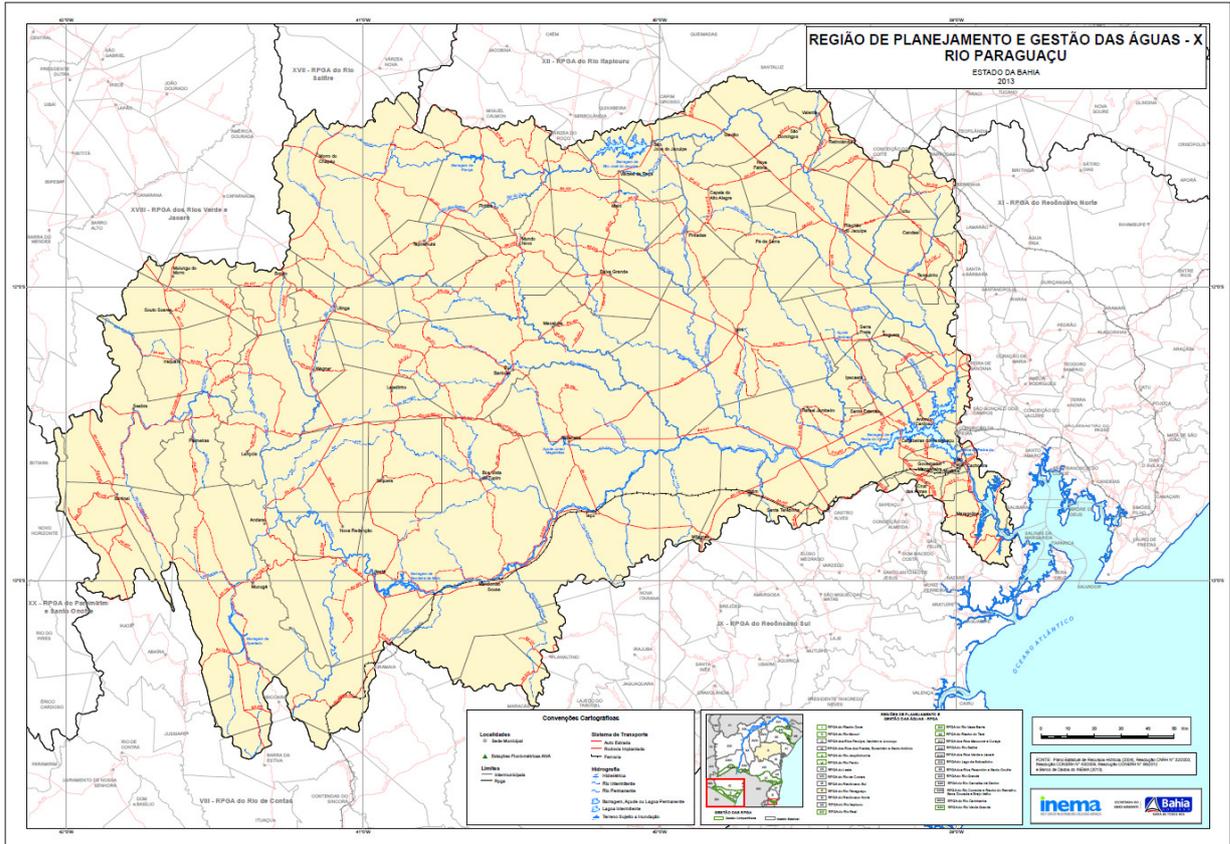


Figura 5 - Caracterização da RPGA – X da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguaçu-Bahia (INEMA, 2013).

O efeito da vazão regularizada observado pelo Ministério de Meio Ambiente (MMA) (2006), para a região da bacia do rio Paraguaçu, é principalmente por meio da presença de barramentos, que em alguns casos não são utilizados para geração de energia, sendo fundamentais para o abastecimento humano, dessedentação de animais e para irrigação de culturas da região.

A regularização da vazão não pode ser atribuída apenas à presença do barramento, mas também, pela condição de operação dos reservatórios que depende diretamente dos seus múltiplos usos – no atendimento das demandas diversas e suas restrições. O lago do reservatório de Pedra do Cavalo no rio Paraguaçu, tem um potencial de regularização de $67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com 100% de garantia, representando aproximadamente 35% da vazão média de longo termo (MLT) (MMA, 2006).

A disponibilidade hídrica superficial na bacia é dada pela vazão regularizada a montante da seção de interesse, com 100% de garantia, somada à vazão incremental de referência Q_{95} . Segundo o MMA (2006), a regularização deve ser calculada, pela soma de todos os reservatórios de regularização na bacia acrescidos

à vazão Q_{95} no ponto do curso d'água de escoamento superficial total. Entretanto, a vazão regularizada para a bacia do rio Paraguaçu é $Q_{reg} = 88,34 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a Q_{95} é de $15,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ então, a disponibilidade hídrica é de $103,61 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, valor superestimado para a bacia do Paraguaçu.

A evapotranspiração real na bacia é de $E_{tr} = 948 \text{ mm}$ e foi estimada por meio de um balanço hídrico simplificado, sendo calculada pela diferença da precipitação e da vazão. Portanto, outras perdas, como recarga de água subterrânea para fora da bacia, e usos consuntivos, são incorporadas na estimativa da evapotranspiração real (MMA, 2006).

3.4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO RIO PARAGUAÇU

O rio Paraguaçu nasce ao norte de Barra da Estiva na Bahia, precisamente no morro do Ouro na serra do cocal, seguindo em direção norte, atravessando os "campos gerais", onde é reorientado próximo à Andaraí para sudeste, prosseguindo em tal direção até Itaetê. No trecho compreendido entre Itaetê e Marcionílio Souza, o rio Paraguaçu amolda-se na direção oeste-leste e, daí, sofre leve inflexão para nordeste até cercanias de Santa Fé, voltando a assumir sentido oeste-leste até a região de Antonio Cardoso, onde se particulariza por se dividir em canais anastomosados e com segmentos rápidos. A montante de Cachoeira e São Félix, o rio Paraguaçu está sendo retido artificialmente pela barragem de pedra do Cavalo, por este motivo, de Cachoeira até São Roque do Paraguaçu, possui o escoamento influenciado pelas marés, fluindo no sentido noroeste-sudeste até desaguar na baía de Todos os Santos, após cumprir um percurso de mais de 450 km (IBGE, 1999).

A bacia do rio Paraguaçu é marcada por uma notável assimetria da distribuição dos afluentes em relação ao rio principal, não só em relação à extensão destes, como também em termos de densidade e volume de contribuição. Os tributários situados entre as regiões de Andaraí e Itaetê possuem um padrão de drenagem básico retangular, o que sugere o possível condicionamento do curso d'água a causas tectônicas de pequena grandeza. A afluência ao rio Paraguaçu pela margem esquerda se dá pela contribuição dos rios Santo Antônio, Piranhas, Capivari, do Peixe, Paratigi, Saracura, Paulista, Preto, Bonito, Utinga, Cochó, Jacuípe, Tupim e

Curimataí, entre outros menos importantes, e pela margem direita, apenas os rios de Una, da Palma, Cambuca e os riachos São Francisco, Vermelho, do Roncador, Toca da Onça, Grande e do Sebastião, além de outros menores, que constituem contribuição afluyente de relativa importância (IBGE, 1999).

A bacia hidrográfica do rio Paraguaçu é uma das mais estratégicas bacias para o estado da Bahia, pelo fato de estar totalmente inserida no domínio territorial do Estado, sendo o rio Paraguaçu, responsável por mais de 60% da água que abastece a capital baiana, Salvador e região metropolitana, bem como, suas águas serem utilizadas para irrigação, abastecimento das indústrias situadas na região e outras finalidades.

O rio Paraguaçu apresenta vários trechos onde ocorrem extravasamentos de sua calha, causando prejuízos de acordo com a ocupação do vale. No baixo trecho do Rio Paraguaçu estão localizadas as cidades de Cachoeira e São Félix, que apresentam uma densa ocupação populacional ao longo das margens e várzeas do rio. Cachoeira, na margem esquerda, e São Félix, na margem direita, ocupam um alargamento do vale em forma de semicírculo, com cotas variando não mais que 15 m das margens até o limite das cidades (MMA, 2006).

As margens do rio foram fixadas pela construção de um cais em concreto ciclópico, com cerca de 900 m de extensão e cujo coroamento tem cota aproximada de 3,60 m acima do nível médio das marés, na margem direita e cerca de 3,25 m na margem esquerda. Esta pequena variação de cota em São Félix é devido a uma inclinação mais íngreme do vale na margem esquerda (MMA, 2006).

3.4.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO PARAGUAÇU

O estuário formado pelo rio Paraguaçu é classificado como do tipo pântanos salgados, possuindo ambiente de transição com grande potencial de transporte de matéria orgânica e intensas variações nos processos físico-químico-biológico, decorrentes das componentes fluviais e oceânicas, bem como também, pela presença de atividades antropogênica na região.

À montante possui a barragem de Pedra do Cavalo, regularizando a quantidade e a qualidade da água fluvial afluyente ao baixo curso do rio Paraguaçu e à jusante possui a formação da Baía de Iguape, comunicando-se com a Baía de Todos os Santos – BTS, através do canal de São Roque do Paraguaçu (Figura 6).

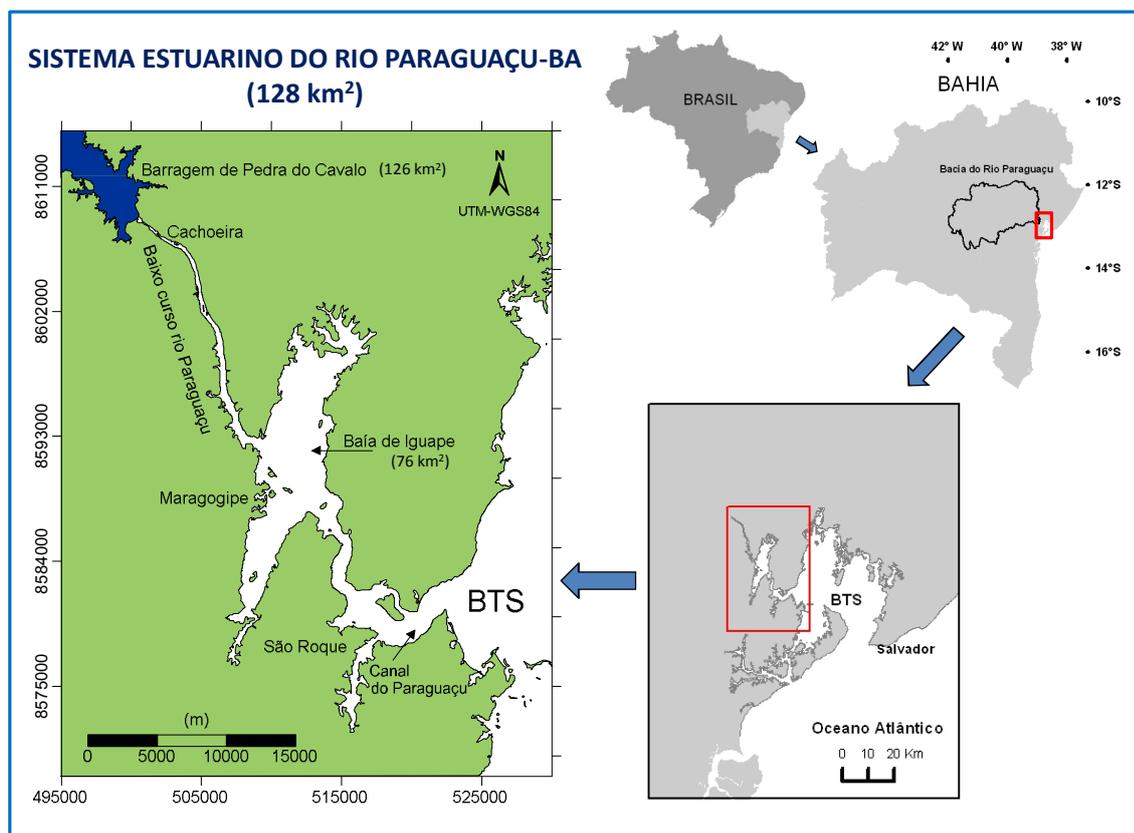


Figura 6 – Sistema do estuário do rio Paraguaçu formado pelos setores baixo curso do rio Paraguaçu, Baía do Iguape e Canal de São Roque, interligando-o à BTS (INEMA/UFBA, 2013c).

O estuário é influenciado pelo regime de marés mistas do tipo estacionárias que vai da Baía de Todos os Santos (BTS), no movimento estuário acima, até atingir o limite de influência próximo das cidades de Cachoeira e São Félix, onde está localizado o barramento de Pedra do Cavalo. As marés características do ambiente são semidiurnas, com número de forma ($N_f = K_1 + O_1 / M_2 + S_2$) variando entre 0,11 em mar aberto e 0,04 em Najé, distrito de Maragogipe-Ba, que fica localizado próximo à baía de Iguape (LESSA *et al.*, 2001; LESSA *et al.*, 2009).

Segundo Lessa *et al.*, (2001) e Genz (2006), em condição de maré de sizígia a amplificação da onda de maré oceânica propagada na BTS pode alcançar altura de 2,54 m próxima a Itaparica propagando-se até a baía de Iguape, onde pode sofrer

amplificação de até 1,0 m em relação à maré oceânica da BTS, atingindo até 3,50 m. A partir desse ponto, ao chegar no trecho do baixo curso do rio Paraguaçu, ocorre o estreitamento das margens, possibilitando o aumento da influência do atrito, que pode amortecer a energia empregada pela onda cerca de 0,25 m até chegar no limite de sua influência próximo à Cachoeira.

A preamar no estuário do rio Paraguaçu ocorre com defasagem de 90 minutos em relação à maré propagada na região do Porto de Salvador, localizado na entrada da BTS, apresentando assimetria entre o tempo de maré vazante que é menor do que o tempo de maré enchente (LESSA *et al.*, 2001; CIRANO & LESSA, 2007; LESSA *et al.*, 2009).

Genz (2006) caracterizou o estuário, quanto à intrusão salina, como misturado em situação de baixas vazões de água doce defluente da barragem, e salinidade superior a 30‰ que vai adentrando pelo canal do Paraguaçu até a proximidade da Ilha do Francês, sendo que a partir daí começa a sofrer diluição, formando perfil longitudinal de salinidade regressivo que vai da Baía de Iguape até chegar no limite de influência do estuário, apresentando salinidade de 3,2‰.

3.4.3 CARACTERIZAÇÃO DO TRECHO FLUVIOESTUARINO DO RIO PARAGUAÇU

O trecho fluvioestuarino de interesse, pertence ao baixo curso do rio Paraguaçu localizando-se entre a barragem de Pedra do Cavalo a montante das cidades de Cachoeira-Ba e São Félix-Ba até a falha de Maragogipe, no limite oeste da Baía do Iguape, estando próximo às localidades de Coqueiros e Najé. A extensão do curso d'água mede aproximadamente 20 km e praticamente, escoia encaixada num vale rochoso com altitude de até 220 m, sendo navegável em toda extensão na preamar em condição de maré de sizígia, apresentando restrições de navegabilidade em baixa-mar de sizígia, em razão de baixas profundidades e formações de bancos de areias em locais mais rasos. A seção transversal possui variação entre 200 m a 600 m de comprimento e a profundidade na preamar de maré de sizígia pode chegar até 10 m.

É uma região pressionada pela antropização do adensamento populacional observado na presença de cidades e atividades industriais que margeiam todo trecho, despejando os efluentes urbanos e industriais no rio, além da presença de atividade de dragagem de areia do leito, agricultura, pecuária, atividade pesqueira e a navegação de embarcações de pequeno a médio porte no seu curso.

O baixo curso do rio Paraguaçu recebe contribuição dos principais afluentes da região e suas respectivas áreas de drenagem continental, a citar: rio Catú (7,12 km²), rio Capivari (334,40 km²), rio Cachoeirinha (108,47 km²) e o rio Pitanga (21,96 km²) (VOTORANTIM ENERGIA, 2009).

A região de estudo foi subdividida em 3 pontos amostrais (PA 1, PA 2 e PA 3), relacionados aos mesmos pontos monitorados pela Votorantim (R1, R2 e R4) respectivamente (VOTORANTIM ENERGIA, 2010), e também, utilizados no estudo de vazão ambiental solicitado pelo INEMA a UFBA (2013), com o objetivo claro de se manter a continuidade dos registros das séries históricas na região.

A Figura 7 representa a visão geral da localização dos pontos amostrais no trecho do baixo curso do rio Paraguaçu e as demais regiões que compõem o estuário do rio Paraguaçu, sendo descritos a seguir.

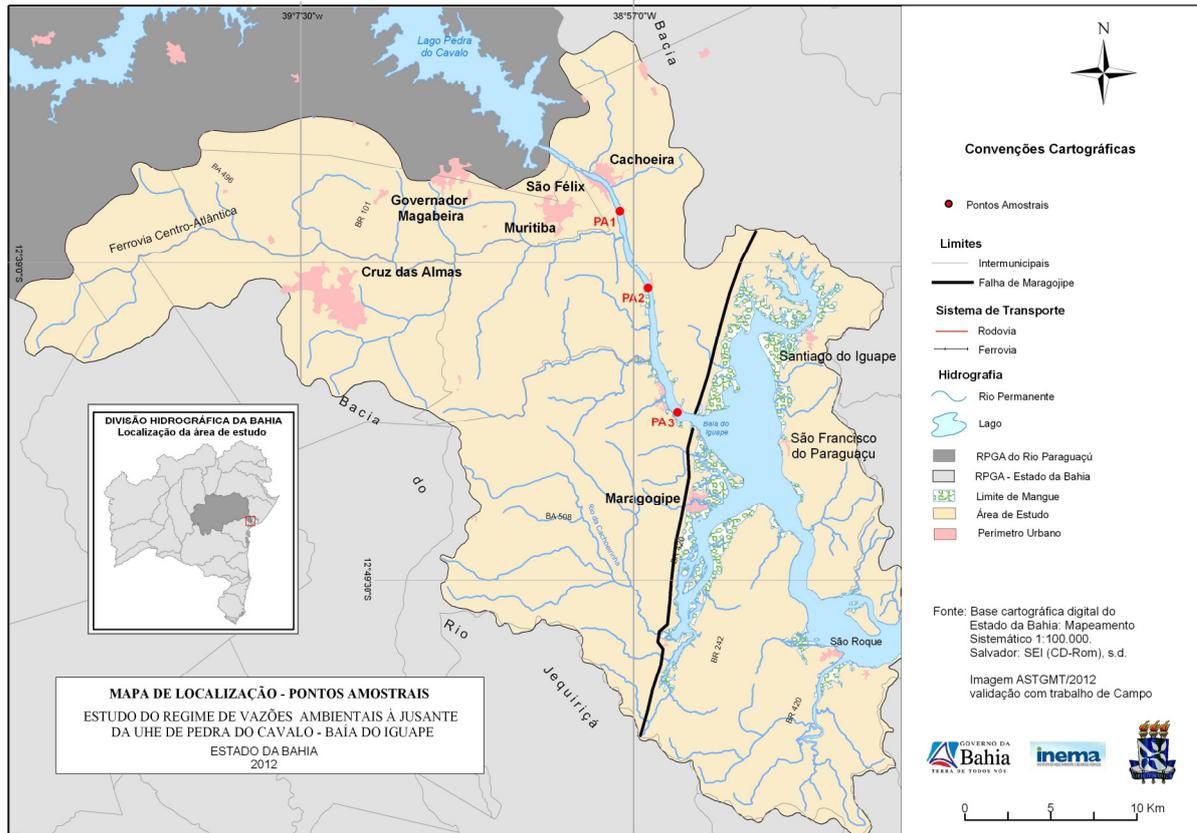


Figura 7 - Localização dos pontos amostrais (PA's) no baixo curso do rio Paraguaçu e demais regiões do estuário (INEMA/UFBA, 2012).

• Ponto Amostral 1 (PA 1):

Situa-se nas coordenadas geográficas latitude $12^{\circ}36.261'$ S e longitude $38^{\circ}58.129'$ W, localizado entre as cidades de Cachoeira e São Félix na Bahia e a jusante, possui uma fábrica de papel reciclado. Nesse ponto, há o lançamento do efluente urbano diretamente nas suas águas e a captação a fio d'água pela população ribeirinha. Figura 8 representa o perfil da seção transversal do ponto, apresentando comprimento de 250 m e profundidade máxima de 6 m na preamar de sizígia registrada em 25 de fevereiro de 2013.

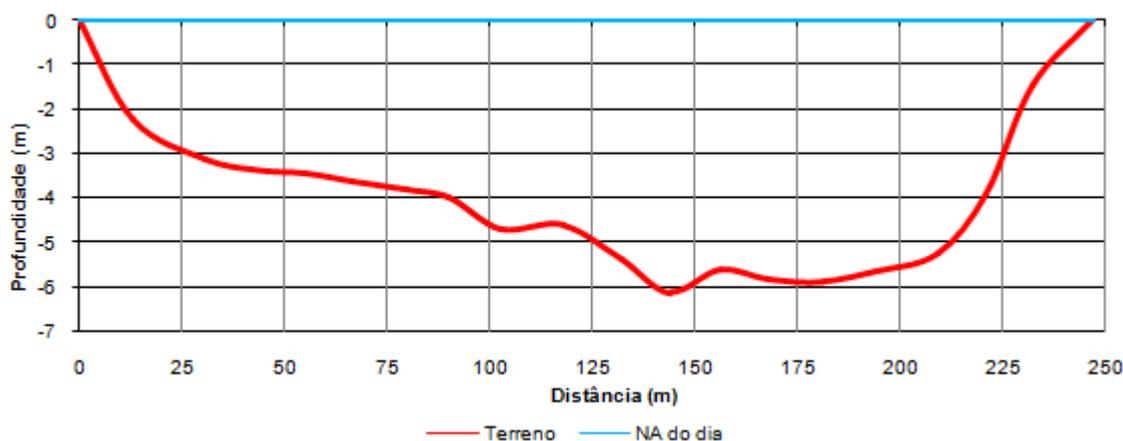


Figura 8 – Perfil da seção transversal do PA 1 realizado na campanha de fevereiro de 2013 (INEMA/UFBA, 2013a).

• Ponto Amostral 2 (PA 2):

Situa-se nas coordenadas geográficas latitude $12^{\circ}39.032'$ S e longitude $38^{\circ}57.001'$ W, localizado próximo da região denominada Engenho da Vitória, possuindo uma boa situação de preservação da vegetação ripária, local pouco urbanizado, presença de algumas casas às margens, mas sem atividade industriais próximas, porém identificado atividade de pesca e mariscagem. Possui aporte de águas do rio Sinunga a montante. Figura 9 representa o perfil da seção transversal do ponto, apresentando comprimento cerca de 230 m e profundidade máxima de 6 m na preamar de sizígia registrada em 26 de fevereiro de 2013.

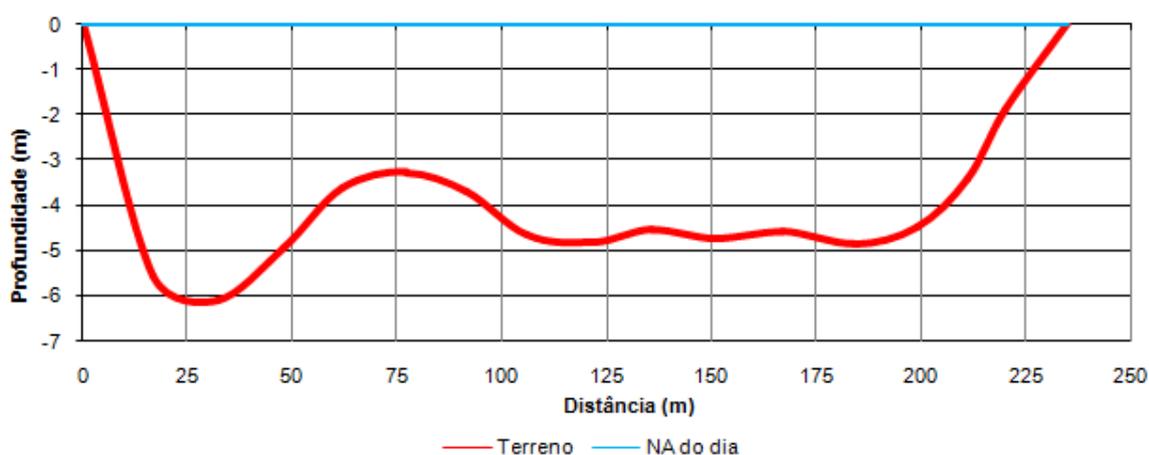


Figura 9 – Perfil da seção transversal do PA 2 realizado na campanha de fevereiro de 2013 (INEMA/UFBA, 2013a).

• **Ponto Amostral 3 (PA 3):**

Situa-se nas coordenadas geográficas latitude 12°43.250' S e longitude 38°55.759' W, próximo das localidades de Coqueiros e Najé em Maragogipe-Ba, estando à montante da Baía do Iguape. Este ponto apresenta os impactos relacionados à ocorrência da urbanização local. Possui atividades de pesca familiar e extrativista intensas, sendo a principal atividade econômica da população regional. A Figura 10 representa o perfil da seção transversal do ponto, apresentando comprimento cerca de 560 m e profundidade máxima de até 10 m na preamar de sizígia, registrada em 27 de fevereiro de 2013.

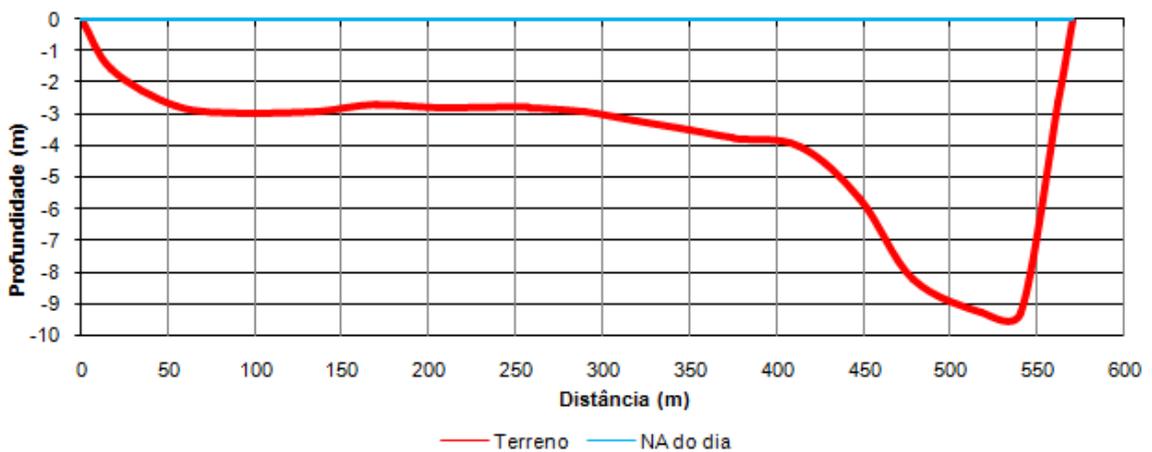


Figura 10 – Perfil da seção transversal do PA 3 realizado na campanha de fevereiro de 2013 (INEMA/UFBA, 2013a).

3.4.4 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM PEDRA DO CAVALO

A construção da Barragem de Pedra do Cavalo foi iniciada na década de 70 pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do Paraguaçu (DESENVALE) na região pertencente aos municípios de Governador Mangabeira e Cachoeira no Estado da Bahia, sendo concluída e inaugurada em 1985. Anteriormente a sua construção, existia a barragem de Bananeiras, que estava localizada a aproximadamente 30 km à montante do estuário e seu lago foi, então, incorporado ao novo lago da barragem de Pedra do Cavalo, com área inundada de aproximadamente 86 km². De 1989 até 2001 a operação e manutenção da barragem estiveram sob responsabilidade da Empresa Baiana de Águas e Saneamento S/A (Embasa) (COELBA & CNO, 2000).

A partir de 2002 a barragem passou a ser operada por concessão em conjunto pelo Grupo Votorantim, que se reporta à Companhia de Engenharia Ambiental da Bahia (CERB) representante legal do Governo do Estado e pela EMBASA, responsável pela captação e tratamento da água para abastecimento público, através de um acordo operativo. A CERB recebeu o reservatório do Instituto de Gestão das Águas e Clima (INGÁ), atual INEMA que substituiu a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia (SRH), em meados de outubro de 2008 (VOTORANTIM ENERGIA, 2009).

As coordenadas geográficas da barragem são ao Norte 8.608.665,445 Latitude 12°35'08,5" e a Este 500.247,855 Longitude 50°59'51,8". O reservatório possui um barramento principal e dois diques auxiliares e é controlado por um vertedouro com as principais características apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7:

Tabela 3 - Principais características do reservatório

Área de Drenagem (barragem)	53.650 km ²
Nível de água máximo maximorum (datum Imbituba)	124 m
Nível de água máximo normal (datum Imbituba)	120 m
Nível de água mínimo normal (datum Imbituba)	108 m
Nível de água mínimo minimorum (datum Imbituba)	105 m
Volume total cota 124 m.	5.330 hm ³
Volume total cota 120 m.	4.631 hm ³
Volume útil (entre as cotas 108 e 120 m)	1.646 hm ³
Área do reservatório, na El. 124,00 m	186,2 km ²
Área do reservatório, na El. 120,00 m	163,3 km ²
Vazão Média de Longo Termo	106 m ³ s ⁻¹
Vazão Mínima Mensal	5,2 m ³ s ⁻¹
Vazão Máxima Diária	5.198 m ³ s ⁻¹

Fonte: COELBA & CNO, 2000.

Tabela 4 - Principais características do barramento principal

Tipo	Enrocamento com núcleo de argila
Altura máxima da estrutura	142,50 m
Comprimento total da crista	460 m

Fonte: COELBA & CNO, 2000.

Tabela 5 - Principais características do dique 1

Tipo	Enrocamento maciço com núcleo de argila
Altura máxima da estrutura	26,50 m
Comprimento da estrutura	450 m

Fonte: COELBA & CNO, 2000.

Tabela 6 - Principais características do dique 2

Tipo	Solo com proteção de enrocamento
Altura máxima da estrutura	20 m
Comprimento da estrutura	200,00 m

Fonte: COELBA & CNO, 2000.

Tabela 7 - Principais características do vertedouro

Tipo	Concreto e superfície com controle
Número de Comportas	5
Dimensões das comportas	15 m de largura e 18 m de altura
Cota da Soleira	106 m
Capacidade Máxima de vertimento	12.000 m ³ s ⁻¹

Fonte: COELBA & CNO, 2000.

A Figura 11 representa a visão parcial da barragem de Pedra do Cavalo, exibindo à jusante às cidades de Cachoeira à margem esquerda do trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu e São Félix à margem direita.



Figura 11 - Visão parcial da barragem e reservatório de Pedra do Cavalo (Votorantim Energia, 2013).

A barragem Pedra do Cavalo é um empreendimento de múltiplos usos e a Licença de Operação foi emitida pela Resolução Nº 145 de 12 de dezembro de 1988, expedido pelo CEPRAM, órgão Estadual responsável pelas autorizações ambientais na Bahia, possuindo restrições de operação que minimizam os conflitos da água. As demandas hídricas relacionadas são:

- Controle de cheias;

- Abastecimento de Água;
- Irrigação Agrícola;
- Geração hidrelétrica;
- Pesca e Piscicultura;
- Navegação;
- Recreação e Lazer;
- Preservação dos Recursos Naturais.

A finalidade de geração hidrelétrica foi iniciada com a construção das instalações de geração durante os anos de 2002/2004, pela Concessionária Votorantim Cimentos N/NE Ltda., sendo que a geração comercial teve início em dezembro 2004. A UHE Pedra do Cavalo possui duas turbinas e podem trabalhar com uma vazão máxima turbinada de até $160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com cada turbina defluindo $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e com potencial para gerar cerca de 160 MW de energia.

Uma das principais funções que justificavam a construção do barramento foi o controle de cheias que foram acontecimentos que fizeram parte da história das comunidades de Cachoeira e São Félix. A ocorrência do período de cheias do rio Paraguaçu era praticamente anual, com base nos relatos de moradores antigos, sendo que os anos de 1914, 1930, 1940, 1960, 1964 e 1985, ocorreram cheias extremas ocasionando as inundações registradas e sendo todas estas anteriores à construção da Barragem de Pedra do Cavalo (MMA, 2006).

A construção da barragem proporcionou a regularização da vazão à jusante, controlando as enchentes, com exceção no ano de 1989, que devido à intensidade excepcional da cheia (tempo médio de ocorrência = 500 anos), a barragem não foi capaz de cumprir o objetivo, provocando uma grande inundação nestas cidades, sendo até o momento a única ocorrência de enchente após o seu funcionamento (MMA, 2006).

Segundo o relatório da ANA (2012), que indica a escassez de água na região, justificando a construção de barramentos em cursos de águas com a finalidade de reservação de água, bem como, para a regularização das vazões à jusante. Tais situações são colocadas em questão, pelo fato de que, as reservas de águas nem

sempre são utilizadas para atender às demandas regionais, mas sim, servem como subsídios de demandas externas como é o caso da geração de energia e o abastecimento de cidades como Salvador-BA distante da localização do barramento.

Por ser de extrema relevância para o abastecimento público de água na região metropolitana de Salvador e abastecer 60% da população soteropolitana, foi criada em julho de 1997, a partir do decreto Nº 6.548, a Área de Proteção Ambiental (APA) do Lago de Pedra do Cavalo, na bacia do rio Paraguaçu. A APA Pedra do Cavalo possui uma extensão de 186 km² estendendo-se por mais de oito municípios, sendo a 15ª maior área de Proteção Ambiental do Estado, com o objetivo de assegurar e garantir o recurso hídrico (PALMA, 2002).

Segundo Palma (2002) o discurso embasado para a criação da APA Pedra do Cavalo possuiu basicamente, a motivação pela conservação ambiental, entretanto, o que havia emanado foi uma política ambiental voltada para o interesse do desenvolvimento territorial da região, abarcado no crescimento turístico e econômico, possibilitando boas oportunidades de negócios.

A concessão da operação da UHE Pedra do Cavalo, firmada entre a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Votorantim Cimento Ltda., definindo os critérios que deverão ser preservados pelo regime de operação, a se saber (BRASIL, 2002; VOTORANTIM ENERGIA, 2009):

- Enquanto o reservatório a montante estiver acima ou na cota nível d'água (N.A.) mínimo normal, que é de 106,00 m deve-se defluir a vazão média diária de 60 m³ s⁻¹;
- Quando o nível do reservatório atingir o N.A. mínimo normal (106,00 m) e abaixo dele, deve-se reduzir a vazão média diária defluente para 10 m³ s⁻¹;
- Define como limite legal operacional máximo a vazão de 80 m³ s⁻¹, e vazão a partir dessa, ocorre alteração de salinidade na baía do Iguape, impactando os processos do ecossistema estuarino;

- Estabelece a vazão de restrição de $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, como limite de operação e que acima desse, há risco imediato de inundação das cidades de Cachoeira e São Félix, imediatamente próximas a barragem;
- Vazões superiores a $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ deverão ser realizadas sempre que o Operador Nacional do Sistema (ONS) solicitar a fim de suprir o Sistema Integrado Nacional com energia; quando for necessário ao controle de cheias para manutenção do volume de espera na eminência de grandes pluviosidades; e nas ocasiões para a realização de liberação da vazão de restrição, objetivando a identificação das regiões passível de alagamento que estão sob influência do reservatório. Este procedimento é denominado teste de calha e quando ocorrer, nesse sentido, deverá ser aplicado o Plano de Ações Emergenciais (PAE) para situações de cheias, contemplando ações preventivas e imediatistas, devendo ser de ampla divulgação à sociedade e ao poder público.

Nos períodos de estiagem a vazão média diária estabelecida passa a ser $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, denominada de “vazão sanitária”, que é liberada na forma de pulsos uniformes de vazão constante durante algumas horas por dia, respeitando o limite médio diário preestabelecido (VOTORANTIM ENERGIA, 2009). Este regime de operação aplicado pela barragem tem sido percebido pelas comunidades ribeirinhas como responsável por alterações significativas nas condições ambientais do baixo curso do rio Paraguaçu, afetando, sobretudo a produção pesqueira que tem diminuído em toda a região fluvioestuarina.

Foi observada durante a 5ª campanha de monitoramento realizada em fevereiro de 2013 e através do quadro hidráulico de operação e geração de energia da Votorantim, a utilização da condição de vazão sanitária pela UHE de Pedra do Cavalo. O regime de operação é de vazão defluente não-permanente e variada durante o dia (24 horas), sendo observado em períodos do dia vazão zero, com a finalidade de garantir o limite médio diário pré-determinado, em razão do atendimento das demandas prioritárias em resposta ao período de redução da disponibilidade hídrica da região.

Devido ao atendimento da condição atual de baixas magnitudes de vazões defluentes da usina, o ambiente fluvioestuarino continuou sendo classificado quanto à salinidade como misturado, corroborando com as conclusões observadas em Genz (2006), apresentando estratificação vertical irrelevante ou quase nula e com variação no perfil longitudinal de salinidade sendo influenciado pela força de maré da região.

3.4.5 POSSÍVEIS IMPACTOS OCASIONADOS PELAS ATIVIDADES NA BACIA

A região da bacia do Paraguaçu possui diversas atividades com potencial causador de degradação ambiental, e estão aí instalados e em operação os principais centros industriais do Estado da Bahia como: o Centro Industrial de Subaé, em Feira de Santana, com atividades indústrias metalúrgicas, têxteis, de celulose, de embalagem, materiais plásticos e produtos químicos.

Na Região Metropolitana de Salvador, estão localizados o Pólo Petroquímico de Camaçari possuindo empresas com atividades químicas, petroquímicas, metalúrgicas e de papel e celulose e também, o Centro Industrial de Aratú pela presença de unidades dos segmentos químico, plástico, têxtil, metal-mecânico e farmacêutico (MMA, 2006). Entretanto, a exploração petrolífera destaca-se como atividade altamente impactante ao meio ambiente, bem como o transporte de substâncias tóxicas, que são insumos ou dejetos oriundos desta atividade, o que possibilita o aumento da vulnerabilidade e o risco eminente de acidentes ambientais que, conseqüentemente, degradam a qualidade das águas e causam fortes impactos nos componentes dos ecossistemas aquáticos e terrestres.

Ao longo do curso do rio Paraguaçu pode ser identificadas atividades de irrigação a fio d'água de inúmeras culturas regionais de ciclo produtivo curto, tais como o tomate, pimentão, melancia e outros hortifrutis. Por causa dessa atividade, são carregados para o rio agrotóxicos e fertilizantes que são utilizados para o cultivo dessas culturas e tem comprometido a qualidade da água, pondo em risco a saúde humana, o biota aquática, e o meio ambiente em geral (MMA, 2006).

3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

Neste capítulo são descritos os principais conceitos e etapas de modelagem ambiental e relacionado os principais fatores que motivaram a seleção do modelo SisBaHiA, sendo a ferramenta utilizada para representar os fenômenos de interesse.

3.5.1 FUNDAMENTOS BÁSICOS DO PROCESSO DE MODELAGEM

Rosman *et al.* (2013) relatou que em estudos e projetos envolvendo corpos de água naturais, bem como em aplicações voltadas à gestão e ao gerenciamento ambiental dos recursos hídricos, modelos estão sendo utilizados frequentemente para estas finalidades. A Figura 12 representa o fluxograma básico para construção de modelos e para cada componente do processo de modelagem.

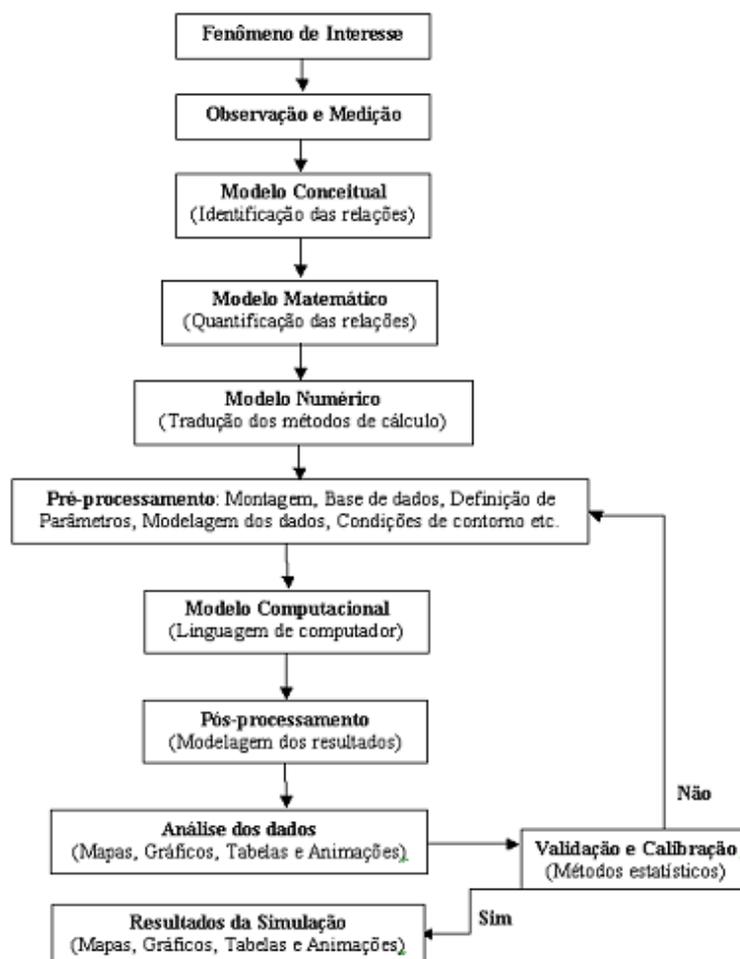


Figura 12 - Fluxograma dos processos de modelagem (Adaptado de Rosman *et al.*, 2013).

A seguir, comenta-se sucintamente sobre cada componente do processo de modelagem incluído na Figura 12.

- **Fenômeno de interesse:** Está associado à identificação dos elementos do evento ambiental que se quer estudar, sendo elencados os processos e relações existentes entre os elementos e até mesmo, entre sistemas em si.

- **Observação e medição:** Segundo Rosman *et al.* (2013), as observações iniciais de um fenômeno são qualitativas, e tem como objetivo o conhecimento das relações causais existentes. Posteriormente, tentam-se quantificar estas relações, fazendo-se medições das grandezas das causas, efeitos e agentes intervenientes relevantes. Através destas relações causais é que se obtém o mapa mental do fenômeno de interesse.

- **Modelo conceitual:** No processo de modelagem, o modelo conceitual é o mais importante, porque auxilia no entendimento do fenômeno observado, bem como, na identificação das relações causais existentes entre os elementos do sistema e suas ocorrências. Nessa etapa da modelagem, os modelos conceituais podem ser chamados de “leis” ou “princípios” do fenômeno (ROSMAN *et al.*, 2013).

- **Modelo matemático:** Consiste na tradução do modelo conceitual do fenômeno de interesse para a linguagem matemática (ROSMAN *et al.*, 2013). São transcrições das relações causais observadas em equações matemáticas para solucionar o relacionamento entre os componentes do fenômeno ou entre fenômenos.

- **Modelo numérico:** Os modelos numéricos são definidos como:

“... traduções dos modelos matemáticos adaptados para diferentes métodos de cálculo, por exemplo, diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos, além de modelos estocásticos... Permitem a solução de uma gama de problemas muitíssimo mais abrangente que qualquer outra modalidade de modelos” (Rosman *et al.*, 2013, p.16).

- **Pré-processamento: montagem, base de dados, definição de parâmetros e similares:** Nessa etapa é que são estruturados os elementos utilizados no processo de modelagem, tais como a definição da base de dados, construções de mapas, identificações de parâmetros e condições essenciais do modelo.

- Modelo Computacional: Rota para obtenção de informações quantitativas:

Conforme indica o diagrama na Figura, após a etapa de pré-processamento, haverá uma rota para se obter os resultados quantitativos desejados. Para os modelos numéricos, os resultados quantitativos são requisitados via um **modelo computacional**, que é a tradução de um modelo numérico para uma linguagem computacional que possa ser interpretada através de um computador.

- Pós-processamento: Nessa etapa do processo é que se faz a tradução das informações inseridas no modelo em dados quantitativos de saída, que representam os efeitos e as causas das relações existentes entre os elementos do sistema.

- Análise dos dados / Resultados da simulação: Mapas, Gráficos, Tabelas e Animações:

Os resultados do modelo podem ser gerados em forma de mapas, gráficos, tabelas e animações. Atualmente, os modelos matemáticos são ferramentas úteis nas áreas do conhecimento ligadas à gestão ambiental de recursos hídricos. Por este motivo, os desenvolvedores dos modelos de simulação de modo geral, estão empenhados no aperfeiçoamento dos recursos gráficos, tal como a possibilidade de gerar animações dos resultados modelados, tornando-os de fácil compreensão para que as pessoas possam melhorar o entendimento dos processos de gestão ambiental de recursos hídricos.

- Calibração e Validação: Nesse momento, é que verificamos se o cenário desenvolvido está coerente com as observações registradas do fenômeno modelado. Rosman *et al.* (2013, p.17) relatou que nessa fase do processo de modelagem é que deve ser respondida a seguinte pergunta: *“Os resultados obtidos conferem com o que se observa e se mede a respeito do fenômeno de interesse?”*

Como respostas à pergunta existem duas alternativas ou rotas. Se a resposta levar a **1ª Rota: Não**, significa que o modelo não está representando relativamente bem, o fenômeno estudado, sendo necessário retornar ao processo de calibração ou sensibilização dos parâmetros, que pode levar ainda à caixa do pré-processamento. Porém, se a resposta levar a **2ª Rota: Sim**, será a situação desejável para todo o processo de modelagem, indicativo de que o modelo está calibrado e validado, através da aplicação de métodos estatísticos confirmatório.

Atingindo este estágio desejável do processo, são gerados os resultados dos cenários propostos pela simulação, que irão compor o relatório de resultados da modelagem.

3.5.2 A ESCOLHA DO MODELO COMPUTACIONAL PARA A SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

Para a escolha do modelo computacional mais apropriado para resolver as incógnitas do escoamento turbulento de superfície livre e o transporte de sais é de extrema importância a observação dos fenômenos envolvidos e as relações existentes entre seus elementos, para relacioná-los com algoritmos que resolvam as problemáticas envolvidas no estudo.

Alguns dos principais fatores que foram relevantes na escolha do modelo hidrodinâmico e de qualidade da água, adequado para a simulação das condições do ambiente fluvioestuarino são mencionados a seguir:

- O modelo terá que possuir algoritmo que resolva o escoamento variável em direções opostas (sentido estuário abaixo e sentido estuário acima), devido à influência das forçantes de maré e fluvial da região.

- Possuir soluções para termos baroclínicos, pelo fato de que a circulação hidrodinâmica também é influenciada pela variação das densidades das massas d'água.

- Possuir o modelo hidrodinâmico acoplado com o modelo de transporte de sais, porque os fatores baroclínicos influenciam na circulação hidrodinâmica do fluido como mencionado acima.

O modelo hidrodinâmico pode ser executado considerando as direções do escoamento no plano horizontal (2DH) ou promediado na vertical ou pode ser executado levando em consideração todas as direções do escoamento no módulo tridimensional (3D) com acurácia nos perfis de velocidade.

Para resolver as incógnitas do escoamento do fluido em superfície livre, o SisBaHiA resolve as equações de Navier-Stokes, que reúnem os princípios das equações da

quantidade de movimento, equações da continuidade do volume, equações de estado e equações de transporte dos elementos de estado, sendo o modelo de qualidade de água baseado no transporte Euleriano advectivo-difusivo para escalares conservativo e não conservativos presentes no fluido (ROSMAN *et al.*, 2013).

Segundo Rosman *et al.* (2013), o modelo hidrodinâmico utilizado pelo SisBaHiA é da linhagem *FIST*², que é otimizado para corpos de águas naturais com superfície livre, onde a turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àsquelas utilizadas pelo método de Simulação de Grandes Vórtices (*LES*)³, considerado o estado da arte para modelagem turbulenta em escoamentos geofísicos.

Vale ressaltar a evidência de algumas aplicações anteriores do SisBaHiA na região deste estudo, a exemplo do Consórcio Hydros-CH2Mhill com a Fundação Coppetec (Ref. ET-170377/PENO-565) (1999/2000), que aplicou o SisBaHiA nos estudos de diagnóstico e prognóstico ambientais para a BTS; Xavier (2002) realizou estudos de análise da hidrodinâmica na baía de Todos os Santos – BA; Topázio (2003) aplicou o modelo para simular as plumas do emissário submarino com T_{90} variável na costa oceânica de Salvador-BA; Consórcio SDO-Hydros-CH2MHill-Coppetec (PEN0-4144) (2003/2004), realizou a modelagem computacional para análise de aspectos dos sistemas de disposição oceânica de esgotos da área metropolitana de Salvador-BA; Consórcio BTS_Hydros-CH2MHill-Coppetec (PEN0-4145) (2003), utilizou-se da aplicação de modelagem na determinação de correntes residuais, de transporte de sedimentos e poluentes na Baía de Todos os Santos; Projeto Cooperação Técnica (PEN0-7106) Coppetec/Hydros (2008), apoiou o monitoramento ambiental da área de influência do emissário submarino do Rio Vermelho em Salvador-BA; Barroso Junior (2009) aplicou o modelo para desenvolver a metodologia para geração de cartas de corrente de maré em sistemas estuarinos e recintos portuários aplicado na baía de Todos os Santos – BA, entre outros.

² *FIST* é uma sigla para “Filtered in Space and Time” ou Filtrado no Espaço e Tempo.

³ *LES* é uma sigla para “Large Eddy Simulation” ou Simulação de Grandes Vórtices.

4. METODOLOGIA

Nesse capítulo, são descritos os procedimentos para medição dos dados, definição dos métodos, parâmetros e recursos adotados na simulação, necessários para o desenvolvimento do modelo hidrodinâmico e de qualidade de água, visando alcançar os objetivos definidos, como a representação dos padrões de circulação e o transporte e dispersão dos constituintes presentes nas águas, com a finalidade de auxiliar na análise da variação do perfil longitudinal de salinidade no trecho fluvioestuarino do baixo curso do rio Paraguaçu.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

Com as particularidades que foram levantadas para uma simulação adequada dos fenômenos ambientais de interesse neste trabalho, o modelo **SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental)** (ROSMAN, 1987 *apud* ROSMAN *et al.*, 2013) atendeu aos requisitos necessários para a modelagem do escoamento turbulento em superfície livre de corpos d'água naturais, pois possui algoritmos que resolvem os termos baroclínicos e o fluxo variável em sentidos opostos das massas d'água, além de possuir a opção de acoplar ao modelo hidrodinâmico o modelo de qualidade da água para salinidade (ROSMAN *et al.*, 2013). Desta forma, foram utilizados os modelos hidrodinâmico e de qualidade de água para simular a variação temporal e espacial da salinidade no trecho em estudo, visando alcançar os objetivos propostos.

Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizados os modelos hidrodinâmico e de qualidade de água para simular a variação temporal e espacial da salinidade no trecho em estudo.

4.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA MODELAGEM: MODELAGEM GEOMÉTRICA DO TERRENO

Uma etapa importante no processo de modelagem é a definição dos parâmetros das modelagens geométrica do terreno e a hidrodinâmica e transporte que serão

utilizados no modelo como os mapas, malhas, batimetria, correntes e as condições iniciais e de contorno que serão partes das peculiaridades presentes nos fenômenos ambientais, as quais serão descritas a seguir.

A modelagem geométrica do terreno representa as estruturas e recursos necessários para a representação espacial e temporal do fenômeno ambiental de interesse, e a sua correta caracterização, possibilita o modelo na representação fiel do evento modelado.

4.2.1 DEFINIÇÃO DO CONTORNO TERRA E CONTORNO ABERTO

Para a definição dos contornos terra e aberto (mar) para corpo d'água que será modelado foram obtidos através de imagem de satélite, mapas georreferenciados, cartas náuticas e cartas topográficas, sendo posteriormente, importados para o modelo. O contorno terra representa as margens e seções de rios, ilhas ou canais presentes na modelagem. Os valores de vazões, velocidades e parâmetros de qualidade de água são inseridos nos nós ao longo do contorno de terra. A Figura 13 representa os contornos terra e aberto (mar), sendo que a cor marrom é o contorno terra e a cor azul o contorno aberto (mar), que associados representam o mapa base da modelagem.

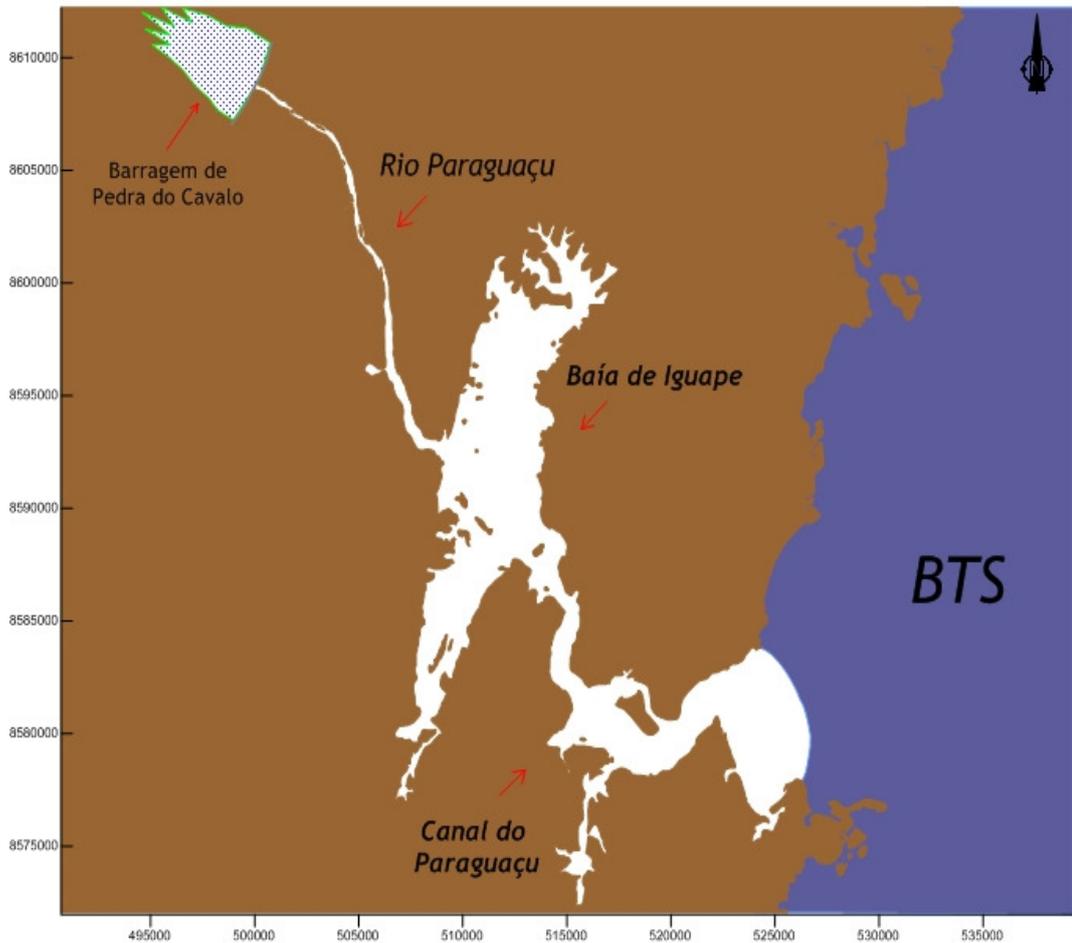


Figura 13 - Mapa base contendo os contornos terra e aberto (limite de mar).

O programa utilizado para criação e edição gráfica do mapa base é o *Surfer*, e o *SisBaHiA*, compartilha a mesma biblioteca gráfica, tornando compatíveis os recursos disponibilizados pela ferramenta.

4.2.2 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL

No *SisBaHiA* a discretização em planta do domínio de interesse utiliza elementos finitos quadráticos do tipo quadrangulares com 9 nós ou triangulares com 6 nós em uma formulação Lagrangeana sub-paramétrica, possuindo geometria definida por polinômios Lagrangeanos lineares, enquanto que as variáveis do escoamento e parâmetros do domínio são definidas por polinômios Lagrangeanos quadráticos. Portanto, para resolver as diferenças entre a geometria dos vértices e das incógnitas do escoamento e os parâmetros do domínio, se faz necessário a adição de um nó no meio de cada lado do elemento, e no caso de quadriláteros, adiciona-se mais um

nó no centro do elemento para garantir um esquema numérico de quarta ordem (ROSMAN *et al.*, 2013).

Segundo Rosman *et al.* (2013) o modelo SisBaHiA adota os mesmos esquemas de diferenças finitas de segunda ordem utilizada pelo FIST3D para a discretização temporal. E para os termos não lineares é adotada uma fatoração implícita de segunda ordem e para os termos lineares é utilizado o esquema de Crank-Nicholson.

A Figura 14 representa o domínio da modelagem com discretização espacial e temporal utilizando elementos finitos quadrangulares com 9 nós. O programa utilizado para geração e edição da malha de elementos finitos é o *Argus One*, que possui compatibilidade com o modelo, podendo ser importado com mais facilidade.

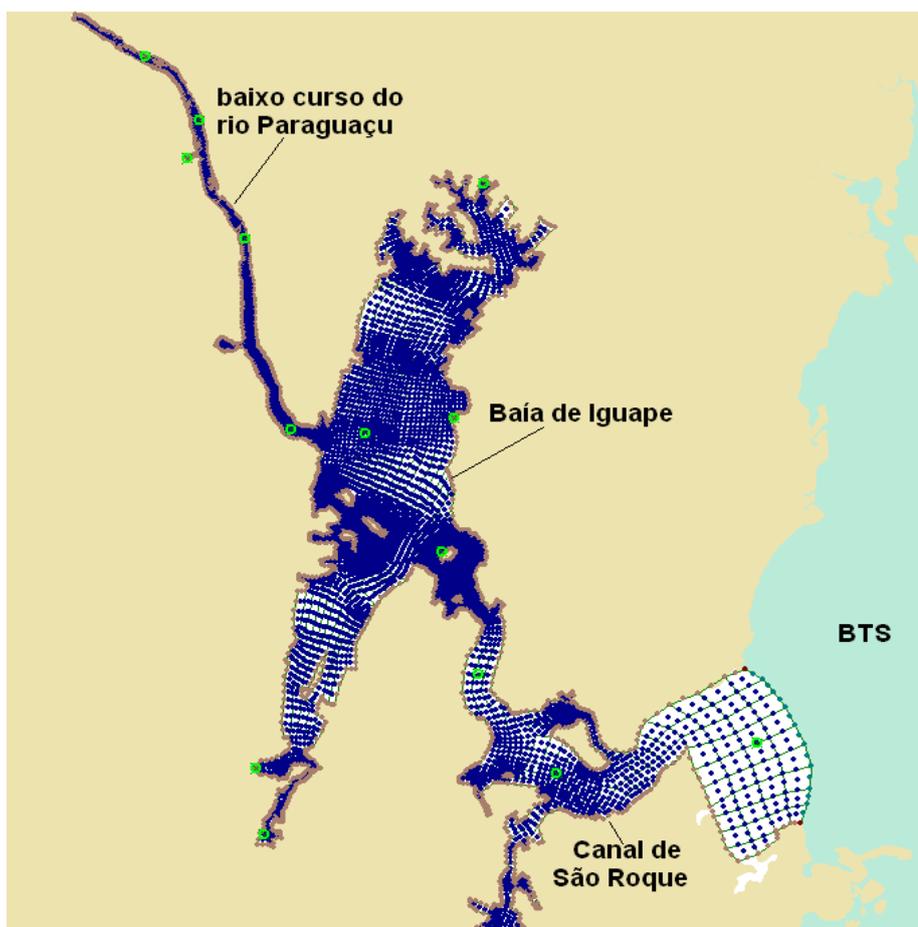


Figura 14 - Malha do domínio da modelagem com elementos finitos quadrangulares.

A definição da localização do contorno aberto (mar) no domínio da modelagem foi na boca do estuário, próximo da Baía de Todos os Santos motivada pela necessidade

de se caracterizar a entrada de água característica do ambiente oceânico da região, observada a salinidade média de 35‰ (LIMA & LESSA, 2002; GENZ, 2006; CIRANO & LESSA, 2007; LESSA *et al.*, 2009), garantindo que as águas que chegam nesse trecho, sejam características da maré oceânica da região.

4.2.3 DADOS UTILIZADOS NA MODELAGEM E CALIBRAÇÃO

A modelagem hidrodinâmica e de transporte da água e seus constituintes representa os parâmetros e elementos que serão modelados e o monitoramento desses requisitos são importantes para o entendimento dos processos existente nos fenômenos em estudo.

4.2.3.1 CORRENTOMETRIA

Os dados de correntes como a velocidade, distância e profundidade foram monitorados em 5 campanhas de campo e sob as seguintes condições de maré: 1ª campanha foi realizada do dia 7 a 9 de julho de 2011, sob a condição de maré de quadratura; 2ª campanha foi realizada nos dias 27 e 28 de setembro de 2011, sob a condição de maré de sizígia; 3ª campanha foi realizada nos dias 20 e 21 de outubro de 2011, sob condição de maré de quadratura; 4ª campanha foi realizada nos dias 10 e 11 de novembro de 2011, sob condição de maré de sizígia; e a 5ª campanha foi realizada do dia 25 a 27 de fevereiro de 2013, sob condição de maré de sizígia (INEMA/UFBA, 2013a).

As medições de correntes das 1ª, 2ª e 3ª campanhas de medição de correntes foram quantificada utilizando o equipamento molinete hidrométrico, porém, os resultados registrados não foram satisfatórios, pois os níveis elevados de condutividade elétrica interferiam no funcionamento do equipamento, impossibilitando o registro correto das informações.

Para solucionar este problema as 4ª e 5ª campanhas de monitoramento de correntes foram realizadas utilizando o Perfilador Acústico de Correntes com efeito Doppler (ADCP) da marca *RDI®* modelo *WorkHorse* com frequência de 600 khz composto por 4 sensores acústicos, gentilmente cedido pelo Departamento de Oceanografia

da UFBA, estando conectado a um laptop, através do programa de comunicação do equipamento, sendo capaz de calcular, concomitantemente, a velocidade das partículas na coluna d'água com base no efeito Doppler, a distância da seção e a altura da coluna d'água (profundidade), resultando assim, no cálculo de vazão da seção.

Os procedimentos utilizados para medição de correntes foi à fixação do ADCP a uma embarcação de pequeno porte (Figura 15), percorrendo com velocidade praticamente constante (cerca de 3 m s^{-1}) a seção transversal do rio no sentido da margem esquerda para a margem direita e vice-versa, a cada 30 minutos durante um período de 13 horas, a fim de satisfazer o ciclo de maré semidiurna (cerca de 12 horas). Este procedimento foi adotado para cada ponto amostral (PA 1, PA2 e PA3), e a Figura 16 representa o esquema ilustrativo da operação utilizando o perfilador ADCP.



Figura 15 - Perfilador acústico ADCP e embarcação de pequeno porte com o ADCP fixado.

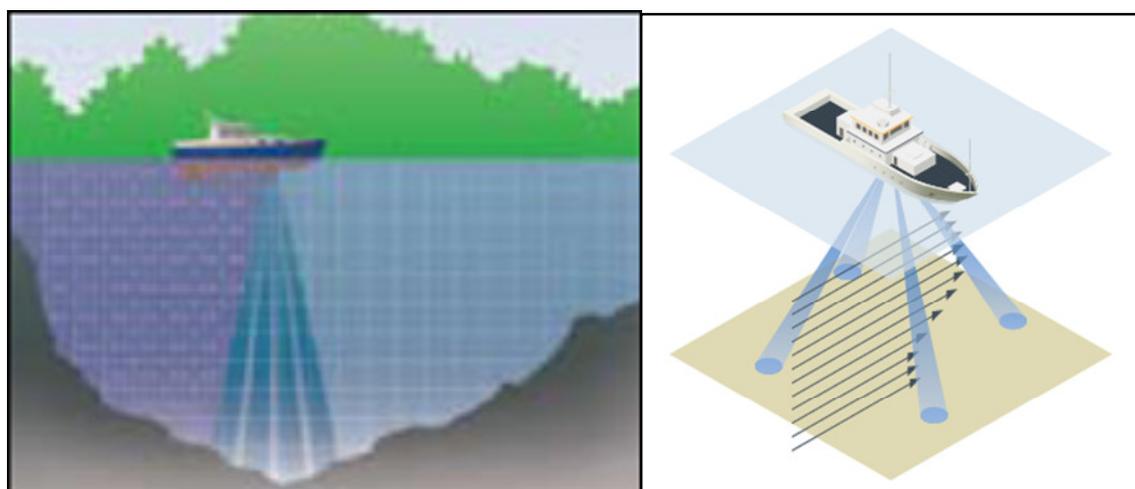


Figura 16 - Esquema de operação de medição de correntes utilizando o Perfilador Acústico de Correntes com efeito Doppler (ADCP) fixado à embarcação (INEMA/UFBA, 2013c).

4.2.3.2 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA, TEMPERATURA, PROFUNDIDADE E TURBIDEZ

Os dados de qualidade de água foram monitorados em 4 campanhas de campo e sob as seguintes condições de maré: 1ª campanha foi realizada nos dias 9 e 10 de julho de 2011, estando sob condição de maré de quadratura; 2ª campanha foi realizada no dia 21/10/2011, sob condição de maré de quadratura; 3ª campanha foi realizada no dias 12 a 13 de novembro de 2013, sob condição de maré de sizígia e 4ª campanha foi realizada no período de 25 a 27 de fevereiro de 2013, sob condição de maré de sizígia, que é o mesmo período de monitoramento da 5ª campanha de correntes. As três primeiras campanhas foram monitoradas utilizando a sonda multiparâmetro, gentilmente cedida e calibrada pelo Instituto de Química da UFBA, para medir a condutividade elétrica, temperatura, turbidez relativa nos PA's. Entretanto, foram realizadas medições pontuais e em apenas um determinado horário, não sendo possível observar a variação temporal dos parâmetros, mas, apenas a variação espacial na região.

Observou-se que, na região monitorada, a salinidade variava de acordo com o ciclo de maré e para registrar estas variações, seria necessário o monitoramento durante o ciclo de maré semidiurna, que corresponde ao período de uma maré enchente e uma maré vazante.

Para a realização das medições de Condutividade Elétrica, Temperatura e Profundidade na 4ª campanha de monitoramento de qualidade da água, foi utilizada a sonda hidrográfica CTD que em inglês significa (Conductivity, Temperature e Depth) da marca *Seabird®*, modelo *SBE 19plus SEACAT Profiler*, também gentilmente cedida pelo Departamento de Oceanografia da UFBA, possuindo memória interna para armazenamento dos dados que, posteriormente, foram baixados e analisados. A calibração da sonda CTD foi realizada no laboratório de Oceanografia da UFBA, utilizando soluções padrões específicas para cada parâmetro medido, conforme os procedimentos indicados no manual do equipamento.

As medições foram realizadas sincronizadas durante o mesmo período e condições do monitoramento de correntes, que consistia no lançamento da sonda no ponto

mais profundo da seção para cada Ponto Amostral (PAs). Os dados gerados foram processados e apresentados em função da variação da profundidade adimensional h/H , onde, h é a profundidade no instante monitorado e H é a profundidade máxima medida durante o ciclo de maré. A relação da profundidade adimensional permite eliminar o efeito da maré na variação de altura da coluna d'água, possibilitando a análise da distribuição dos parâmetros medidos na água em função da relação entre a superfície e o fundo.

A Figura 17 representa o momento do lançamento da sonda CTD e o perfil da seção transversal do PA 3 localizado no trecho fluvioestuarino.

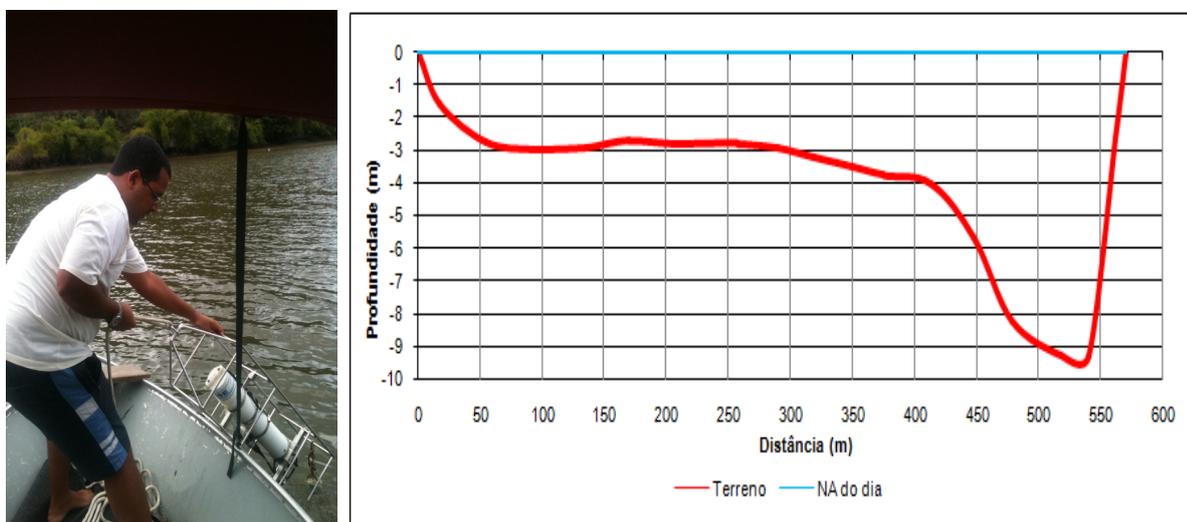


Figura 17 - Lançamento da sonda CTD e o Perfil da seção transversal do PA 3 no trecho fluvioestuarino (INEMA/UFBA, 2013c).

4.2.3.3 DISCRETIZAÇÃO VERTICAL DA COLUNA DE ÁGUA

Os dados de batimetria utilizados foram cedidos pela Concessionária Votorantim Cimento N/NE, empresa que é responsável pela administração da UHE de Pedra do Cavalo, e complementados pelos estudos realizados por Genz (2006), que acrescentou os dados batimétricos das regiões não mapeadas pela DHN. O modelo SisBaHiA possibilita que o modelador adote como nível de referência de cota o nível de redução da maré (NR), que é o mesmo padrão utilizado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN - Marinha do Brasil), que é correspondente a média das baixa-mares de sizígia.

O arquivo de batimetria utilizado pelo modelo deve conter as informações dos pontos georreferenciados com as coordenadas X e Y, os valores de batimetria, rugosidade equivalente do fundo e a área de influência do ponto. A Figura 18 representa o resultado da interpolação da batimetria pelo método de triangulação linear no SisBaHiA.

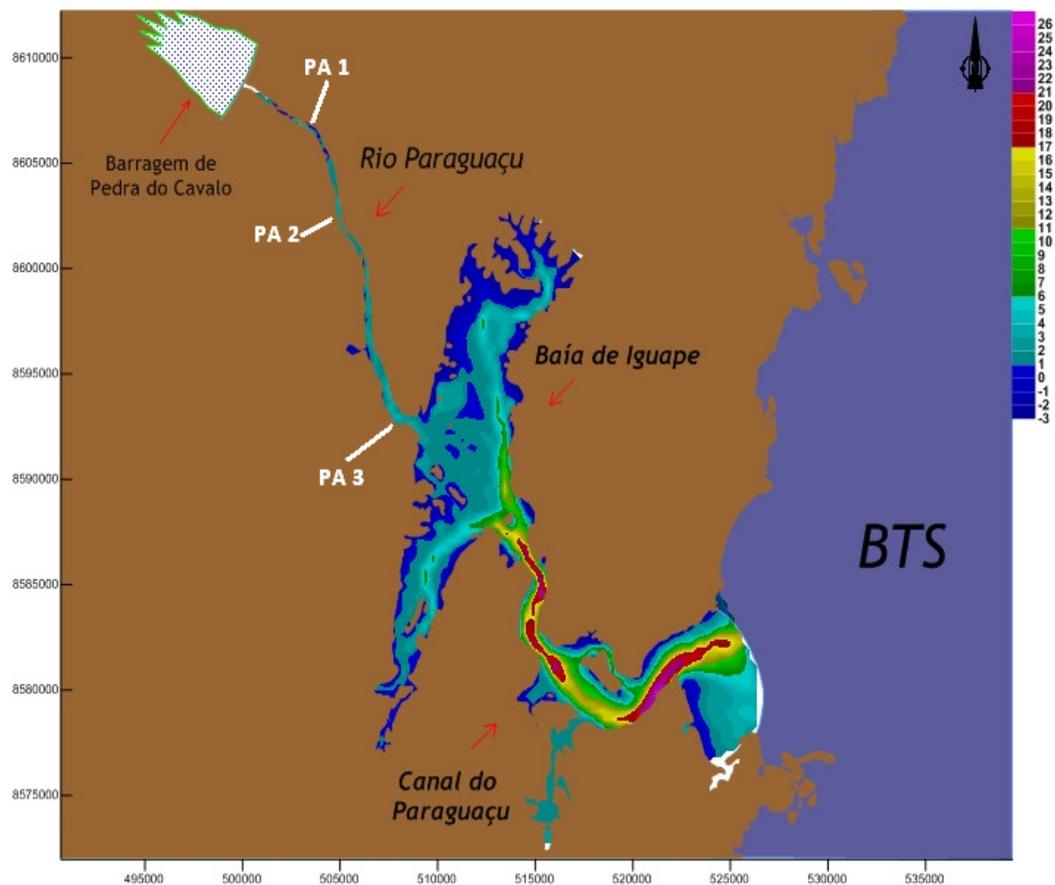


Figura 18 – Mapa da batimetria do domínio da modelagem interpolado pelo SisBaHiA.

Os valores de batimetria negativa observados na figura acima, representam as áreas de estirâncio, ou seja, indicam as áreas de cota seca num dado instante, e os valores de cotas positivas indicam a batimetria da região (cota úmida) que estão acima do nível de redução da maré.

No domínio da modelagem foram identificadas regiões de estirâncio que em determinados momentos, dependendo do ciclo da maré e da variação de nível d'água, podem alagar ou secar. Para resolver esta incógnita, o modelo SisBaHiA disponibiliza para o modelador a escolha de um dos seguintes métodos de alagamento e secamento dos nós: Método Rugoso-Poroso (MRP), Método Meio Poroso (MMP) e Método do Filme Superficial (MFS) (ROSMAN *et al.*, 2013). Os

métodos MRP e MMP são bem parecidos, e adotam como definição que o escoamento do meio é realizado através de uma camada equivalente pouca espessa e rugosa (Figura 19).

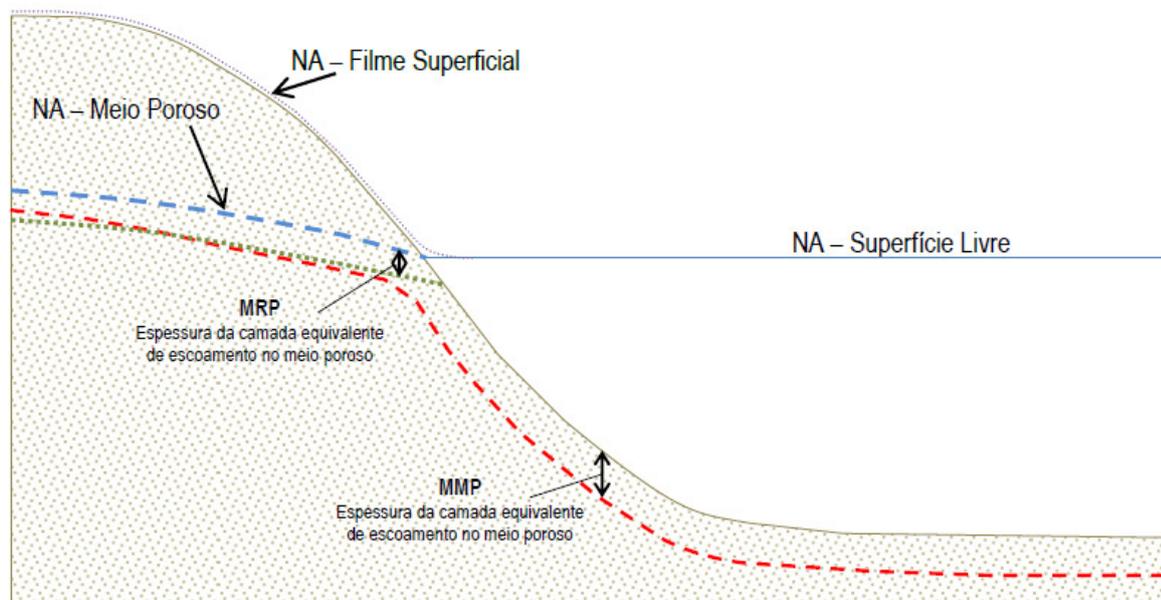


Figura 19 - Representação das camadas dos MMP e MRP. A região cinza representa a área do terreno e as espessuras das camadas são ilustrativas (Rosman *et al.*, 2013).

Já para o Método de Filme Superficial (MFS), o autor relata basicamente, que a superfície livre funciona como um filme, e à medida que ocorre a diminuição da altura do nível d'água, o filme vai se posicionando sobre a superfície do fundo. Para utilização desse método o modelador deve indicar as regiões em que ocorrem secamento dos nós e indicar como condição de contorno para nó seco a uma profundidade mínima admissível, sendo esta opção selecionada, é requerida uma maior experiência do modelador, diante da complexidade do método (ROSMAN *et al.*, 2013).

4.2.3.4 MARÉS ASTRONÔMICAS E METEOROLÓGICAS

Os dados de marés utilizados na modelagem são componentes que caracterizam as marés astronômicas e meteorológicas a exemplo de, variação do nível d'água, médias de preamares e baixa-mares, curva de maré, classificação da maré, entre outros.

A variação do nível da água foi monitorada através do sensor de pressão elétrico da marca Solinst®, que determina o nível da água através da medição de pressão da água sobre o sensor submerso, instalado no píer da cidade de Cachoeira-BA durante os dias da 5ª campanha de medição de campo. Os dados de pressão medidos pelo sensor são convertidos em sinal de maré por meio de nivelamento hidrográfico, usando o nível médio do mar publicado pela FEMAR através da estação 143-São Roque-Ba durante o período de 07/05/76 a 21/05/76, na qual, atualmente, ainda é utilizada como referência maregráfica da região (Figura 20).

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação : SÃO ROQUE – BA					
Localização : Rio Paraguaçu – No Cais acostável do Porto					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 12° 51,0' S		Longitude : 38° 50,7' W			
Período Analisado : 07/05/76 a 21/05/76			Nº de Componentes : 23		
Análise Harmônica : Método Almirante Santos Franco (15 dias)					
Classificação : Maré Semidiurna.					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		IV H 30 min	Nível Médio (Zo):		163 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sизigia (MHWS) :		293 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		218 cm acima do NR
Média das Baixa-mares de Sизigia (MLWS) :		34 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		108 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	-	-
Ssa	-	-	N ₂	23,6	118
Mm	-	-	NU ₂	4,5	118
Mf	-	-	M ₂	92,3	114
MTM	-	-	L ₂	-	-
Msf	-	-	T ₂	2,2	134
Q ₁	2,3	045	S ₂	37,2	135
O ₁	7,3	146	K ₂	10,1	137
M ₁	-	-	MO ₃	-	-
P ₁	1,2	207	M ₃	-	-
K ₁	3,5	212	MK ₃	-	-
J ₁	-	-	MN ₄	0,3	189
OO ₁	-	-	M ₄	6,6	318
MNS ₂	-	-	SN ₄	-	-
2N ₂	3,1	123	MS ₄	4,5	039
Referências de Nível: RN implantada no próprio Cais.					
Obs: Não há referências a outros períodos Maré com influência fluvial					

Figura 20 - Constantes Harmônicas da estação 143-São Roque-BA (FEMAR, 2013).

A Figura 21 representa o gráfico da curva de maré do estuário do rio Paraguaçu para o período de 28 dias no mês de Fevereiro de 2013, gerados a partir das constantes harmônicas da tabela na Figura 21, com cotas referidas ao NR da DHN.

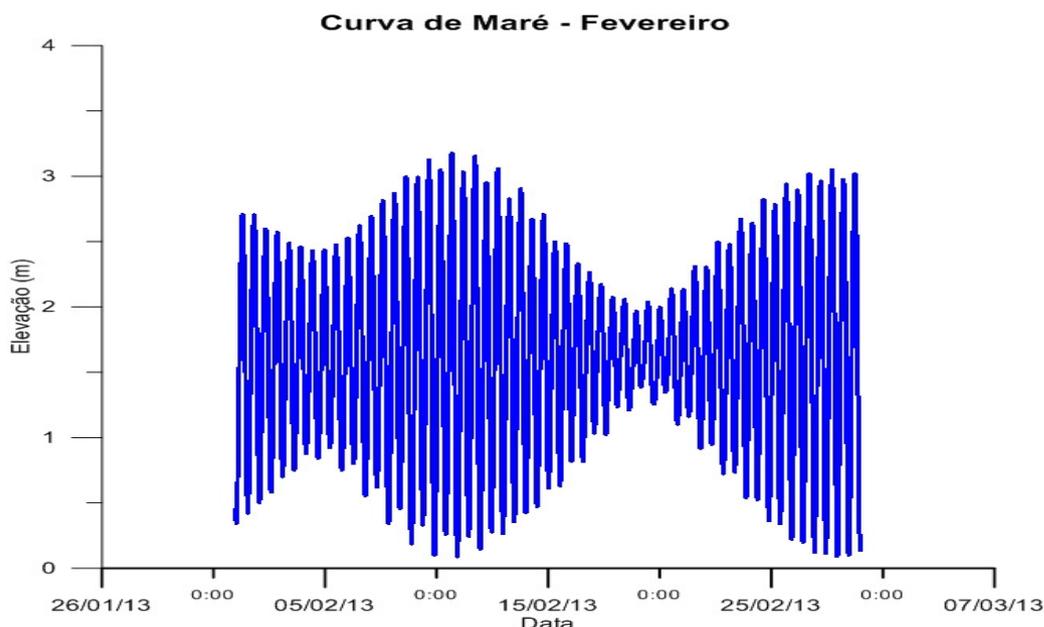


Figura 21 - Curva de maré no estuário do rio Paraguaçu em Fevereiro de 2013.

4.2.3.5 VAZÃO AFLUENTE AO DOMÍNIO DA MODELAGEM

As séries temporais de vazões afluentes que representam a forçante fluvial foram fornecidas pela Votorantim Energia, empresa responsável pela operação da barragem, e foi disponibilizado o quadro hidráulico e de geração de energia diário, que correspondem aos dados diários das vazões horárias defluente referente ao regime de operação da barragem. Também, foram disponibilizados o hidrograma das vazões dos principais afluentes da região fluviestuarina, que são os rios Capivari, Cachoeirinha, Pitanga e Catú, monitorados pela Votorantim através de estações fluviométricas instaladas em seus cursos d'água.

As variações do fluxo da forçante de maré são extraídas através das constantes harmônicas da estação 143-São Roque-BA, publicadas pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e serão abordadas oportunamente a diante.

A vazão total da seção do rio é distribuída uniformemente nos nós que representam a seção da barragem de Pedra do Cavalo e tem como unidades de medida $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. A vazão total é calculada pela integração dos valores nodais que representam a seção, sendo uma grandeza vetorial, com módulo, direção e sentido (ROSMAN *et al.*, 2013). A formulação matemática para representar o cálculo da vazão nodal uniformemente distribuída é $\mathbf{q}_n = \mathbf{q}_d / \mathbf{C}$, onde, \mathbf{q}_n é a vazão nodal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), \mathbf{q}_d é a vazão

do nó afluente ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e C é o comprimento em metros (m) da seção referente aos nós afluentes. O sinal negativo (-) indica que o vetor vazão tem sentido oposto ao vetor normal.

A condição de contorno adotada na modelagem para os nós (7033, 7034, 7036, 7038 e 7040) que representam a seção transversal da barragem, foi alterada para nós do tipo afluente e inserido o hidrograma de vazão distribuída e o ângulo normal.

4.3 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DOS DADOS

Para análise dos dados simulados são utilizadas técnicas para calibração e validação dos dados observados, comparando-se com os dados simulados pelo modelo.

Para a realização da análise dos dados observados com os dados simulados pelo modelo será aplicado o método estatístico do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (R^2) (TUCCI, 1998), utilizado para a análise da eficiência de representação dos fenômenos hidrodinâmicos e da qualidade de água pela utilização de modelagem ambiental.

➤ Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (R^2)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{obsi} - Q_{esti})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{obsi} - \bar{Q})^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde, **Qobsi** é o parâmetro observado; **Qesti** é o parâmetro estimado pelo modelo, \bar{Q} é a média do parâmetro observado; **m** é o número de dados no evento considerado. Os parâmetros utilizados para a calibração da modelagem são o nível d'água, a velocidade, a vazão e a salinidade, medidos e simulados na região de estudo.

O coeficiente R^2 pode variar a partir de negativo infinito até 1, sendo 1 o ajuste perfeito do modelo. O valor de R^2 é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas simuladas, motivo pelo qual, quando R^2 é próximo de 1, indica que o

modelo está representando bem as cheias. Se o valor de R^2 for maior que 0,75 o resultado modelado é considerado adequado e bom, e se o valor de R^2 estiver entre 0,36 e 0,75 os resultados são indicados como aceitáveis (COLLISCHONN, 2001).

Segundo Rosman *et al.* (2013), um modelo bem calibrado que represente com fidelidade os fenômenos hidrodinâmicos e da qualidade de água em corpos d'água naturais podem admitir diferenças estatísticas inferiores a 5% para a variação de nível d'água e tolerar diferenças de até 20% para os parâmetros de correntes e qualidade de água, a exemplo de velocidade, vazão e salinidade.

Para o procedimento de verificação longitudinal da ocorrência de intrusão salina, é necessária a identificação da localização da isohalina de 5‰, que se refere à faixa igual (isolinha) de salinidade com 5‰ (SILVA, 2001; FLANNERY *et al.*, 2002; SCHETTINI, 2002; GENZ, 2006; LESSA *et al.*, 2009; LIMA *et al.*, 2010), característica de ambiente com baixa salinidade ou oligohalino (VENICE, 1958).

4.4 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM

O processo propriamente dito consiste na comparação dos dados medidos com os dados simulados sob mesmas condições ambientais, verificando-os através de métodos estatísticos que comprovem a eficiência da modelagem em representar os fenômenos ambientais percebidos na região de estudo. Nesse sentido, são relatados os procedimentos utilizados para calibrar o modelo hidrodinâmico e de qualidade de água utilizados na modelação.

1) Realização de ajustes fundamentais para uniformizar os elementos da malha de modelagem e a análise da geometria de fundo, unificando e compatibilizando os arquivos de batimetria da região, objetivando a discretização espacial e temporal dos fenômenos de interesse (ROSMAN *et al.*, 2013).

2) Verificação do nível d'água nos locais em que estão instaladas as estações maregráficas 137-Cachoeira, 139-Najé e 143-São Roque da FEMAR, que estão presentes na região de estudo, a velocidade média da coluna d'água e a vazão absoluta da seção nos pontos amostrais utilizados para a simulação.

3) Depois de calibrado o modelo hidrodinâmico, com valores dentro dos limites estatísticos aceitáveis, o processo de calibração do modelo de transporte dos parâmetros de qualidade de água, no caso a salinidade, se faz necessário apenas, com a verificação dos dados medidos com os dados simulados para os pontos de monitoramento (ROSMAN *et al.*, 2013).

4.4.1 CONDIÇÕES ADOTADAS NA SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Nesse tópico são abordadas as situações e condições utilizadas na modelagem que fizeram parte do processo de calibração e validação do modelo para a região de estudo. São citados os valores dos parâmetros relevantes, as condições iniciais inseridas, bem como as condições de contorno utilizadas na simulação hidrodinâmica e de qualidade de água no modelo SisBaHiA.

- a) O período utilizado para a simulação hidrodinâmica e de qualidade da água foi de 01/02/2013 as zero hora até 28/02/2013 às 23 horas, representando o tempo total de 2.419.200 segundos. O intervalo dos resultados temporal e espacial foi de 3600 segundos (a cada hora) com passo de tempo de 50.
- b) Foram considerados os termos das equações do movimento de advecção integrado na vertical, possibilidade de atrito no fundo, efeitos da filtragem temporal e espacial turbulenta, os termos da equação do gradiente baroclínico com valor constante de Von Karman de 0,404. O método de alagamento e secamento dos nós foi o MRP – Método Rugoso-Poroso, adotando a espessura de 0,6 m como região de escoamento no meio poroso-rugoso, fator de rugosidade do fundo de 1,9 e admitindo-se velocidade residual.
- c) O hidrograma de vazão afluente utilizado foi o quadro hidráulico de operação da UHE Pedra do Cavalo, referente ao mesmo período da simulação hidrodinâmica (01/02/2012 à 28/02/2013), possuindo vazão horária não-permanente e variável ao longo do dia, respeitando a restrição de operação atual que é a média diária de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (VOTORANTIM ENERGIA, 2013).

Também, foram informadas as vazões permanentes e uniformes dos 4 principais rios afluentes a região fluvioestuarina, sendo eles: o rio Capivari com vazão de $-0,01490 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o rio Cachoeirinha com vazão de $-0,00572 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o rio Pitanga com $-0,00168 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o rio Catu com $-0,00170 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Os valores de vazões foram convertidos em precipitação (mm/h), por apresentarem melhores resultados de diluição na simulação durante o processo de calibração hidrodinâmica e de qualidade da água.

- d) A condição inicial de elevação da coluna de água foi de 0,451 m gerado pelo módulo de previsão de maré no dia 01/02/2013 e o nível médio de referência da coluna d'água de 1,63 m. Tais informações foram extraídas das constantes harmônicas da estação maregráfica 143-São Roque-BA (FEMAR, 2013) e ajustadas às componentes para a fronteira aberta da modelagem que está à jusante da referida estação, evidenciado no processo de calibração.
- e) Para simplificação da modelagem hidrodinâmica não foram informados valores de infiltração, viscosidade e precipitação da região. Tais informações foram desconsideradas, em razão de valores observados na região variarem na ordem de poucos milímetros (mm), diante da distorção da elevação da maré que pode atingir amplitude a cerca de 3 m na região, portanto, foi irrelevante considerá-los na modelagem. Quanto aos dados de vento e evaporação, também não foram inseridos, por não influenciarem nos resultados propostos pelo objetivo geral desse estudo que é a identificação da intrusão salina no ambiente estuarino.
- f) O processo de dispersão turbulenta do sal foi em função do modelo hidrodinâmico considerando termos baroclínicos e na predominância da direção longitudinal e com valores constantes. Não incluiu termos de filtragem espacial e temporal e considerou a advecção no meio poroso. O número máximo de Peclet foi 4,0. O período e passo de tempo da simulação do modelo de salinidade foram os mesmos do modelo hidrodinâmico.
- g) Os valores iniciais de salinidade das águas liberadas pela UHE de Pedra do Cavalo e dos afluentes foram de 0,2‰, para caracterizar concentrações de água doce como entrada no domínio da modelagem. E concentrações de

35‰ para caracterizar as águas oceânicas na região. Os valores foram distribuídos em todos os nós que representam a fronteira aberta (mar) na modelagem. A condição inicial para a salinidade em todo o domínio da modelagem foi de 35‰.

- h) Os resultados do modelo foram apresentados na condição do escoamento 2DH promediado na vertical, considerando os valores médios da coluna d'água.

4.4.2 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA

Os resultados da calibração são apresentados comparando-se os dados observados em campanha com os dados simulados pelo modelo hidrodinâmico do SisBaHiA, objetivando a representação da dinâmica das águas na região fluvioestuarina, no mesmo período de monitoramento, possibilitando a análise comparativa dos parâmetros estudados.

Na calibração do nível d'água foram utilizados dados da estação maregráfica de 143-São Roque –BA por estar mais próxima a fronteira aberta considerada na área de estudo. Foram inseridas as constantes harmônicas desta estação no módulo de previsão de maré do modelo e executado para o mesmo período da 5ª campanha de monitoramento. Posteriormente, foram extraídos os resultados da previsão de maré e comparados com o resultado gerado pelo modelo hidrodinâmico do nível d'água simulado para o nó 941 que representa a estação 143-São Roque-BA.

Após a análise comparativa dos resultados foi necessária a realização de ajustes nas componentes das constantes harmônicas utilizadas na simulação hidrodinâmica para que o nível d'água fique igual ou relativamente próximo ao nível d'água previsto pela estação 143-São Roque. O processo de verificação de nível d'água simulado, também foi realizado para as estações 139-Najé através do nó 5493 e a 137-Cachoeira através do nó 6667.

Para calibrar os demais parâmetros de correntes, também foi através do processo comparativo dos dados observados na 5ª campanha de campo para os pontos amostrais (PA's) com os resultados da simulação hidrodinâmica executados no

modelo SisBaHiA. A seguir são apresentados os resultados da calibração do modelo hidrodinâmico para cada ponto amostral.

4.4.2.1 PONTO AMOSTRAL 1 (PA 1)

A Figura 22 representa o gráfico comparativo de nível d'água medido no cais da cidade de Cachoeira durante o período da 5ª campanha e os resultados simulados para o nó 6667 que representa o PA 1 no domínio da modelagem.

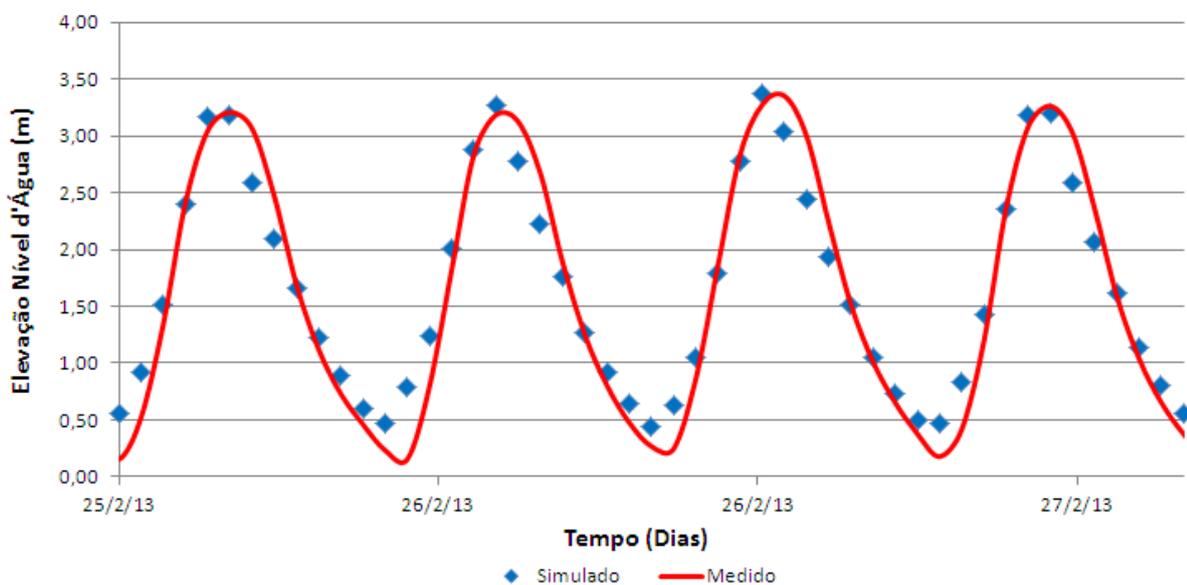


Figura 22 - Variações de nível d'água medido em Cachoeira e simulado para o PA 1.

E a Figura 23 representa a análise da tendência linear entre os valores medidos e simulados de nível d'água $R^2=0,966$. A aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,944$, indicando também, uma boa representação do nível d'água pelo modelo hidrodinâmico.

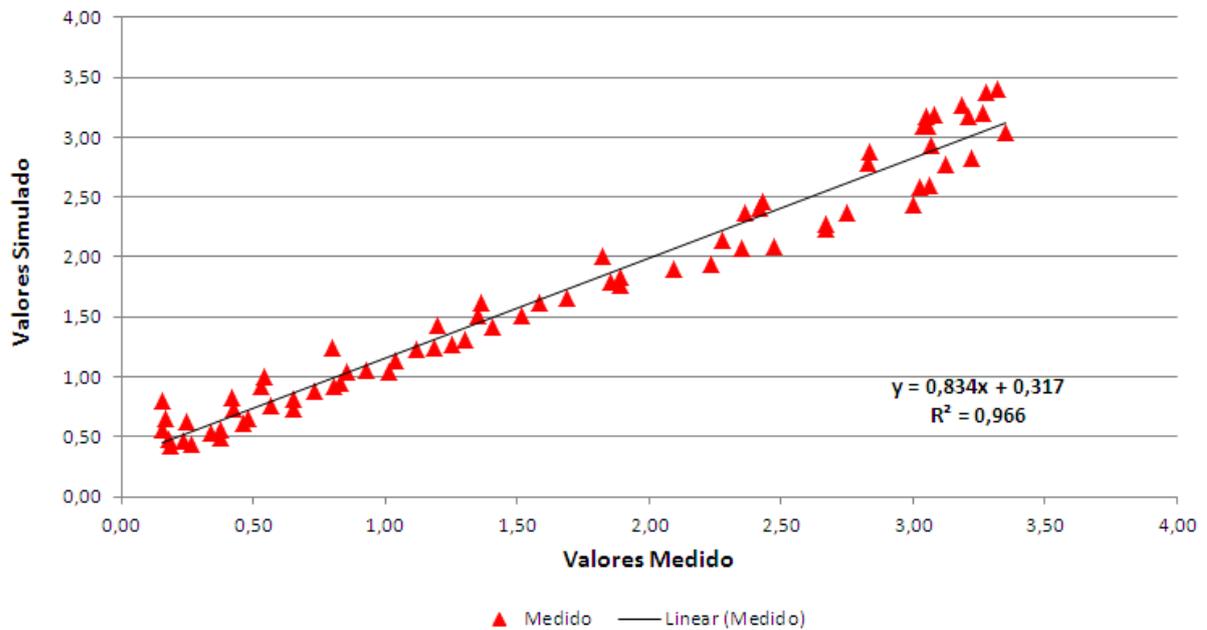


Figura 23 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de nível d'água medidos e simulados no PA 1.

A série de dados do monitoramento de corrente no PA 1 foi realizada no dia 25/02/2013, iniciado às 6h26min e encerrando às 19h06min do mesmo dia, sob condição de maré de sizígia e ano seco. A Tabela 8 representa os dados horários de velocidade média da coluna d'água e as vazões observadas e simuladas no PA 1.

Tabela 8 - Dados de velocidade média e vazões medidas e simuladas no PA 1 em 25/02/2013

Hora	Velocidade Medida ($m s^{-1}$)	Velocidade Simulada ($m s^{-1}$)	Vazão Medida ($m^3 s^{-1}$)	Vazão Simulada ($m^3 s^{-1}$)	Vazão Defluente informada pela VOTORANTIM ($m^3 s^{-1}$)
0	-	-0,21	-	-122	0
1	-	-0,32	-	-215	0
2	-	-0,40	-	-344	0
3	-	-0,30	-	-358	0
4	-	-0,08	-	-146	0
5	-	0,19	-	239	0
6	-	0,20	-	223	0
7	0,25	0,20	175	187	0
8	0,19	0,21	149	167	0
9	0,15	0,20	99	144	0
10	0,15	0,19	55	120	0
11	0,08	0,15	33	90	0
12	0,02	-0,18	4	-104	0
13	-0,32	-0,31	-117	-200	0
14	-0,44	-0,42	-307	-344	0

Conclusão

Hora	Velocidade Medida (m s ⁻¹)	Velocidade Simulada (m s ⁻¹)	Vazão Medida (m ³ s ⁻¹)	Vazão Simulada (m ³ s ⁻¹)	Vazão Defluente informada pela VOTORANTIM (m ³ s ⁻¹)
15	-0,33	-0,34	-295	-398	0
16	-0,11	-0,14	-106	-218	0
17	0,01	0,16	-4	206	0
18	0,15	0,20	171	236	0
19	0,33	0,20	257	213	0
20	-	0,22	-	191	0
21	-	0,24	-	184	26,10
22	-	0,21	-	145	45,78
23	-	0,18	-	111	0

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 24 representa o gráfico das velocidades médias na coluna d'água medidas e simuladas no PA 1 para o mesmo período. O gráfico da Figura 25 representa a tendência linear $R^2=0,873$ existente entre os valores de velocidades médias observadas e simuladas para o PA 1. O resultado estatístico da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,864$ indicando uma boa relação existente entre os dados de velocidade apresentados.

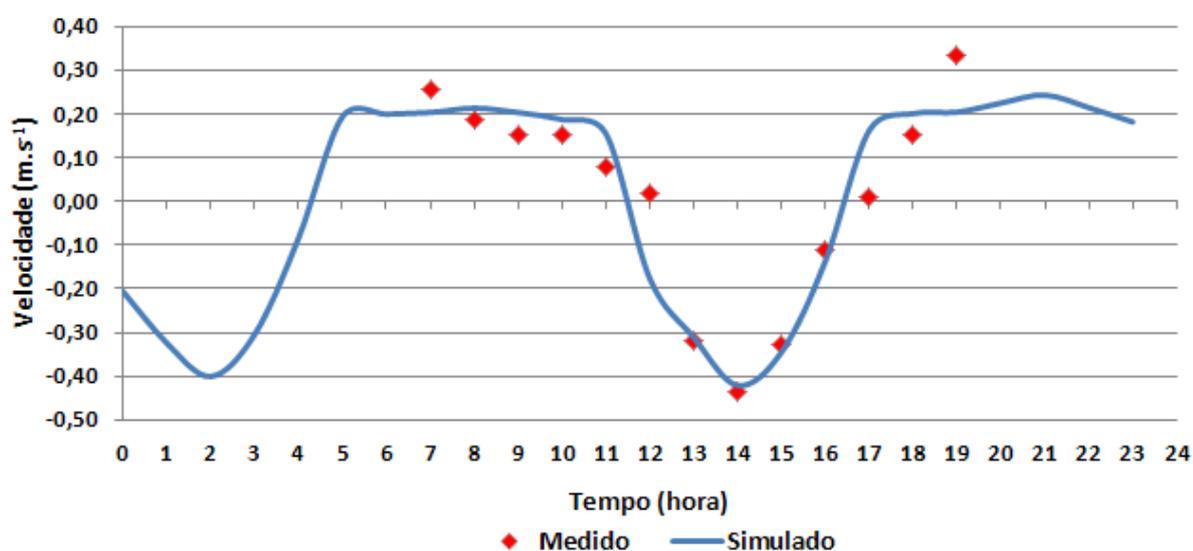


Figura 24 - Velocidades médias observadas comparadas com as velocidades médias simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.

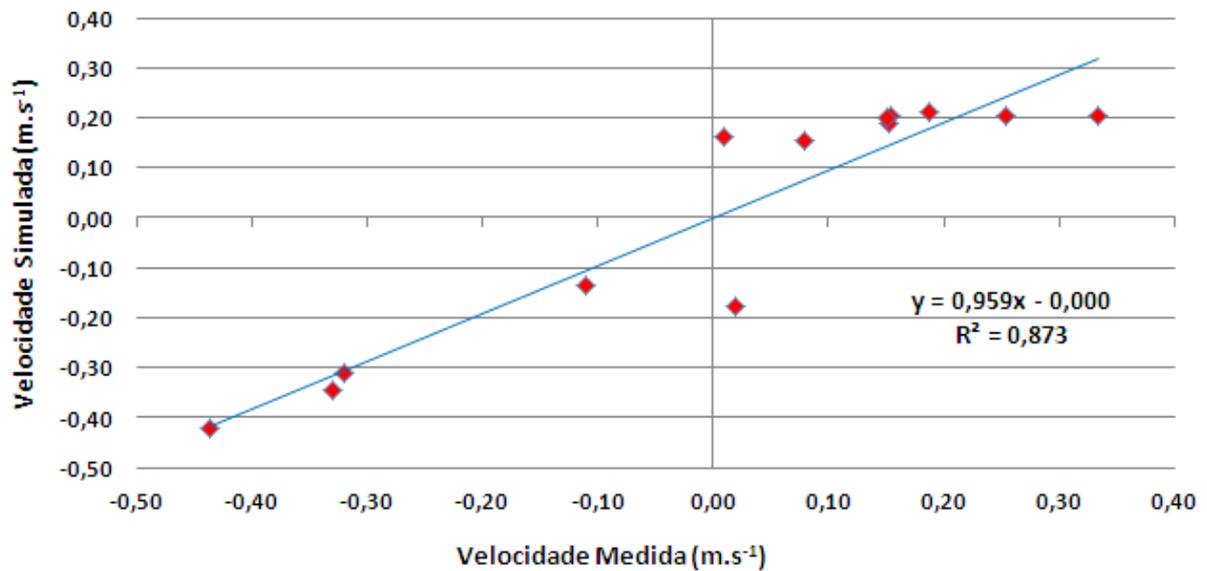


Figura 25 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de velocidades medidas e simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.

A Figura 26 representa o gráfico comparativo das vazões horárias medidas e simuladas no mesmo período para o PA 1.

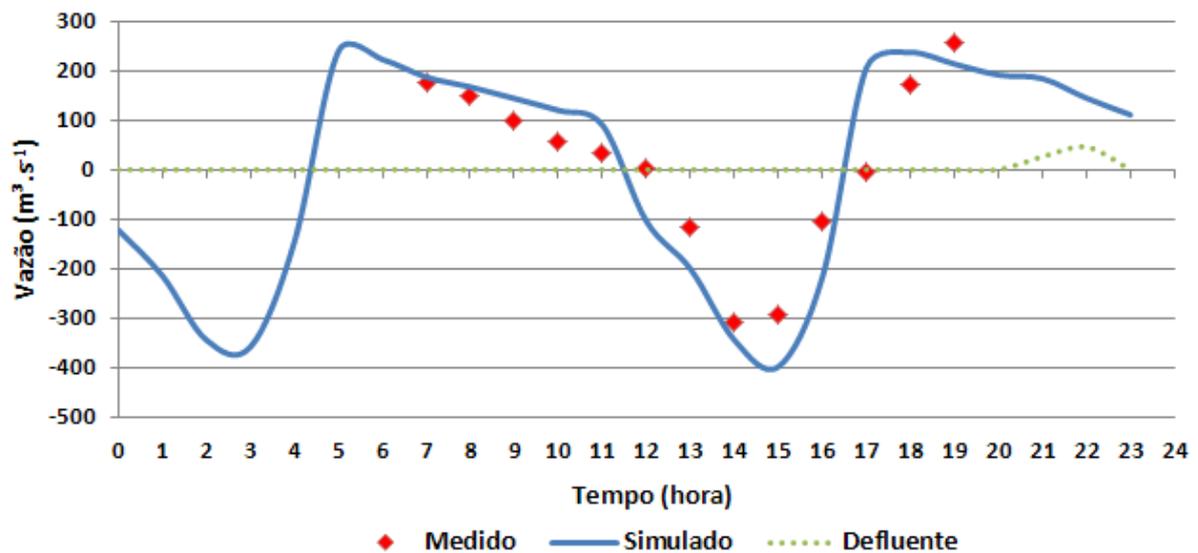


Figura 26 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.

O gráfico da Figura 27 representa a tendência linear $R^2=0,860$ existente entre os valores de vazões apresentados. A aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,719$ indicando, estatisticamente, uma relação aceitável entre os dados observados e simulados de vazão para o período.

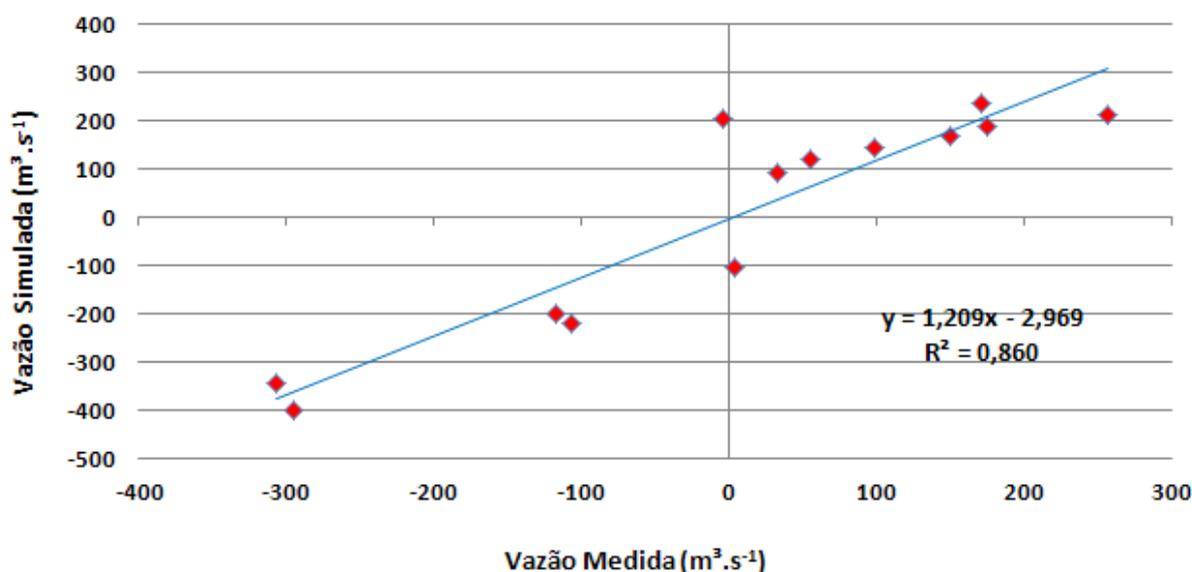


Figura 27 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.

Através dos dados apresentados acima, pode-se observar que as correntes de velocidade máximas registradas ocorreram durante a meia-maré de enchente, característica típica de estuário influenciado pela forçante de maré, apresentando entrada líquida de sedimento. Os valores máximos ocorreram por volta das 14h registrando velocidade média da coluna d'água simulada e medida de $-0,44$ e $-0,42$ $m \cdot s^{-1}$ e vazões de -307 e -344 $m^3 \cdot s^{-1}$, respectivamente. Porém, na maré vazante o fluxo máximo medido e simulado ocorreu às 19h registrando velocidades médias na coluna d'água de $0,33$ e $0,20$ $m \cdot s^{-1}$ e vazões de 257 e 213 $m^3 \cdot s^{-1}$ e, respectivamente. Os valores negativos indicam fluxos de maré enchente no sentido estuário acima, enquanto que, os valores positivos indicam fluxos de maré vazante, no sentido estuário abaixo (ver Tabela 8).

4.4.2.2 PONTO AMOSTRAL 2 (PA 2)

A análise comparativa dos resultados previstos e simulados de nível d'água para o PA 2 não foi realizado, porque está situado próximo ao PA 1 e não possui uma estação maregráfica instalada para ser utilizado como referência de nível d'água previsto da localidade.

As séries de dados do monitoramento de corrente no PA 2 foram realizadas no dia 26/02/2013, iniciado às 6h42min e encerrando às 19h34min, e estando sob as mesmas condições citadas. A Tabela 9 representa as séries temporais horária dos dados de velocidade média e vazão medidas e simuladas para o PA 2.

Tabela 9 - Dados de velocidade média e vazões medidas e simuladas no PA 2 em
26/02/2013

Hora	Velocidade Medida (m s^{-1})	Velocidade Simulada (m s^{-1})	Vazão Medida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Vazão Simulada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Vazão Defluente informada pela VOTORANTIM ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
0	-	-0,10	-	-52	0
1	-	-0,58	-	-281	27,60
2	-	-0,81	-	-500	45,35
3	-	-0,85	-	-678	0
4	-	-0,56	-	-539	0
5	-	0,11	-	131	0
6	-	0,58	-	477	0
7	0,55	0,55	405	397	0
8	0,57	0,57	479	351	0
9	0,44	0,56	280	292	0
10	0,31	0,51	194	239	0
11	0,24	0,44	143	185	0
12	0,14	0,06	76	20	0
13	-0,35	-0,53	-184	-248	0
14	-0,70	-0,84	-491	-484	0
15	-0,77	-0,92	-732	-707	0
16	-0,48	-0,70	-514	-668	0
17	-0,14	-0,10	-165	-94	0
18	0,11	0,57	141	502	0
19	0,48	0,57	488	432	0
20	-	0,58	-	378	0
21	-	0,58	-	320	0
22	-	0,54	-	262	0
23	-	0,48	-	207	0

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 28 representa o gráfico das velocidades médias horárias da coluna d'água medidas e simuladas no PA 2.

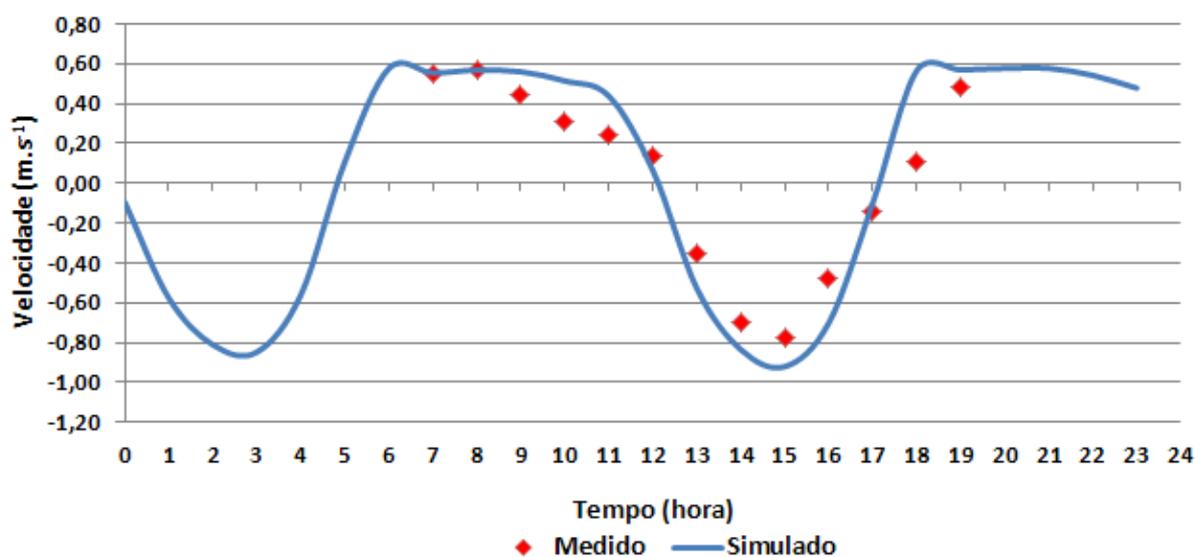


Figura 28 - Velocidades médias observadas comparadas com as velocidades médias simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.

A Figura 29 representa a correlação existente entre os valores. Os resultados estatísticos demonstraram uma tendência linear de $R^2 = 0,932$ e o cálculo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,836$ apresentando boa representação do modelo para os dados de velocidade média.

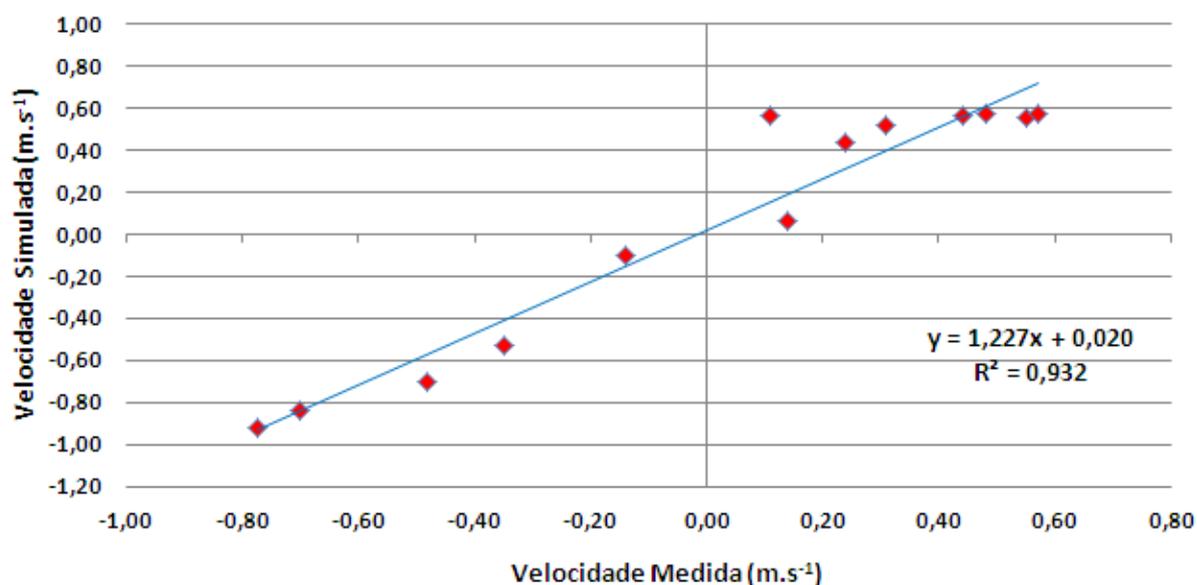


Figura 29 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de velocidades medidas e simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.

A Figura 30 representa o gráfico comparativo das vazões horárias medidas e simuladas no mesmo período para o PA 2.

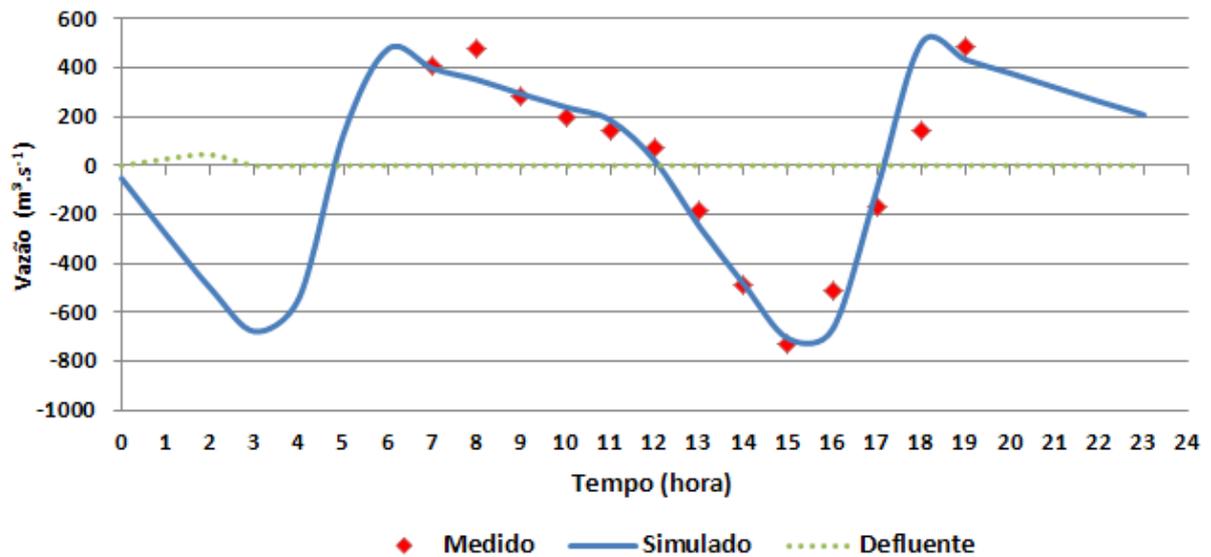


Figura 30 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.

A Figura 31 representa a tendência linear existente entre os valores apresentados. Os resultados das análises estatísticas apresentaram a tendência linear de $R^2=0,912$ e o cálculo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe de $R^2=0,900$, indicando também, uma forte representação do modelo para as vazões no PA 2.

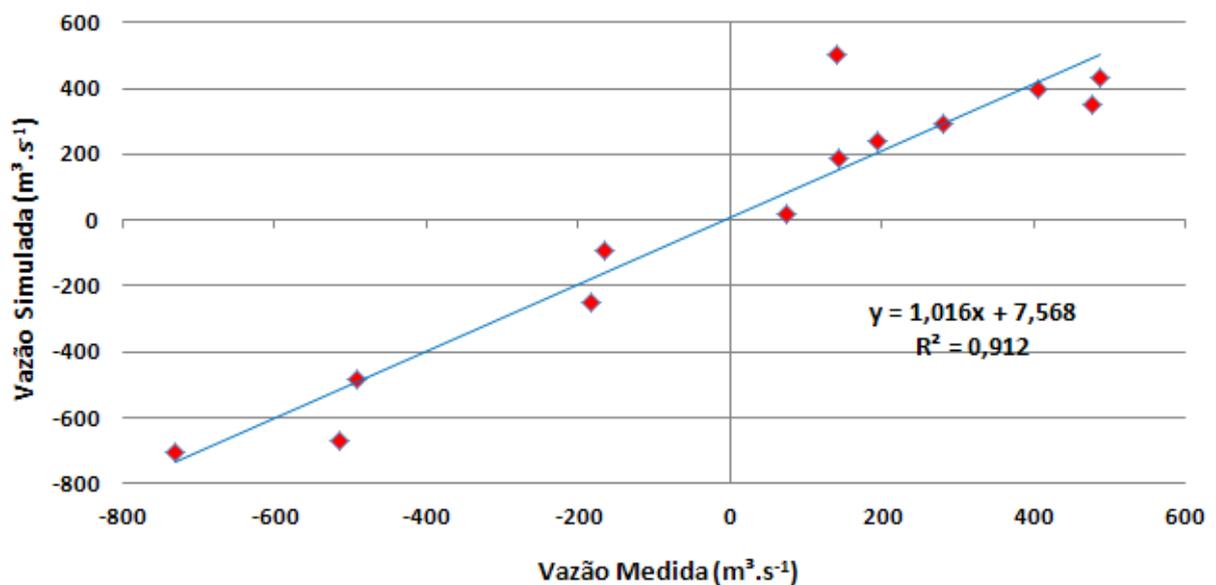


Figura 31 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.

Observou-se que as velocidades máximas registradas também ocorreram durante a meia-maré de enchente, reforçando a característica de estuário influenciado pela forçante de maré, apresentando entrada líquida de sedimento. As velocidades

médias máximas de enchente na coluna d'água, medida e simulada ocorreram às 15h03min, apresentando $-0,77 \text{ m s}^{-1}$ e $-0,92 \text{ m s}^{-1}$ com vazões de $-732 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $-707 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. E velocidade média máximo de vazante medido e simulado na coluna d'água ocorreu por volta das 8h, ambas, apresentando $0,57 \text{ m s}^{-1}$ e vazões com magnitude de $479 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $351 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente (ver tabela 9).

4.4.2.3 PONTO AMOSTRAL 3 (PA 3)

A Figura 32 representa o gráfico comparativo de nível d'água previsto para a estação maregráfica 143-Najé (FEMAR) e os resultados simulados para o nó 5493 que representa o PA 3 no domínio da modelagem. Para a realização da previsão do nível d'água em Najé, será utilizado o módulo de previsão de maré do SisBaHiA, porque na 5ª campanha de monitoramento não foi realizado a medição de nível d'água em Najé.

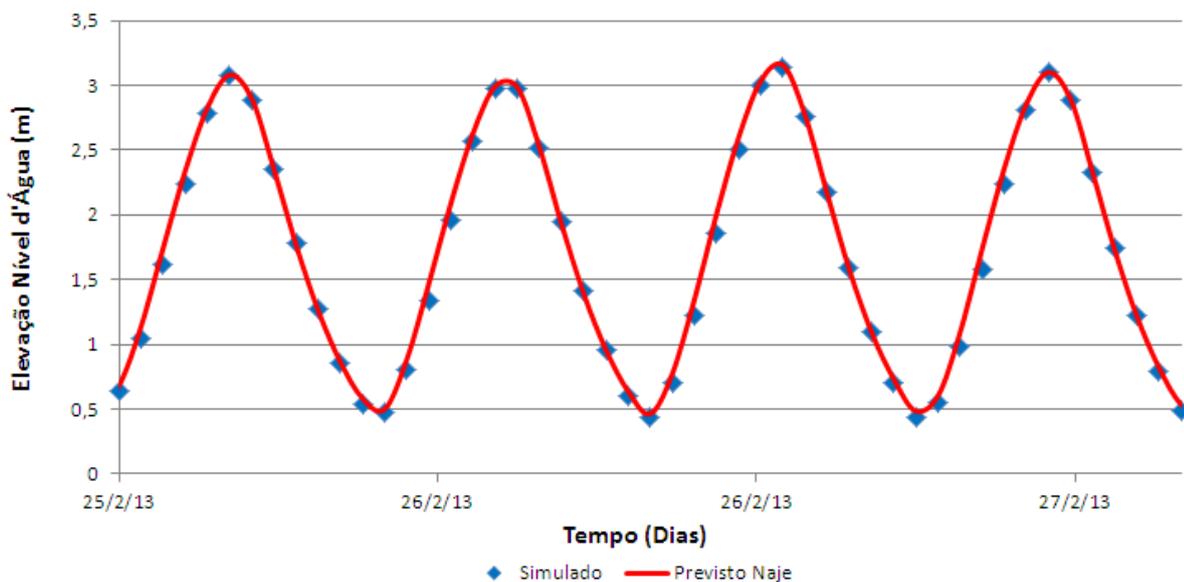


Figura 32 - Variações de nível d'água previsto em Najé e simulado para o PA 3.

A Figura 33 representa o resultado da análise estatística de tendência linear dos valores previstos e simulados do nível d'água para Najé que foi de $R^2=0,997$. E o resultado da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,994$ indicando a existência de forte eficiência do modelo na representação do fenômeno envolvido.

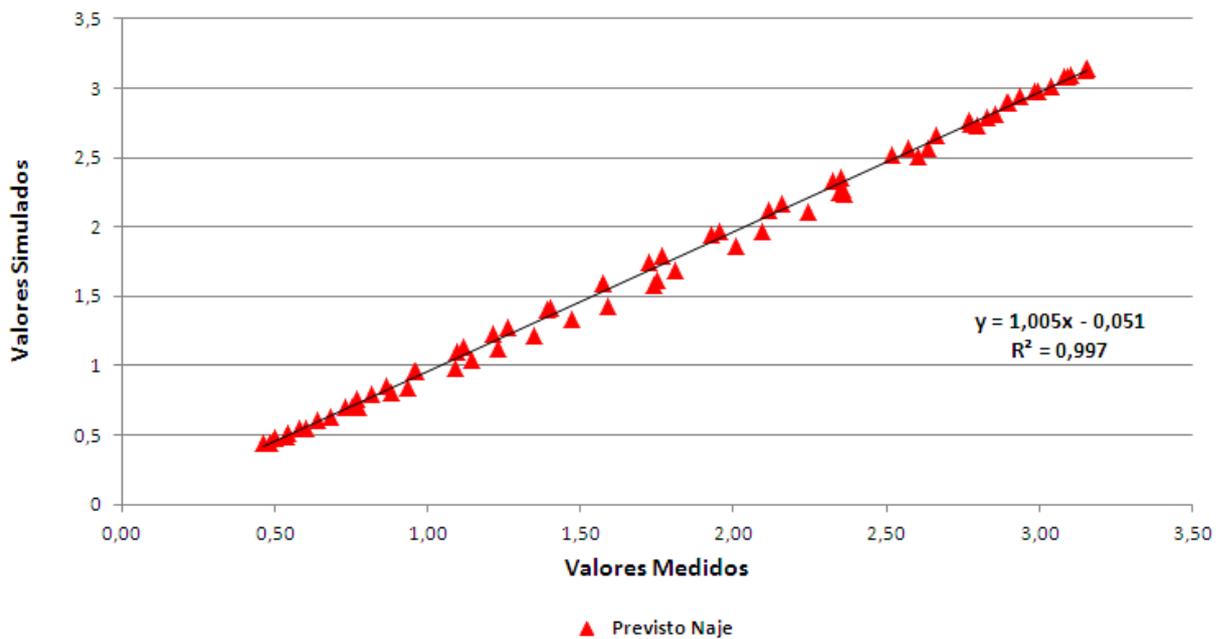


Figura 33 - Análise estatística entre os dados de nível d'água previsto em Najé e simulado no PA 3.

As séries de dados do monitoramento de corrente no PA 3 foram realizadas no dia 27/02/2013, iniciado às 6h e encerrando às 19h18min. A Tabela 10 representa as séries temporais horária dos dados de velocidade média na coluna d'água e vazão observadas e simuladas no PA 3.

Tabela 10 - Dados de velocidades médias e vazões medidas e simuladas no PA 3 em 27/02/2013
Continua

Hora	Velocidade Medida ($m s^{-1}$)	Velocidade Simulada ($m s^{-1}$)	Vazão Medida ($m^3 s^{-1}$)	Vazão Simulada ($m^3 s^{-1}$)	Vazão Defluente informada pela VOTORANTIM ($m^3 s^{-1}$)
0	-	-0,14	-	-128	0
1	-	-0,42	-	-618	0
2	-	-0,64	-	-1075	0
3	-	-0,68	-	-1334	0
4	-	-0,58	-	-1276	0
5	-	-0,23	-	-569	0
6	-	0,38	-	858	0
7	0,40	0,47	925	983	0
8	0,62	0,47	1135	871	0
9	0,55	0,45	629	739	0
10	0,45	0,38	522	584	0
11	0,35	0,30	347	420	0
12	0,23	-0,03	233	5	0
13	-0,38	-0,35	-333	-491	0
14	-0,57	-0,61	-763	-991	0

Hora	Velocidade Medida (m s^{-1})	Velocidade Simulada (m s^{-1})	Vazão Medida ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Vazão Simulada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Conclusão
					Vazão Defluente informada pela VOTORANTIM ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
15	-0,81	-0,70	-1251	-1380	0
16	-0,69	-0,64	-1068	-1324	0
17	-0,33	-0,37	-740	-882	0
18	-0,03	0,25	-57	526	0
19	0,39	0,48	934	1049	0
20	-	0,48	-	934	0
21	-	0,47	-	811	27,60
22	-	0,43	-	668	44,22
23	-	0,34	-	490	0

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 34 representa o gráfico das velocidades médias da coluna d'água medidas e simuladas no PA 3.

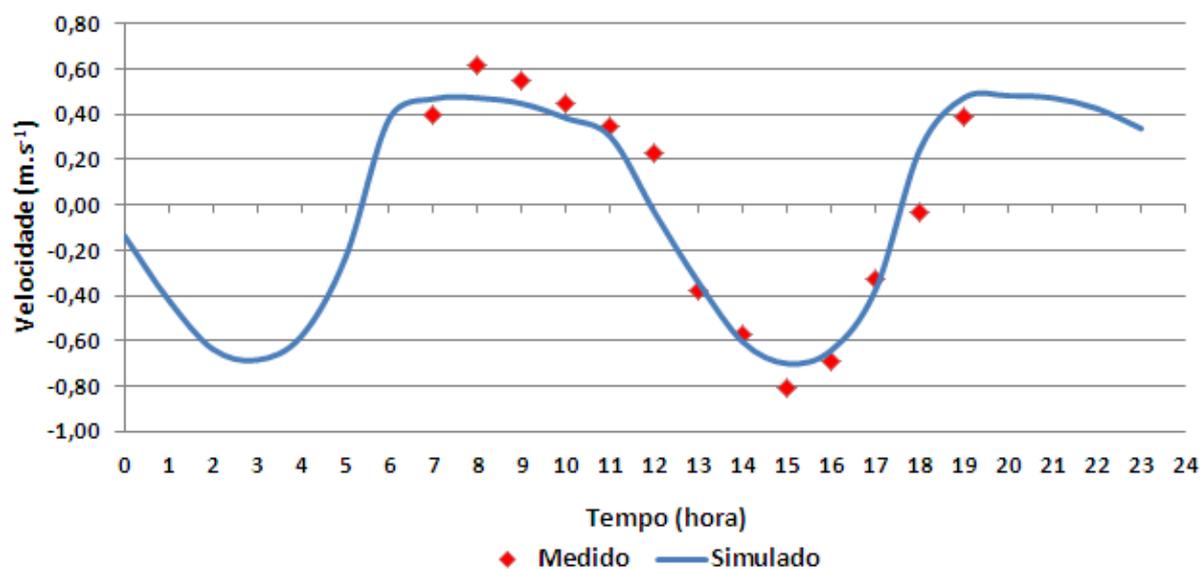


Figura 34 - Velocidades medidas comparada com as velocidades simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.

A Figura 35 representa o resultado da análise estatística de tendência linear entre os dados com $R^2 = 0,931$. E o resultado da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,919$ indicando a existência satisfatória de correlação estatística entre os dados de velocidade média da coluna d'água apresentados.

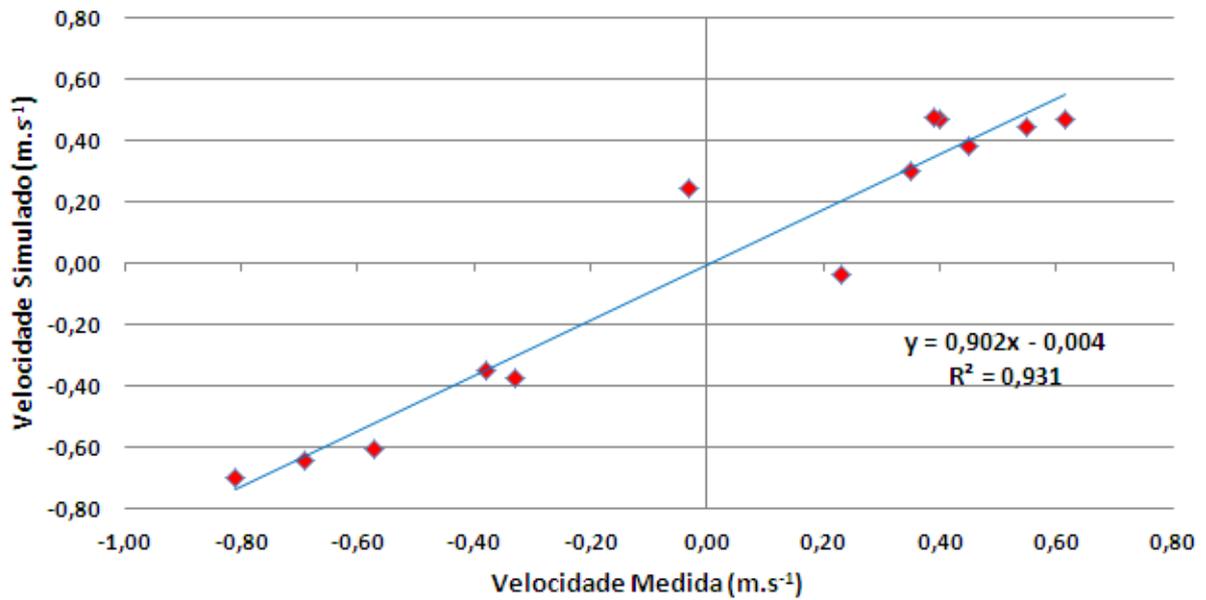


Figura 35 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.

A Figura 36 representa o gráfico das vazões horárias medidas e simuladas no PA 3.

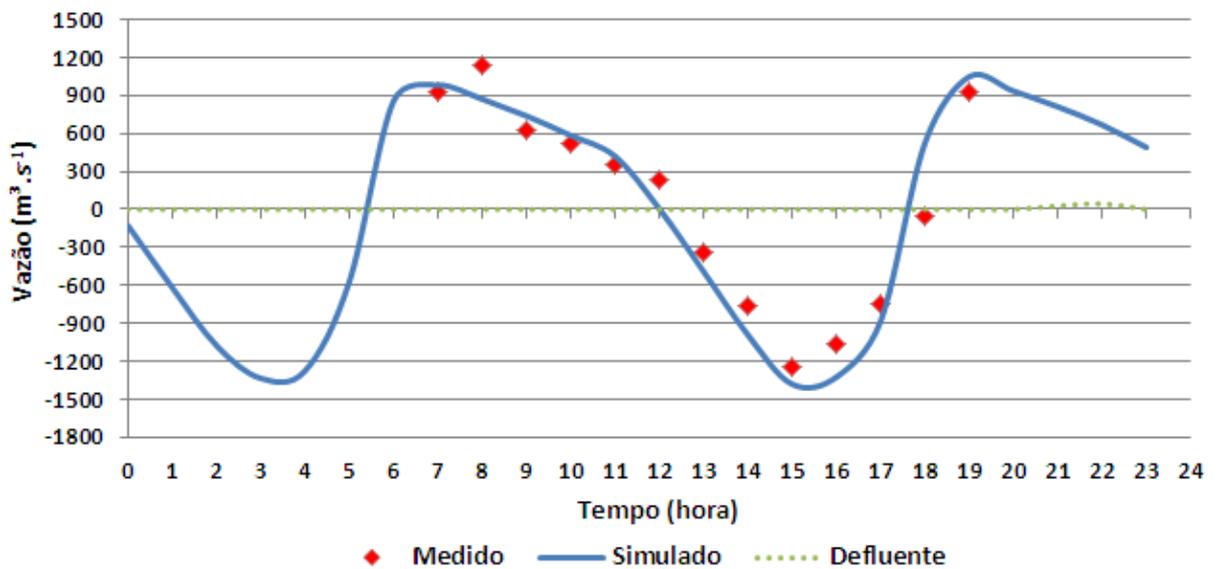


Figura 36 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.

A Figura 37 representa o resultado estatístico de tendência linear que foi $R^2 = 0,938$. E o resultado da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2 = 0,910$ indicando uma forte representação do modelo aos fenômenos envolvidos na modelagem.

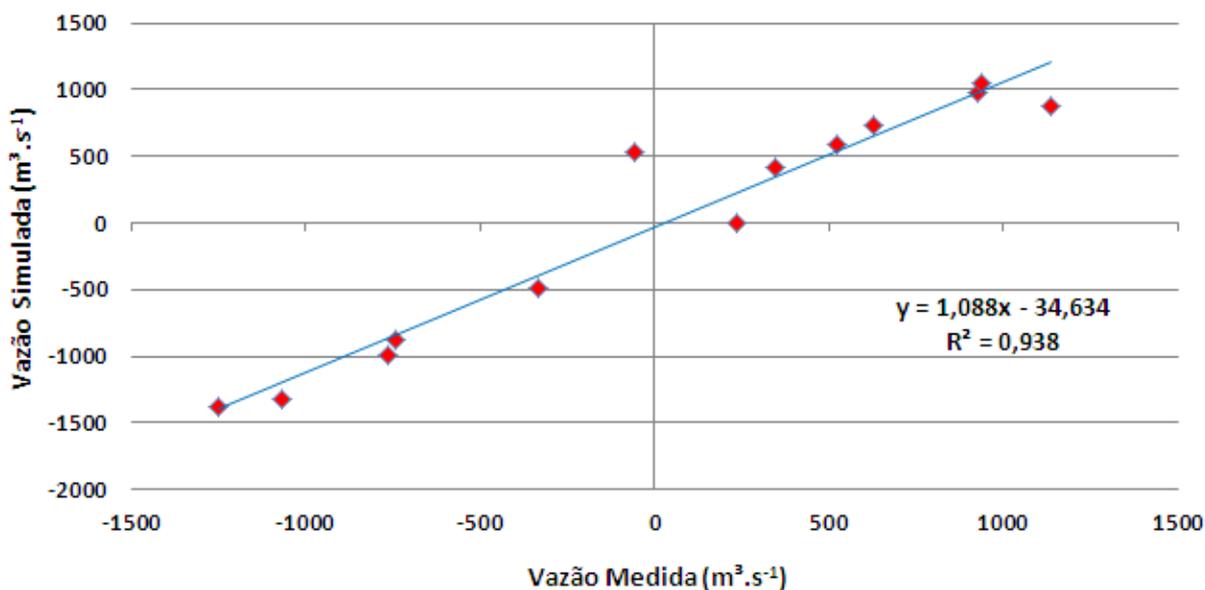


Figura 37 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.

Observou-se que as vazões máximas registradas ocorreram também, durante a meia-maré enchente, corroborando para a inferência do domínio da forçante de maré com penetração líquida do sedimento no trecho. As velocidades médias máximas medidas e simuladas na enchente ocorreram às 15h19min, apresentando -0,81 e -0,70 e vazões com magnitude de $-1.251 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $-1380 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. E a velocidade média máxima medidas e simuladas durante a maré vazante ocorreram por volta das 08h05min, apresentando $0,62 \text{ m s}^{-1}$ e $0,67 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. As vazões apresentaram magnitude de $1.135 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $871 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

4.4.3 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DO MODELO DE QUALIDADE DA ÁGUA

Os resultados da calibração do modelo de qualidade da água para o transporte e a dispersão dos sais na região são apresentados através de gráficos e tabelas contendo os dados observados e simulados no SisBaHiA para os pontos amostrais localizados no baixo curso do rio Paraguaçu à baía do Iguape.

4.4.3.1 PONTO AMOSTRAL 1 (PA 1)

O monitoramento dos parâmetros de qualidade da água como a salinidade, temperatura e turbidez relativa para o PA 1 foi realizado no dia 25/02/2013 sob mesmas condições, duração e período realizado no monitoramento de correntes.

A Figura 38 representa as variações médias verticais da salinidade (‰), temperatura (°C) e turbidez relativa (NTU), onde pode ser observada uniformidade nos dados de temperatura em torno de 30°C. A salinidade variando entre 5‰ e 11‰, registrando valor médio próximo de 6‰ na superfície e 10‰ no fundo da coluna d'água. A concentração média de sólidos em suspensão na água, indicada através da relação de turbidez, apresentou maior variação ao longo da coluna d'água com diferenças entre 15 NTU na superfície e 26 NTU no fundo. No eixo da abscissa corresponde à profundidade adimensional (h/H), onde h representa a profundidade no instante monitorado e H é a profundidade máxima observada durante o ciclo de maré. E o eixo da ordenada corresponde aos valores dos parâmetros observados. As barras azuis representam o desvio padrão dos valores dos parâmetros observados.

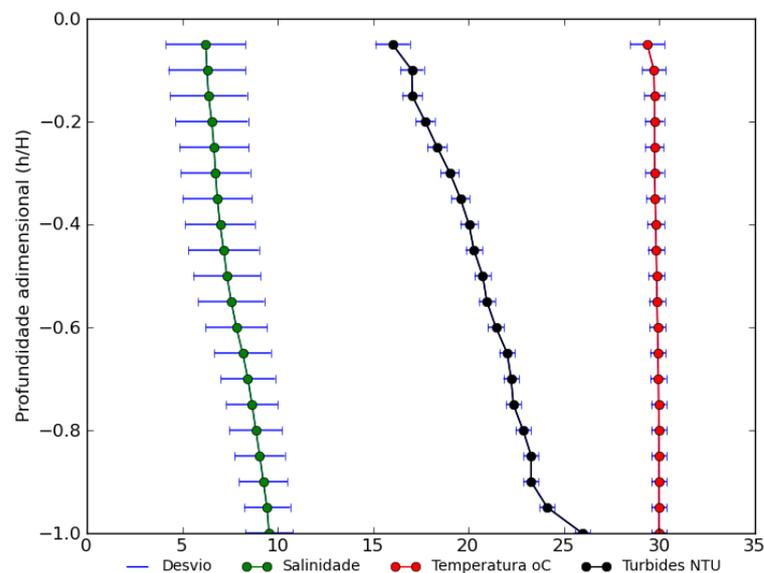


Figura 38 - Variação vertical média da salinidade, temperatura e turbidez na coluna d'água no PA 1 (INEMA/UFBA, 2013a).

Os resultados demonstraram que durante o período de maré vazante, no sentido estuário abaixo, a salinidade apresentou uma moderada estratificação vertical na coluna d'água, registrando valores próximos de 4‰ na superfície e 10‰ no fundo.

Na baixa-mar, por volta das 12h, a coluna d'água apresentou os valores mais baixos de salinidade (3,7‰), com aumento progressivo nos horários subseqüentes de maré enchente chegando próximo a 10‰ às 17h30min, porém, não apresentou estratificação vertical relevante no PA 1 (Figura 39).

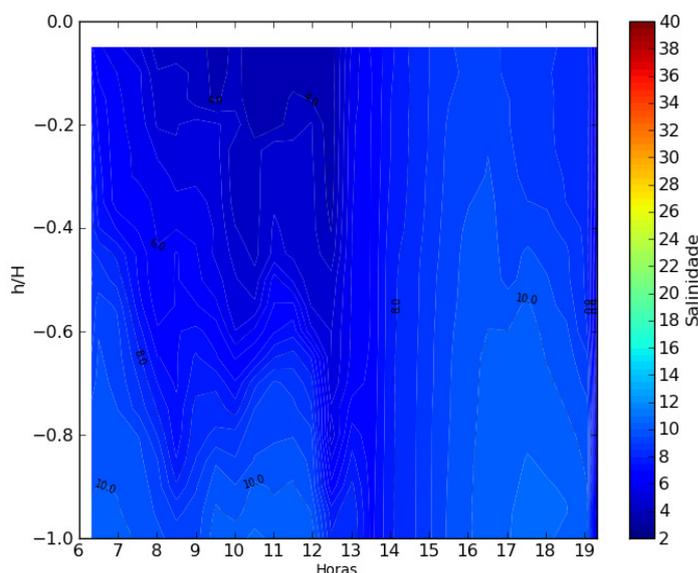


Figura 39 - Variação vertical horária da salinidade na coluna d'água no PA 1 (INEMA/UFBA, 2013a).

Os dados de temperatura apresentaram uniformidade vertical ao longo da coluna d'água em todo o período de monitoramento, ressaltando apenas, o aumento da temperatura da água no período da tarde. Os dados de turbidez relativa, também, apresentaram pouca variação vertical, verificando apenas, variação temporal significativa no instante inicial da maré enchente por volta das 13h, que é indicativo do aumento de materiais particulados ou dissolvidos, sendo careados no sentido estuário acima.

Os dados medidos e simulados apresentados na Tabela 11 são referentes ao valor médio de salinidade (‰) na coluna d'água em um determinado instante no PA 1.

Tabela 11 - Dados medidos e simulados de salinidade (‰) horária para o PA 1 no dia 25/02/2013 Continua

Horário	Medido	Simulado
06:19	7,93	8,49
06:58	6,14	6,03
08:01	4,93	4,36
09:00	4,22	2,89
10:01	4,09	2,05

Horário	Medido	Conclusão
		Simulado
11:01	3,73	1,63
11:58	3,77	1,40
13:01	5,84	1,51
14:02	7,53	3,08
15:02	8,57	5,57
16:02	9,20	9,27
17:02	9,20	11,74
18:02	8,69	10,26
19:04	8,21	7,36

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 40 representa a salinidade média da coluna d'água apresentadas na Tabela 11 para o PA 1 no dia 25/02/2013.

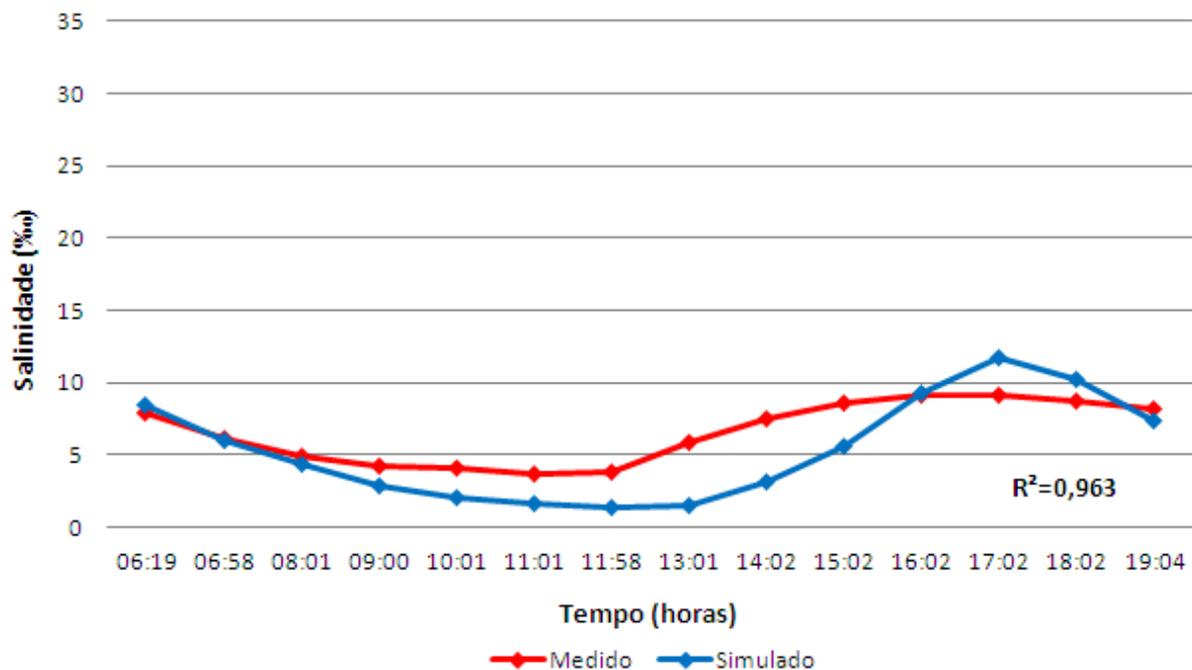


Figura 40 – Salinidade média observadas e simuladas no PA 1 para o dia 25/02/2013.

A análise estatística dos dados apresentados foi através da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, que apresentou $R^2=0,963$ e uma correlação de Pearson de $R=0,852$. Os resultados estatísticos indicam que o modelo está representando bem o transporte e a dispersão dos sais no PA 1, estando acima da margem de erro aceitável para os dados de qualidade de água (ROSMAN *et al.*, 2013) .

A Figura 41 representa o resultado da simulação de salinidade no SisBaHiA no dia 25/02/2013 as 12h, no instante que a coluna d'água atingiu a baixa-mar e antecedeu

a situação de estofa de vazante. A legenda de cores localizada ao lado, indica a salinidade em parte por mil (‰).

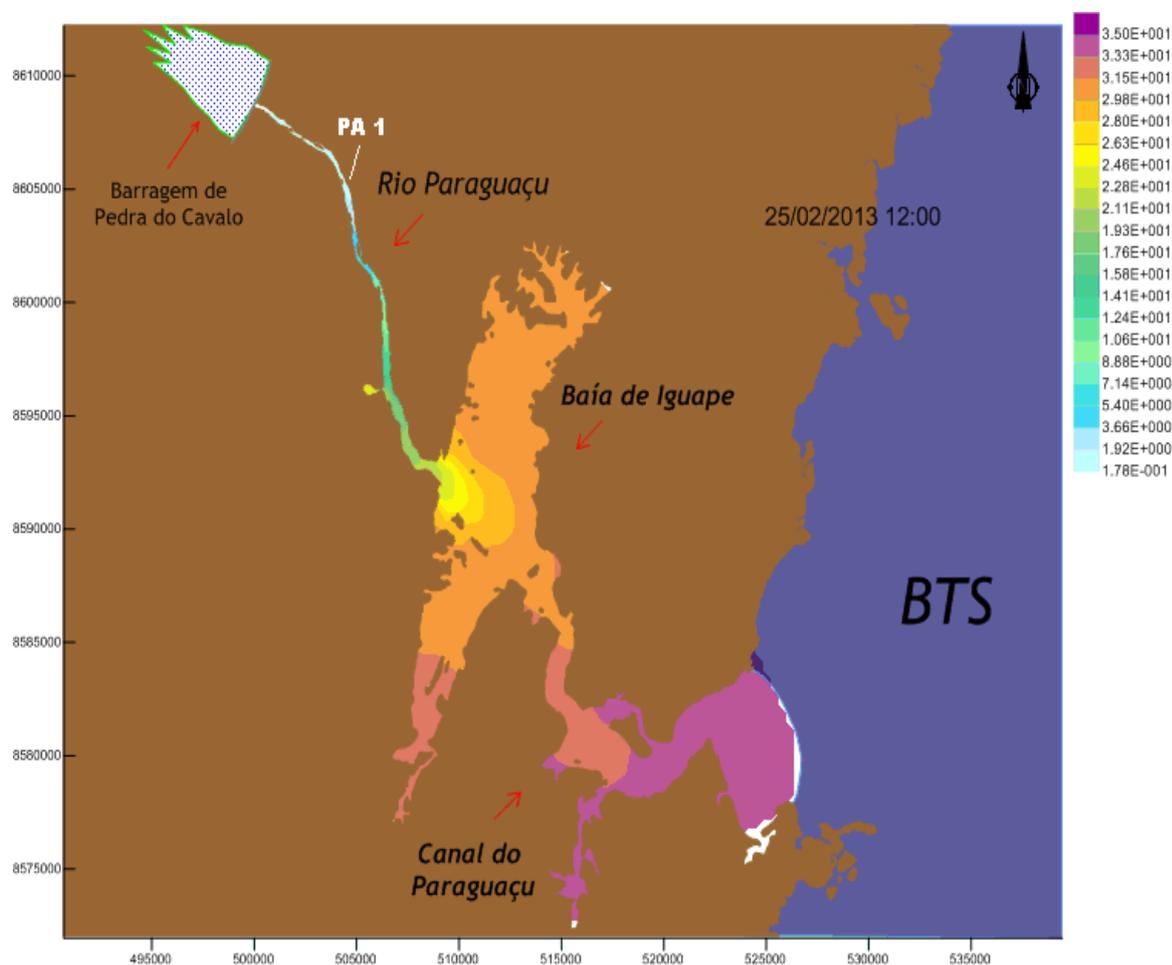


Figura 41 – Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 12h (Baixa-mar).

A Figura 42 representa o resultado da simulação no PA 1 no horário das 18h para o dia 25/02/2013, no instante que a coluna d'água atingiu a preamar e antecedeu a situação de estofa de enchente.

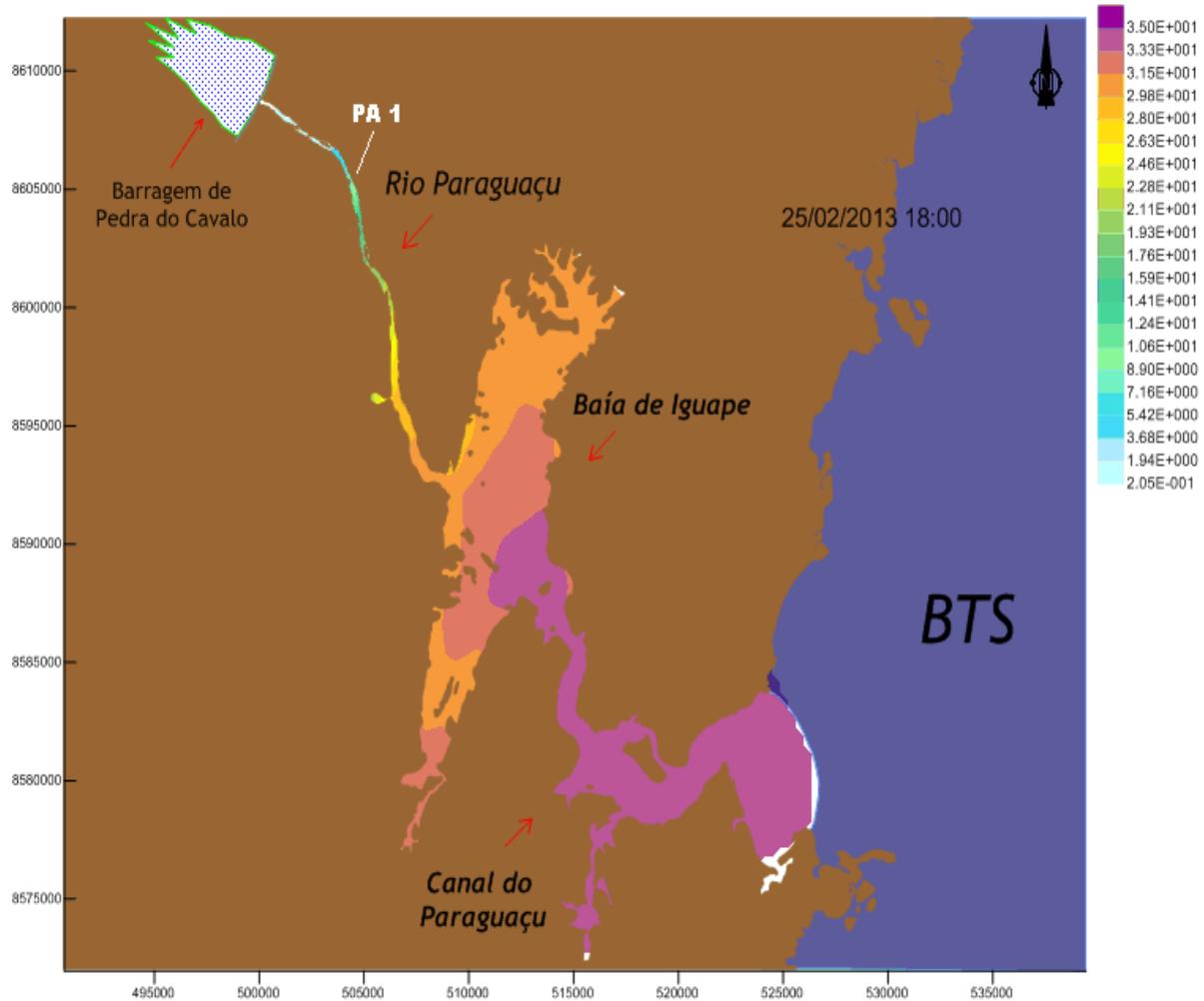


Figura 42 - Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 18h (Preamar).

Os resultados do monitoramento apresentaram-se relativamente uniforme em toda a coluna d'água, ocorrendo apenas, moderada estratificação vertical entre os horários de 8h e 11h na maré vazante, mantendo-se uniforme no início da maré enchente. A classificação deste ponto, de acordo com a salinidade, é parcialmente misturado (DYER, 1997), apresentando valores característicos de ambiente mesohalino (VENICE, 1958).

4.4.3.2 PONTO AMOSTRAL 2 (PA 2)

O monitoramento dos parâmetros de qualidade da água no PA 2 foi realizado no mesmo dia, condições e situações do monitoramento de correntes.

A Figura 43 representa as variações verticais média na coluna d'água de salinidade (‰), temperatura (°C) e turbidez relativa (NTU). Observa-se também,

homogeneidade nos valores médios de temperatura (próximo a 30°C) ao longo da coluna d'água. A salinidade média foi próxima de 14‰, com estratificação vertical quase nula. A turbidez apresentou pouca variação entre a superfície e fundo da coluna d'água com resultados entre 17 NTU na superfície e 21 NTU no fundo.

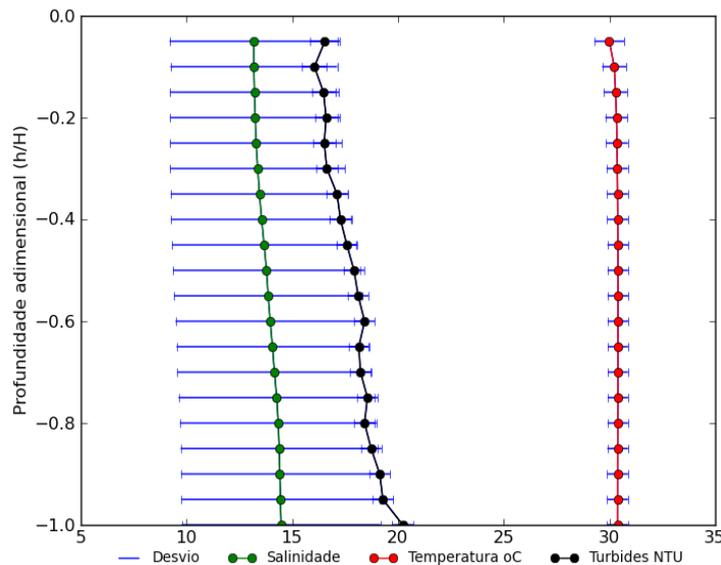


Figura 43 - Variação vertical média da salinidade, temperatura e turbidez ao longo da coluna d'água para o PA 2 no dia 26/02/2013 (INEMA/UFBA, 2013a).

Observa-se no PA 2 que a salinidade, praticamente, não apresentou estratificação vertical na coluna d'água durante o monitoramento. No período de baixa-mar, por volta das 13h, a coluna d'água apresentou os valores mais baixos de salinidade em torno de 8,5‰ e no período subsequente de maré, ocorreu o aumento progressivo da salinidade, chegando ao valor máximo de 20,4‰ por volta das 17 hs, próximo da preamar (Figura 44).

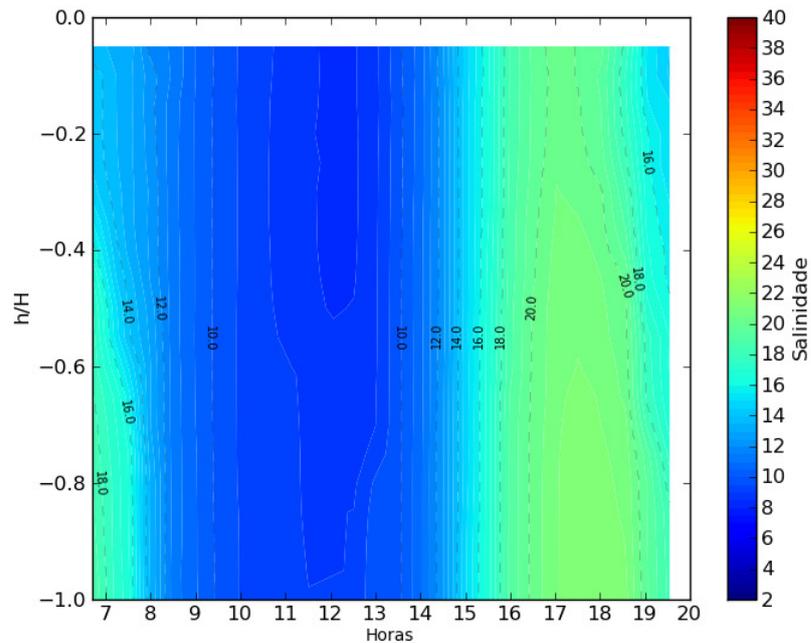


Figura 44 - Variação vertical horária da salinidade ao longo da coluna d'água para o PA 2 no dia 26/02/2013 (INEMA/UFBA, 2013a).

Vale ressaltar, que os valores de salinidade observadas no PA 2 sofreram considerável alteração, comparando-se com os dados apresentados no PA 1, demonstrando que nesse trecho de rio, ocorre alta variabilidade nas concentrações dos sais durante o ciclo de maré semidiurna. Os valores registrados foram entre 10‰ e 20‰ em toda a coluna d'água, corroborando para a inferência de que o PA 2 esta localização na região de forte mistura das águas no estuário.

Os dados de temperatura demonstraram estratificação vertical e temporal da coluna d'água quase nula, ressaltando apenas, a maior temperatura ocorreu à tarde, registradas 31 °C. Para os dados de turbidez, evidenciou-se pouca variação vertical, porém uma significativa variação dos valores durante o período subsequente ao início da maré enchente, por volta das 13:00 h.

Os dados medidos e simulados apresentados na Tabela 12 são referentes ao valor médio de salinidade (‰) na coluna d'água em um determinado instante no PA 2.

Tabela 12 - Dados medidos e simulados de salinidade horária para o PA 2 no dia 26/02/2013

Horário	Medido	Simulado
07:14	13,78	19,96
07:59	12,45	17,79
09:01	10,45	14,40
09:59	9,45	11,70
11:14	8,74	9,75
12:04	8,34	8,21
13:00	8,85	7,69
14:00	10,76	10,33
15:01	14,82	15,59
16:00	18,60	19,58
17:02	20,46	22,13
18:02	20,15	22,73
19:03	16,37	20,90

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 45 representa a salinidade média apresentadas na Tabela 12 para o PA 2 no dia 26/02/2013.

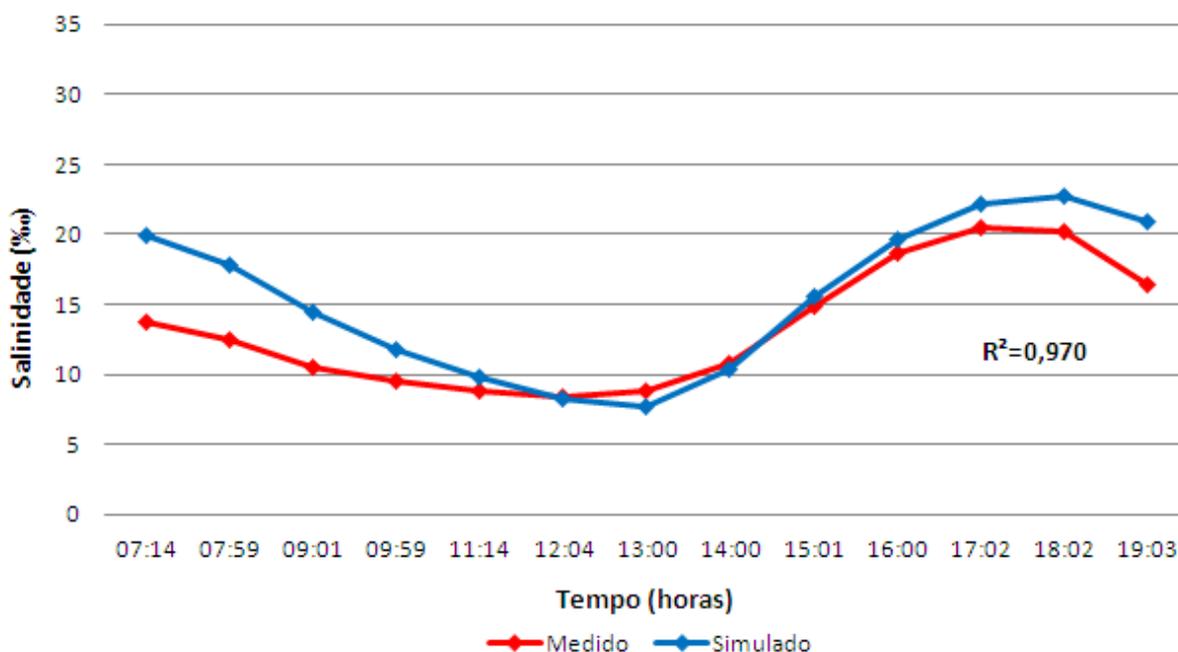


Figura 45 – Salinidade média observadas e simuladas no PA 2 para o dia 26/02/2013.

A análise estatística dos dados apresentados foi através da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe com $R^2=0,970$ e a correlação de Pearson com $R=0,913$ indicando que o modelo também está representando bem o transporte e a dispersão dos sais para o PA 2.

A Figura 46 representa o resultado da simulação da salinidade pelo SisBaHiA no dia 26/02/2013 as 12h, no instante que a coluna d'água atingiu a baixa-mar e antecedeu a situação de estofamento de vazante.

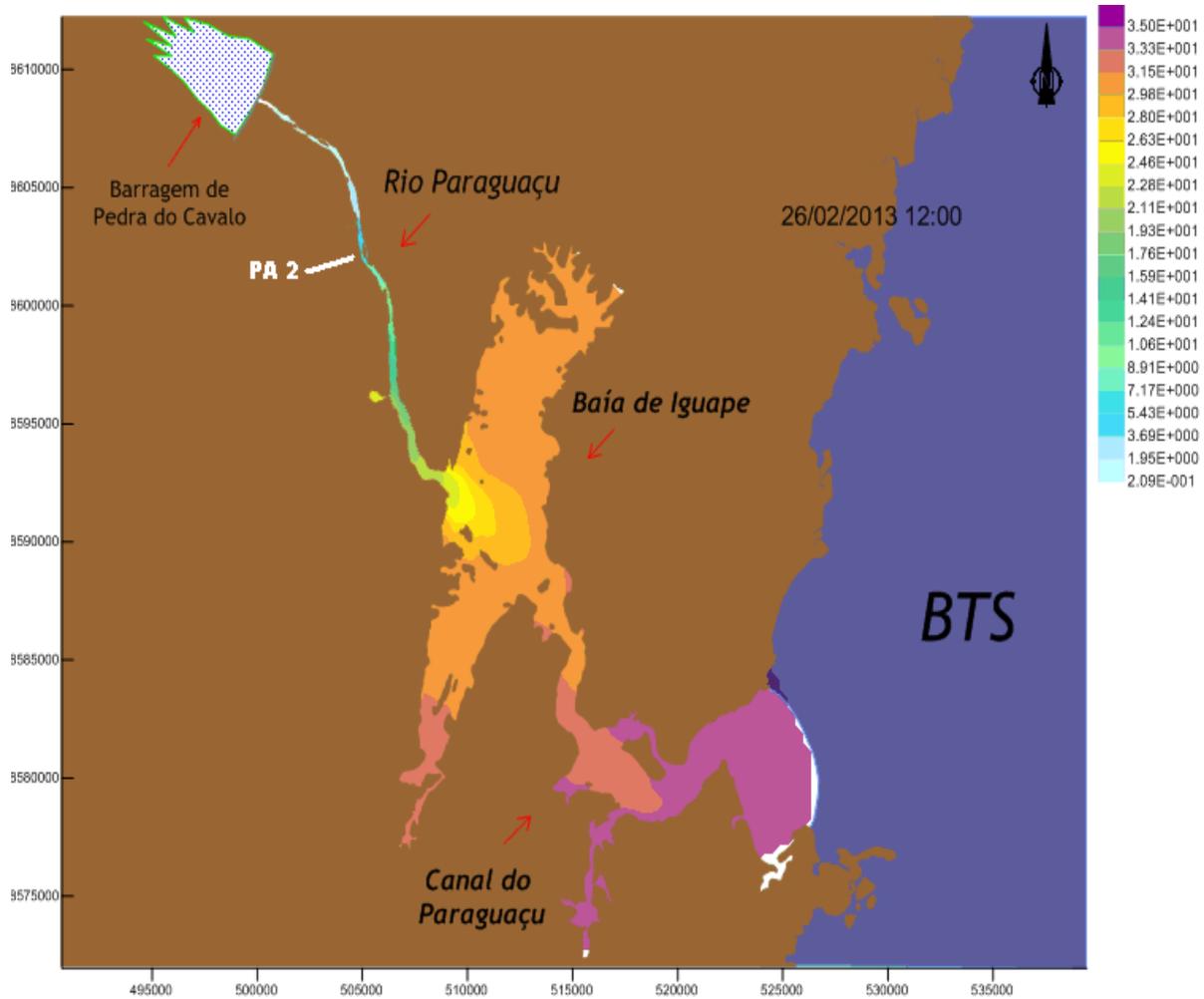


Figura 46 – Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 12h (Baixa-mar).

E a Figura 47 representa o resultado da simulação para o PA 2 no horário das 18h e no dia 26/02/2013, no instante que a coluna d'água atingiu a preamar e antecedeu a situação de estofamento de enchente.

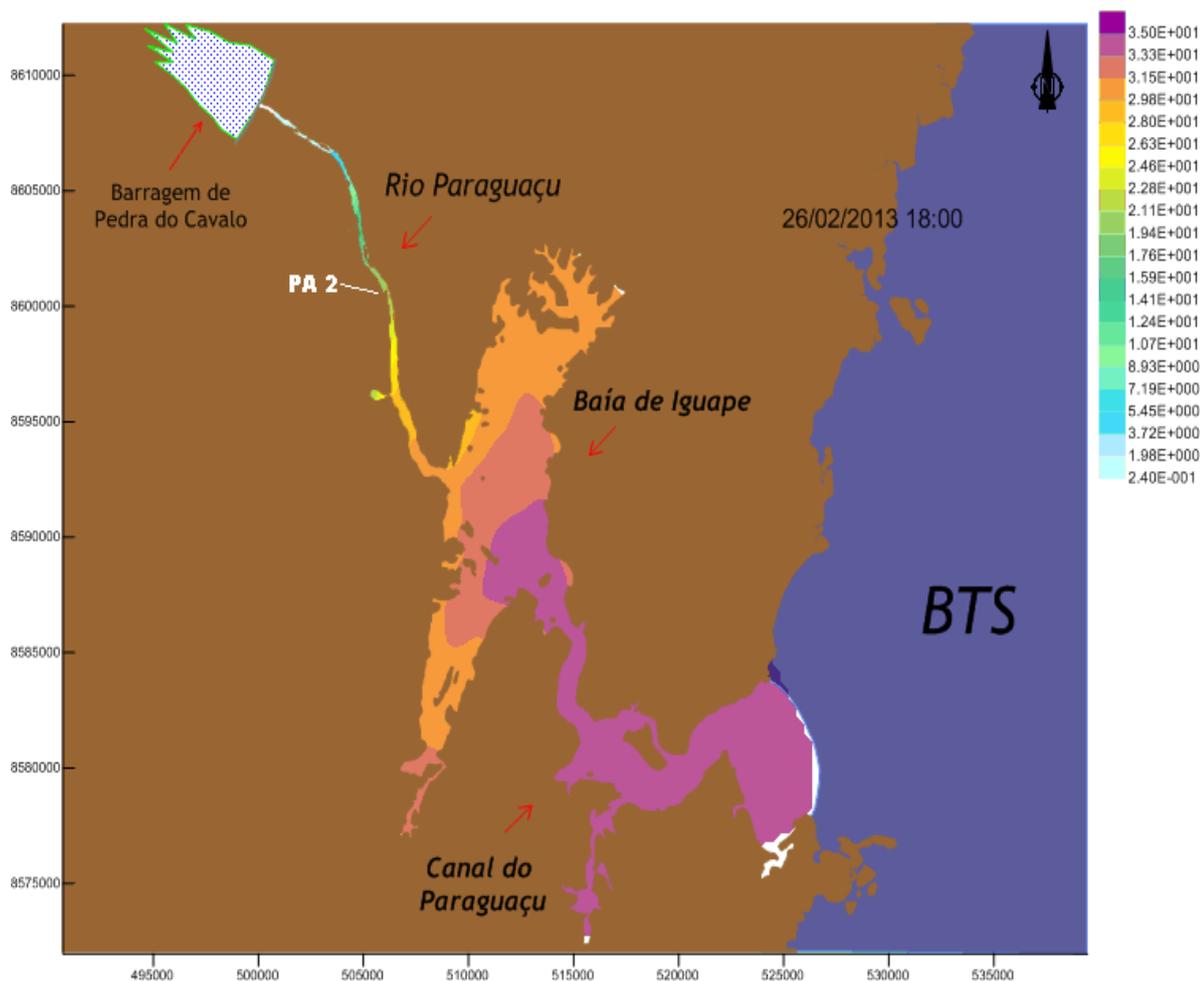


Figura 47 – Resultado da simulação da salinidade (%) pelo SisBaHiA às 18h (Preamar).

Os resultados observados no PA 2 demonstraram uniformidade temporal ao longo da coluna d'água, possibilitando a classificação deste ponto, quanto a salinidade, como misturado (DYER, 1997), apresentando valores característicos de ambiente mixohalino, predominando o tipo mesohalino, mas em determinados instantes apresentou valores característicos de ambiente polyhalino (VENICE, 1958). Observa-se que, neste ponto, a influência da forçante de maré é maior, razão que, registrou-se o aumento significativo da salinidade nas águas.

4.4.3.3 PONTO AMOSTRAL 3 (PA 3)

O monitoramento dos parâmetros de qualidade da água no PA 3 foi realizado no mesmo dia, condições e situações do monitoramento de correntes.

A Figura 48 representa as variações verticais média na coluna d'água da salinidade (‰), temperatura (°C) e turbidez relativa (NTU). Observou-se também, a homogeneidade nos valores médios de temperatura (próximo de 31 °C). A salinidade média foi próxima de 30‰, com estratificação vertical quase nula, ressaltando um aumento significativo nos valores de salinidade, comparadas com os valores obtidos nos PA's 1 e 2. As concentrações médias de sólidos em suspensão e dissolvidas na água apresentaram variação significativa ao longo da coluna d'água com diferenças entre 19 NTU na superfície e de 27 NTU no fundo.

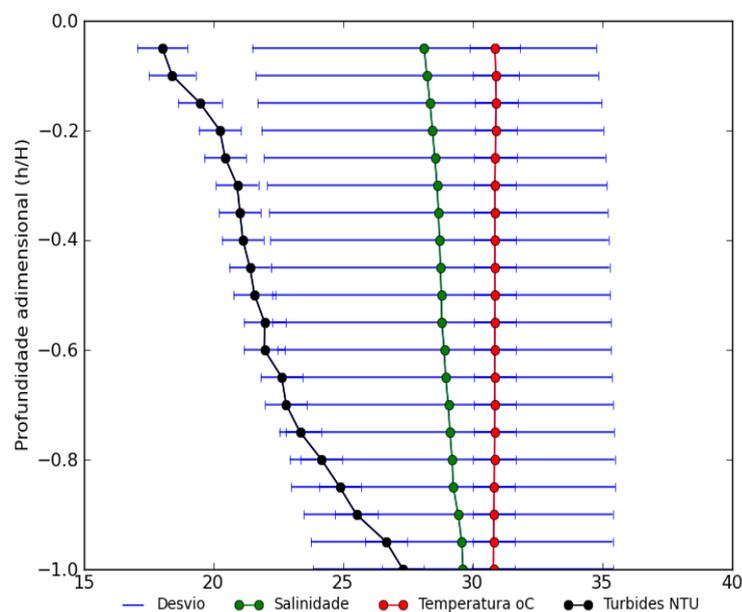


Figura 48 - Variação vertical média da salinidade, temperatura e turbidez ao longo da coluna d'água na seção do PA 3 (INEMA/UFBA, 2013a).

Observou-se no PA 3 que a salinidade não apresentou estratificação vertical na coluna d'água, apresentou apenas, variações nos valores ao longo do ciclo de maré semidiurna. No período de baixa-mar por volta das 12:00 h a coluna d'água apresentou os valores mais baixos de salinidade em torno de 18‰ e no período subsequente de maré, ocorreu o aumento progressivo da salinidade, chegando ao valor máximo de 35‰ por volta das 17:00 h, próximo da preamar (Figura 49).

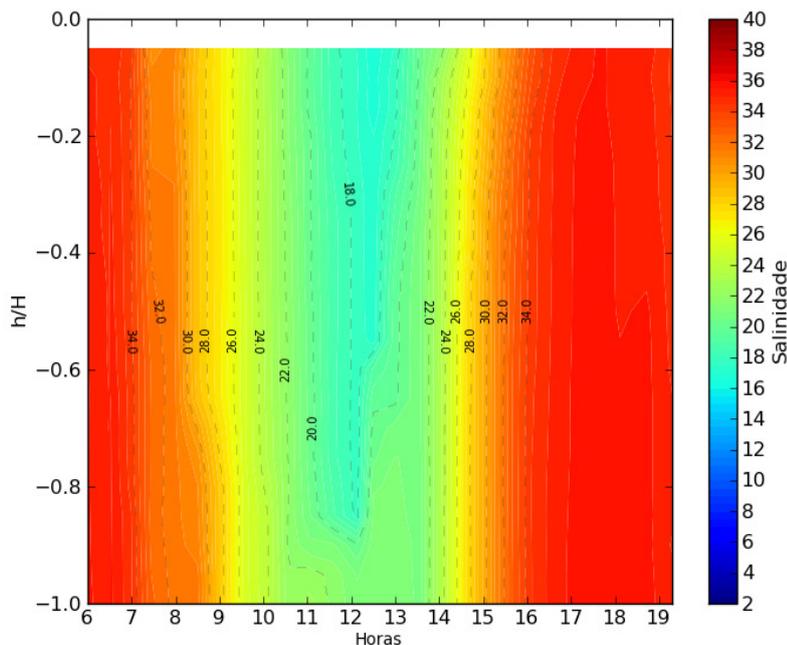


Figura 49 - Variação vertical horária da salinidade durante um ciclo completo de maré (13 horas) em regime de sizígia, ao longo da coluna d'água na seção PA 3 (INEMA/UFBA, 2013a).

Através dos dados apresentados na Figura 49, observou-se a total influência do ciclo de maré na variabilidade dos valores de salinidade no PA 3, possibilitando inferir que atualmente, a região está sob domínio da forçante de maré e este padrão de circulação é responsável pela caracterização ambiental em função da salinidade.

Os valores observados para a temperatura não variaram ao longo da coluna d'água, ressaltando apenas que a maior temperatura registrada ocorreu no período da tarde por volta das 14h, chegando a 32 °C. Os dados monitorados de turbidez apresentaram pouca estratificação vertical durante a maré vazante, chegando a medir cerca de 40 NTU no fundo e 20 NTU na superfície às 8:00 h. Durante o período de maré enchente, por volta das 13h, a coluna d'água praticamente não apresentou estratificação vertical, mantendo-se em torno de 30 NTU na superfície e no fundo.

Os dados medidos e simulados apresentados na Tabela 13 são referentes ao valor médio de salinidade (‰) na coluna d'água no PA 3.

Tabela 13 - Dados medidos e simulados de Salinidade (‰) para o PA 3 no dia 27/02/2013

Horário	Medido	Simulado
06:01	35,17	30,40
06:58	34,09	30,04
07:58	31,05	29,17
09:03	26,92	27,31
10:06	23,18	24,75
11:03	19,65	22,54
12:08	17,56	21,18
13:00	17,78	20,87
14:03	22,76	23,11
15:20	29,53	27,51
16:06	33,57	29,35
17:08	35,51	30,16
18:07	35,39	30,50
19:18	34,49	30,27

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 50 é a representação gráfica dos valores de salinidade apresentadas na Tabela 13 para o PA 3 no dia 27/02/2013.

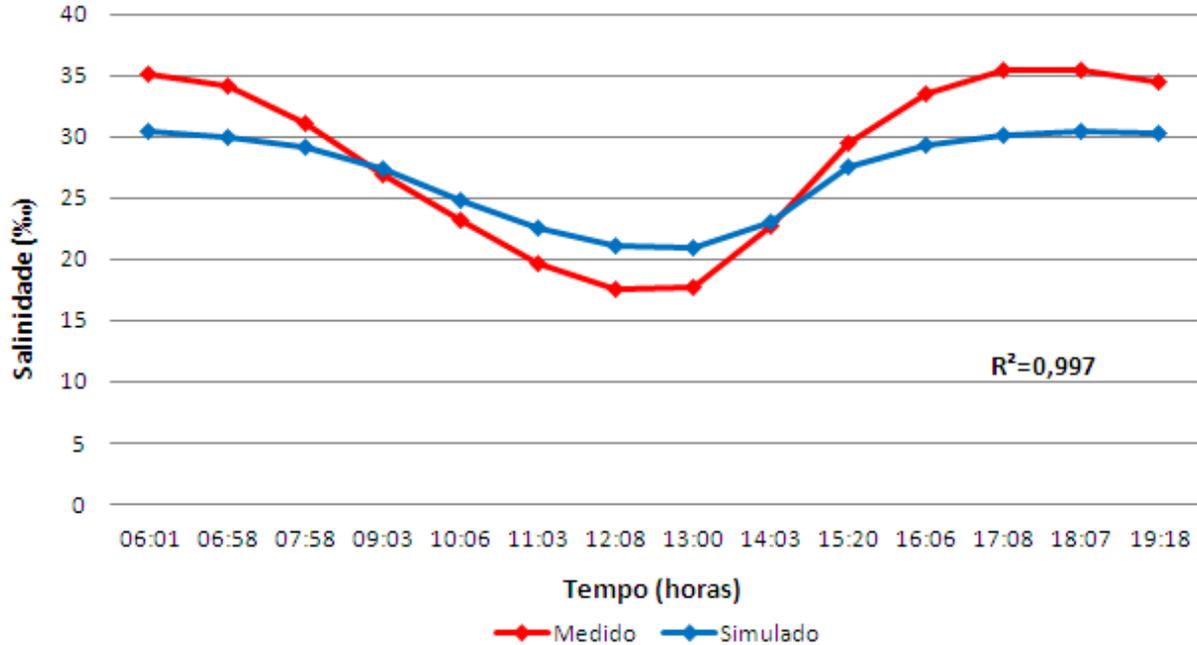


Figura 50 - Salinidade média observadas e simuladas no PA 3 para o dia 27/02/2013.

A análise estatística dos dados apresentados foi através da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe com $R^2=0,997$ e a correlação de Pearson com $R=0,989$ indicando que o modelo está representando muito bem o transporte e a dispersão dos sais para o PA 3.

A Figura 51 representa o resultado da simulação de salinidade pelo SisBaHiA para o PA 3 no horário das 12h no dia 27/02/2013, no momento que a coluna d'água atingiu a baixa-mar e antecedeu a situação do estofa de vazante.

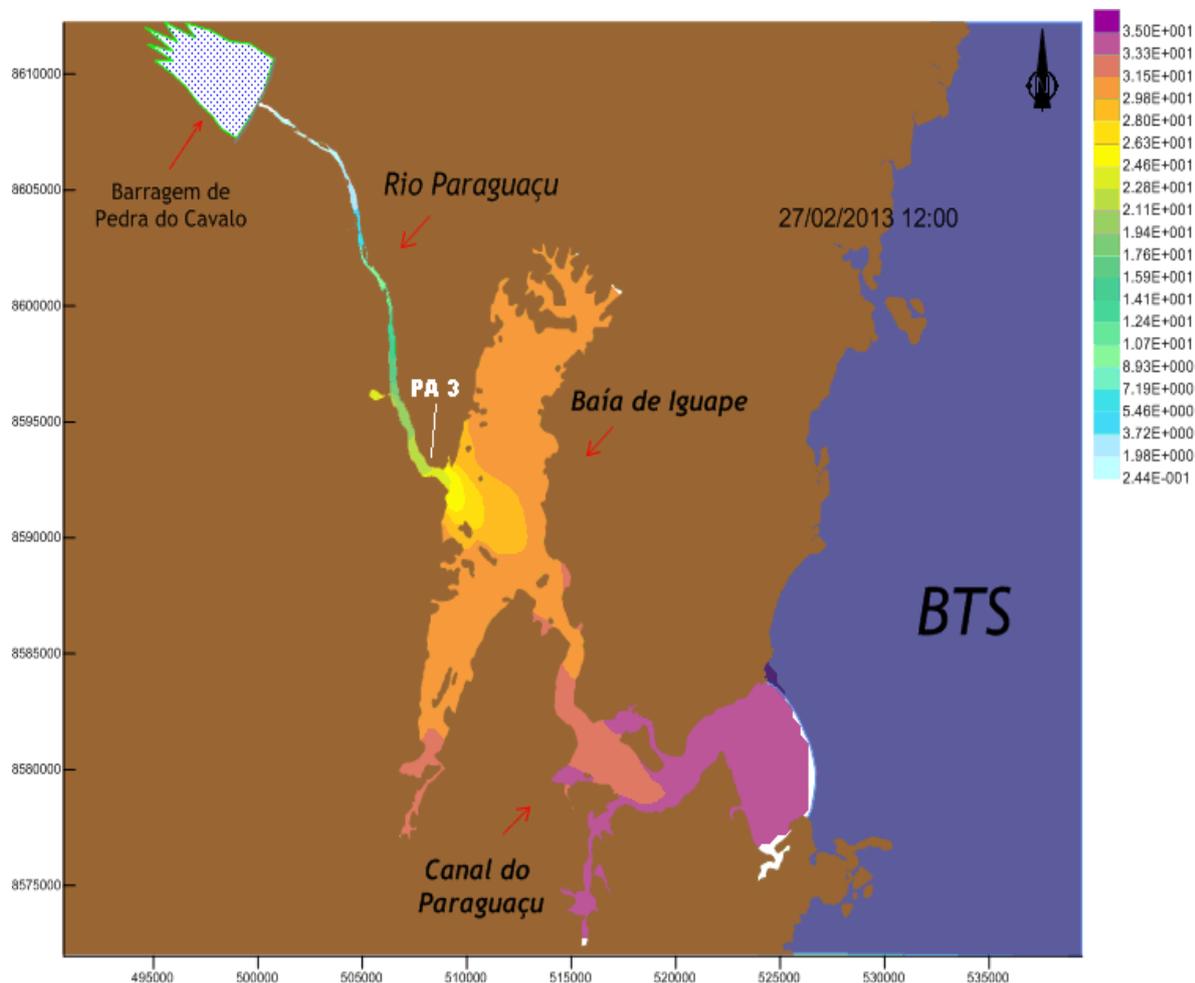


Figura 51 – Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 12h (Baixa-mar).

A Figura 52 representa o resultado da simulação de salinidade pelo SisBaHiA para o PA 3 no horário das 18h no dia 27/02/2013, no instante em que a coluna d'água atingiu a preamar e antecedeu a situação do estofa de enchente.

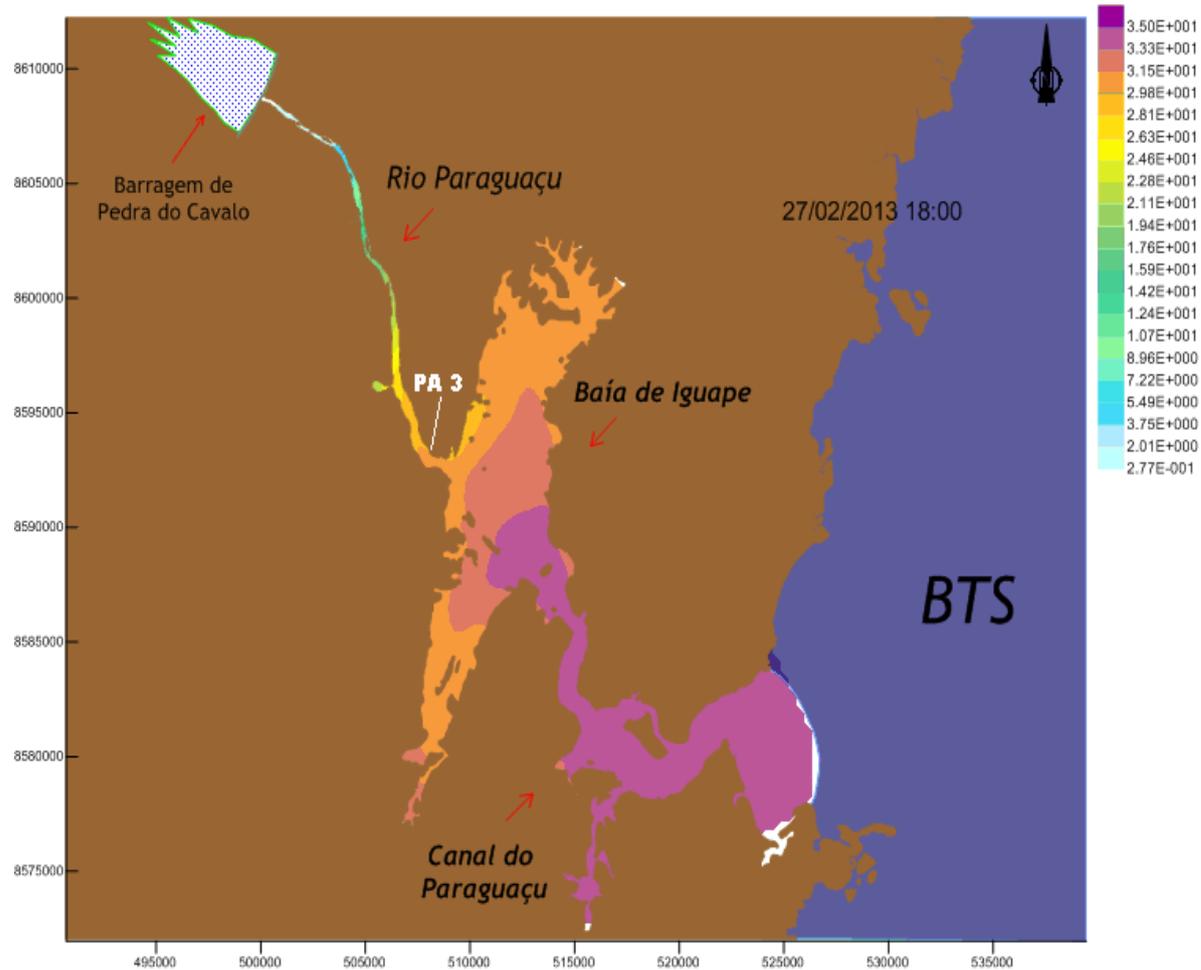


Figura 52 – Resultado da simulação da salinidade (‰) pelo SisBaHiA às 18h (Preamar).

Os resultados médios observados no PA 3, demonstraram uniformidade temporal ao longo da coluna d'água, variando durante o ciclo de maré. A salinidade apresentou valores característicos de águas oceânicas, possibilitando a classificação do ponto como totalmente misturadas (DYER, 1997), com valores característicos de ambiente eurihalino na maioria do período, mas em determinados momentos em razão do ciclo da maré, apresentou valores característicos de ambiente polyhalino (VENICE, 1958). Quanto ao parâmetro de turbidez relativa, o PA 3 apresentou maior estratificação vertical da coluna d'água durante a maré vazante e uniforme durante a maré enchente, predominando a influência da maré.

De modo geral, durante o período de monitoramento da 5ª campanha a isohalina de 5‰ localizou-se entre o PA 1 e o PA 2 na situação de maré vazante, deslocando-se durante a maré enchente para a montante do PA 1, no limite de influência do estuário, evidenciando a penetração da intrusão salina em todo o baixo curso do rio Paraguaçu. Portanto, os dados observados permitem correlacioná-los ao biota

predominante na região, em possuir características eurialinas, em razão da larga faixa de variação de salinidade no ambiente, associado aos relatos das populações ribeirinhas sobre a presença de mariscos no alto estuário.

4.4.4 PROCESSO DE VALIDAÇÃO HIDRODINÂMICA

Após o processo de calibração do modelo hidrodinâmico e de qualidade da água, é necessário validar a modelagem realizando uma nova simulação de outro período de monitoramento que foi realizado na mesma região modelada. O objetivo desse processo é confirmar a eficiência do modelo em representar o fenômeno ambiental da região, submetendo-o a outras situações e condições hidrológicas observadas.

A análise confirmatória da modelagem será através dos mesmos métodos estatísticos utilizados na calibração e o modelo, deve permanecer com as mesmas condições iniciais e de contorno, bem como os parâmetros utilizados na simulação, com exceção apenas, do hidrograma de vazões afluentes ao domínio da modelagem que corresponderá ao período da simulação.

O período de medição dos dados hidráulicos e da qualidade de água utilizado no processo de validação é a 4ª campanha de monitoramento que foi realizada no período de 10 a 13 de novembro de 2011, estando o trecho fluvioestuarino, sob condição de maré de sizígia. Entretanto, só poderá ser validado o Ponto Amostral 1, porque os demais PA's não foram monitorados nessa campanha.

Os resultados da validação são apresentados comparando-se os dados observados com os dados simulados pelo modelo hidrodinâmico do SisBaHiA, objetivando a confirmação da eficiência do modelo em representar a dinâmica das águas na região fluvioestuarina e os fenômenos ambientais observados na região.

4.4.4.1 PONTO AMOSTRAL 1 (PA 1)

A Figura 53 representa o gráfico comparativo de nível d'água previsto para a estação maregráfica 137-Cachoeira e os resultados simulados para o nó 6667 que representa o PA 1 no domínio da modelagem.

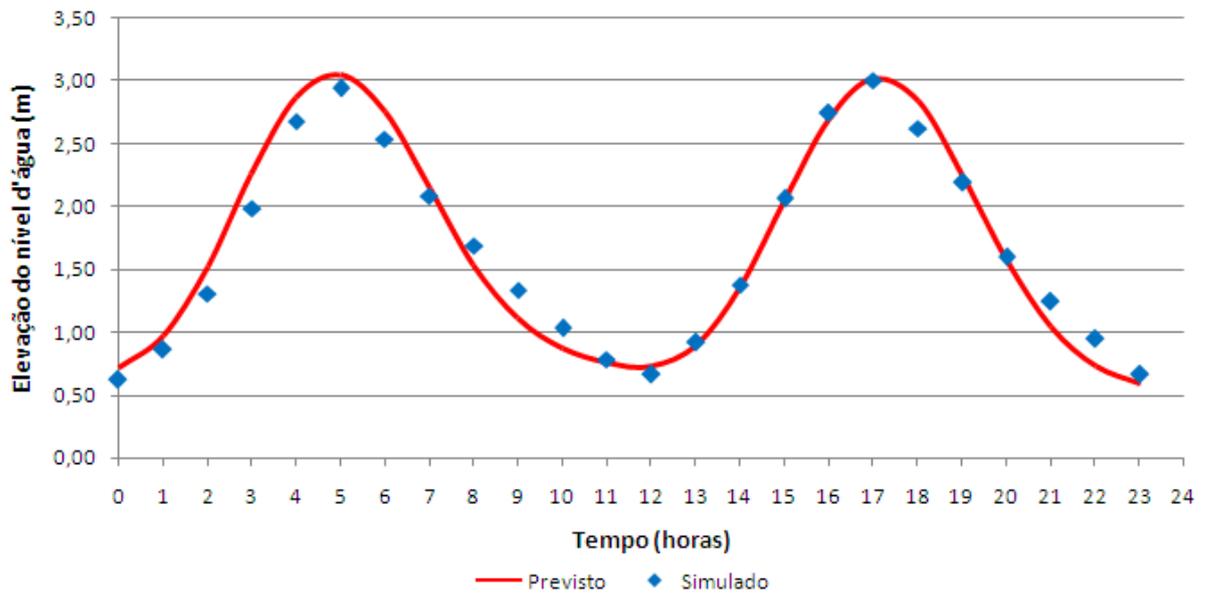


Figura 53 - Variações de nível d'água previsto em Cachoeira e simulado para o PA 1 no dia 10/11/2011.

E a Figura 54 representa a análise da tendência linear entre os valores previstos e simulados de nível d'água $R^2=0,976$. A aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,972$, indicando também, uma boa representação do nível d'água pelo modelo hidrodinâmico.

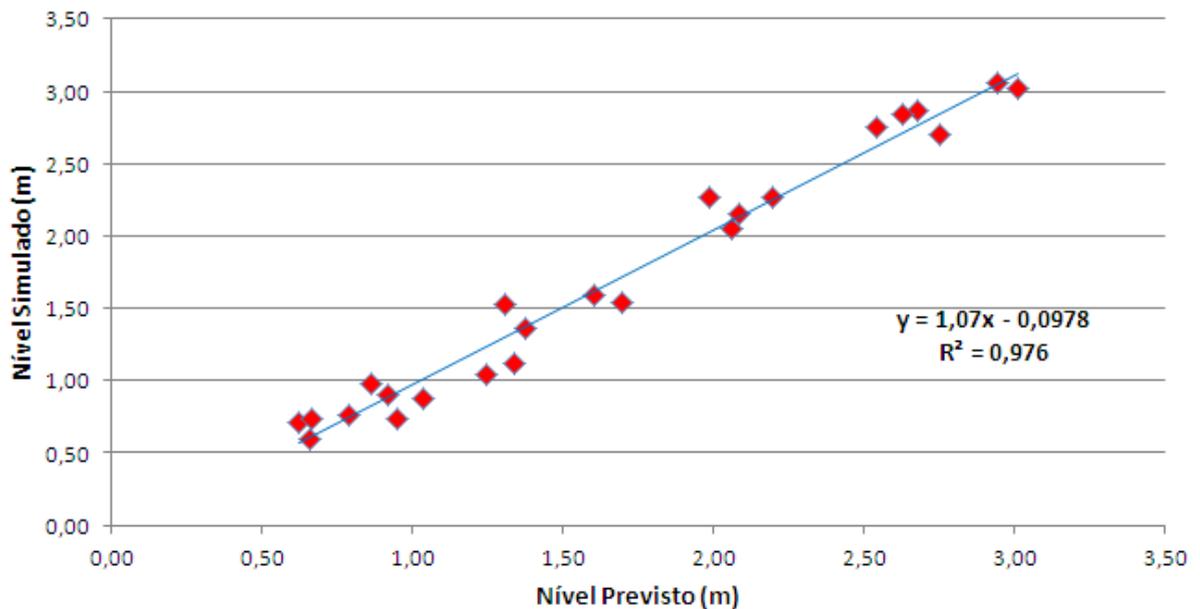


Figura 54 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de nível d'água previstos e simulados no PA 1.

A série de dados do monitoramento de corrente no PA 1 foi realizada no dia 11/11/2011, iniciado às 7h15min e encerrando às 17h10min, sob condição de maré

de sizígia. A Tabela 14 representa os dados horários de velocidade média da coluna d'água e as vazões observadas e simuladas para o PA 1.

Tabela 14 - Dados de velocidade média e vazões medidas e simuladas no PA 1 em 11/11/2011

Hora	Vazão Medida (m ³ s ⁻¹)	Vazão Simulada (m ³ s ⁻¹)	Velocidade Medida (m s ⁻¹)	Velocidade Simulada (m s ⁻¹)	Vazão defluente informada pela VOTORANTIM (m ³ s ⁻¹)
0	-	82	-	0,12	0
1	-	-212	-	-0,27	0
2	-	-323	-	-0,33	0
3	-	-322	-	-0,25	0
4	-	-125	-	-0,08	0
5	-	-125	-	-0,08	0
6	-	198	-	0,15	0
7	210	202	0,23	0,18	0
8	236	217	0,27	0,24	0
9	136	160	0,24	0,20	0
10	91	139	0,20	0,17	13,62
11	62	117	0,15	0,16	78,19
12	89	113	0,12	0,15	45,35
13	-93	-99	0,18	-0,15	59,73
14	-132	-185	-0,17	-0,23	108,86
15	-144	-252	-0,19	-0,23	161,98
16	22	-154	-0,15	-0,11	161,98
17	150	119	0,03	0,08	100,05
18	-	262	0,14	0,19	91,56
19	-	248	-	0,19	91,56
20	-	251	-	0,22	91,56
21	-	232	-	0,23	91,56
22	-	214	-	0,24	91,56
23	-	194	-	0,24	33,36

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

A Figura 55 representa o gráfico das velocidades médias na coluna d'água medidas e simuladas no PA 1 para o mesmo período.

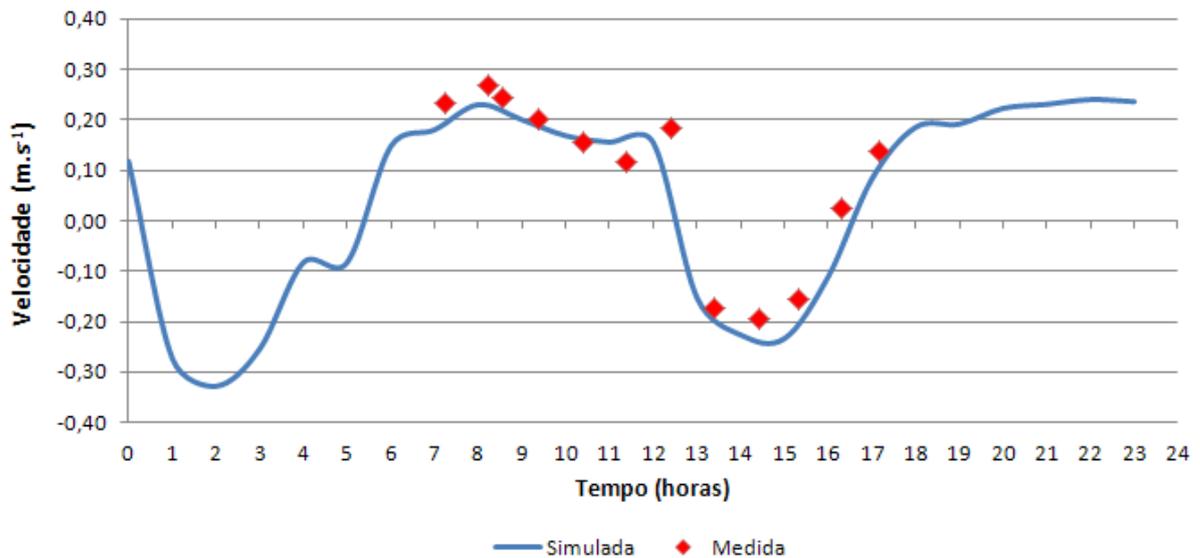


Figura 55 - Velocidades médias observadas comparadas com as velocidades médias simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.

O gráfico da Figura 56 representa a tendência linear existente entre os valores de velocidades médias observadas e simuladas, apresentando $R^2=0,942$. O resultado estatístico da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,818$ indicando uma boa relação existente entre os dados de velocidade apresentados.

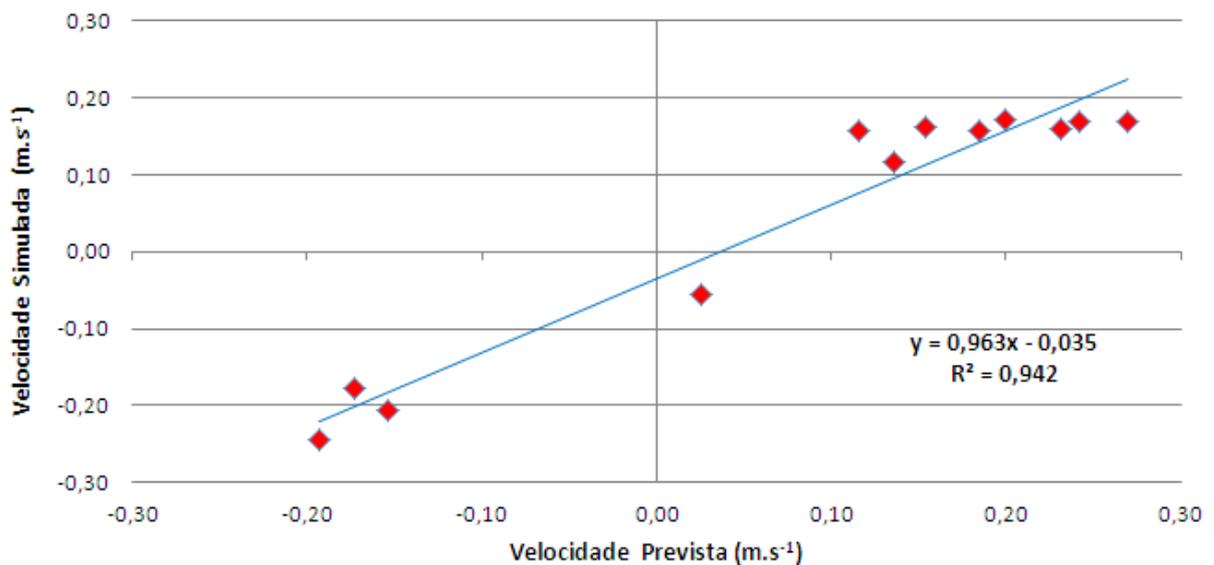


Figura 56 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de velocidades médias observadas e simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.

A Figura 57 representa o gráfico comparativo das vazões horárias medidas e simuladas no mesmo período para o PA 1.

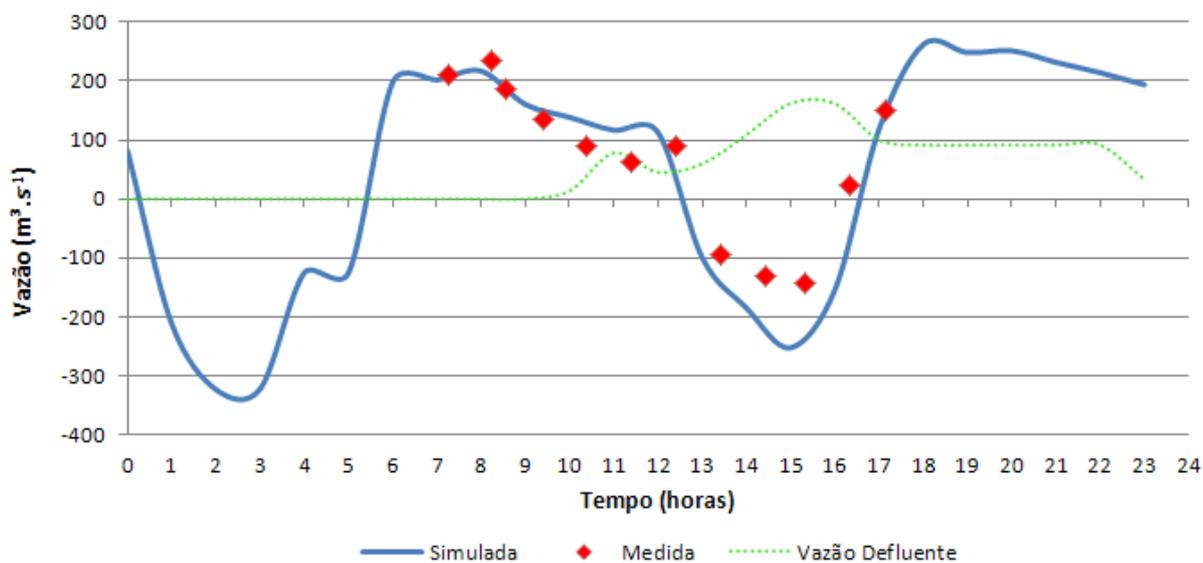


Figura 57 - Vazões medidas comparada com as vazões simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.

O gráfico da Figura 58 representa a tendência linear existente entre os valores de vazões, apresentado $R^2=0,861$. A aplicação do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi de $R^2=0,805$ indicando uma relação aceitável entre os dados observados e simulados de vazão para o período.

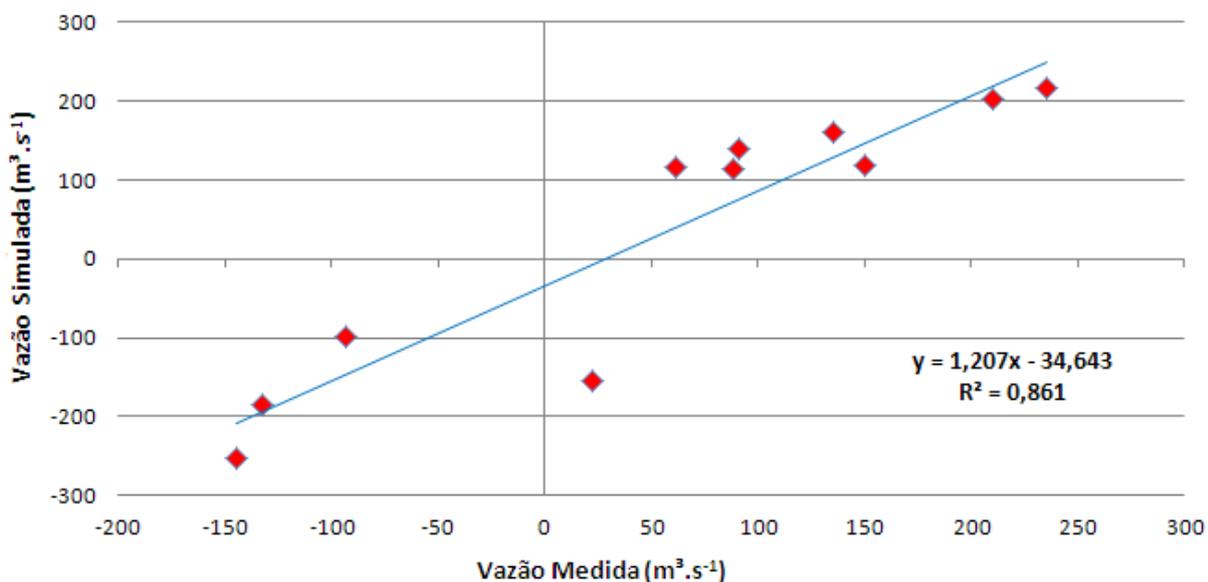


Figura 58 - Análise estatística da tendência linear entre os dados de vazões medidas e simuladas no PA 1 para o dia 11/11/2011.

Através dos dados apresentados acima, pode-se observar que durante o período de meia-maré enchente por volta das 16h ocorreu uma inversão do fluxo de corrente

para a jusante (sentido estuário abaixo), ocasionado pela vazão defluente da barragem com magnitude de $161,98 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

As vazões máximas registradas ocorreram durante a maré vazante. O fluxo máximo ocorreu por volta das 8h registrando vazões medidas e simuladas de $236 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $217 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e velocidade média da coluna d'água de $0,27$ e $0,23 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. E na maré enchente o fluxo máximo medido e simulado ocorreu às 15h registrando vazão de -144 e $-252 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e velocidade média na coluna d'água de $-0,19$ e $-0,23 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente (Tabela 14).

4.4.5 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE DE SAIS

Os resultados da validação são apresentados comparando-se os dados observados com os dados simulados pelo modelo hidrodinâmico e acoplado a ele o modelo de qualidade da água do SisBaHiA, objetivando a confirmação da eficiência do modelo em representar a circulação hidrodinâmica das águas e o processo de transporte e dispersão do sais na região fluvioestuarina do rio Paraguaçu.

4.4.5.1 PONTO AMOSTRAL 1 (PA 1)

A série de dados do monitoramento da salinidade no PA 1 foi realizada no dia 12/11/2011, através de coleta pontual da amostra de água às 16h20min no meio da coluna d'água, sob condição de maré de sizígia. A Tabela 15 representa os dados horário de salinidade (‰) média da coluna d'água medidas e simuladas para o PA 1 e as vazões defluentes da usina durante o período.

Tabela 15 - Dados de Salinidade média na coluna d'água observadas e simuladas no PA 1 em 12/11/2011 Continua

Hora	Salinidade Medida (‰)	Salinidade Simulada (‰)	Vazão defluente informada pela VOTORANTIM ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
0	-	0,19	0
1	-	0,19	0
2	-	0,19	0

Conclusão

Hora	Salinidade Medida (‰)	Salinidade Simulada (‰)	Vazão defluente informada pela VOTORANTIM (m ³ s ⁻¹)
3	-	0,19	0
4	-	0,19	0
5	-	0,19	0
6	-	0,19	0
7	-	0,20	0
8	-	0,20	0
9	-	0,20	0
10	-	0,20	13,62
11	-	0,19	78,19
12	-	0,19	45,35
13	-	0,19	59,73
14	-	0,19	108,86
15	-	0,19	161,98
16	0,27	0,19	161,98
17	-	0,19	100,05
18	-	0,20	91,56
19	-	0,21	91,56
20	-	0,20	91,56
21	-	0,20	91,56
22	-	0,20	91,56
23	-	0,20	33,36

Fonte: INEMA/UFBA, 2013a.

Devido às simplificações e limitações observadas na 4^a campanha de monitoramento, conforme mencionado anteriormente, a quantificação da salinidade não pode ser pontual em apenas um instante. Esta prática impossibilita a verificação das variações nas concentrações dos sais no decorrer do tempo. É necessário verificar estas variações, pelo menos, durante um ciclo de maré semidiurna, possibilitando a análise dos níveis de salinidade em que o ambiente está sendo submetido, durante as marés enchente e vazante na região.

Depois de finalizado o processo de validação e os resultados apresentados demonstrarem boa representatividade dos fenômenos ambientais envolvidos na modelagem, é que se dará início à simulação dos cenários que auxiliaram na análise ambiental, baseado nos objetivos propostos pelo estudo para a região. O próximo capítulo abordará as características e requisitos utilizados na simulação dos cenários.

5. CENÁRIOS PROPOSTOS PARA A SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA E DA QUALIDADE DE ÁGUA NO TRECHO FLUVIOESTUARINO DO RIO PARAGUAÇU

As condições hidrológicas utilizadas para a geração dos cenários ambientais são características de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012, correspondente ao período hidrológico da região (01/10/2011 a 30/09/2012), objetivando a análise do comportamento hidráulico e o padrão do perfil longitudinal da salinidade para o baixo curso do rio Paraguaçu.

As definições dos hidrogramas ambientais tomaram como referência a quantidade, qualidade e sazonalidade das vazões defluentes, visando garantir a manutenção dos processos do ecossistema estuarino, bem como, o desenvolvimento dos componentes do sistema. As definições das vazões levaram em consideração o plano de operação da usina hidrelétrica de Pedra do Cavalo, observadas as restrições e regras em funções da proteção das comunidades à jusante, o atendimento das demandas prioritárias dos múltiplos usuários e a manutenção da variabilidade sazonal do ambiente estuarino.

O cenário ano 2011-2012 é correspondente ao hidrograma das vazões defluentes da usina aplicado ao regime operacional, evidenciado através do quadro hidráulico e de geração de energia elétrica da Votorantim para o período hidrológico definido. No quadro hidráulico, observou-se vazões horárias diárias durante todo o período, onde pode ser verificado tal regime de operação em função das restrições citadas acima.

Como simulação adicional, foi elaborado o cenário vazão restrição máxima, previsto no plano de operação da barragem de Pedra do Cavalo (VOTORANTIM, 2013), que define a vazão de restrição de $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, vazão de segurança que não transborda a calha do rio, e inunda as cidades localizadas às margens do estuário. O objetivo deste cenário é a verificação do comportamento hidrodinâmico e do transporte e dispersão dos sais na região, em situação de vazões extremas de alta magnitude.

A seguir são apresentados os resultados das simulações hidrodinâmicas, a salinidade no trecho em estudo e os hidrogramas ambientais definidos, correspondentes aos cenários ano seco, ano úmido e ano 2011-2012.

5.1 CONDIÇÕES HIDROLÓGICAS DOS CENÁRIOS ANO SECO, ANO ÚMIDO E ANO 2011-2012

O hidrograma ambiental correspondente aos períodos hidrológicos característicos dos cenários propostos, faz referência às vazões que serão liberadas pela usina, considerando o regime diário de operação no atendimento das restrições e prioridades.

A Figura 59 representa os hidrogramas ambientais defluentes da usina para o período simulado, utilizadas como vazões afluentes ao domínio da modelagem.



Figura 59 – Hidrogramas ambientais defluentes da usina para os períodos hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012.

Observa-se que nos meses característicos de cheias da região, dezembro/2011 a março/2012, as maiores vazões foram observadas no ano úmido e na grande maioria, estiveram com magnitude acima de $330 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e nos meses característicos do período de estiagem, junho/2012 a setembro/2012, o ano 2011-2012 apresentou vazões baixas com magnitudes cerca de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, excetuando pequenos pulsos de vazões inferiores a $130 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante o período hidrológico.

O hidrograma do ano úmido apresenta maior variabilidade na magnitude das vazões durante os períodos de cheia e estiagem, favorecendo a sazonalidade ambiental necessária para a manutenção dos processos estuarinos. Já o hidrograma do ano seco apresentou variação mais moderada na magnitude das vazões, porém, o fluxo variável e sazonal, diferentemente, do cenário ano 2011-2012, que praticamente, apresentou vazões uniformes em todo período hidrológico, atendendo a restrições de baixas vazões médias diárias, sendo observadas vazões nulas em alguns períodos. A seguir são apresentados os resultados hidrodinâmicos e de transporte dos sais obtidos na simulação para os pontos amostrais selecionados.

5.1.1 PONTO AMOSTRAL 1 (PA 1)

Os resultados da simulação hidrodinâmica no PA 1 são apresentados, comparando-se os dados de vazões simuladas para os cenários hidrológicos selecionados, para a análise do comportamento hidrodinâmico da região.

A Figura 60 representa o resultado do comportamento hidrodinâmico no PA 1, evidenciado pelo regime de vazões simuladas. As vazões com sinal negativo indicam fluxo de corrente no sentido estuário acima (maré enchente) e as vazões positivas, indicam o fluxo no sentido estuário abaixo (maré vazante).

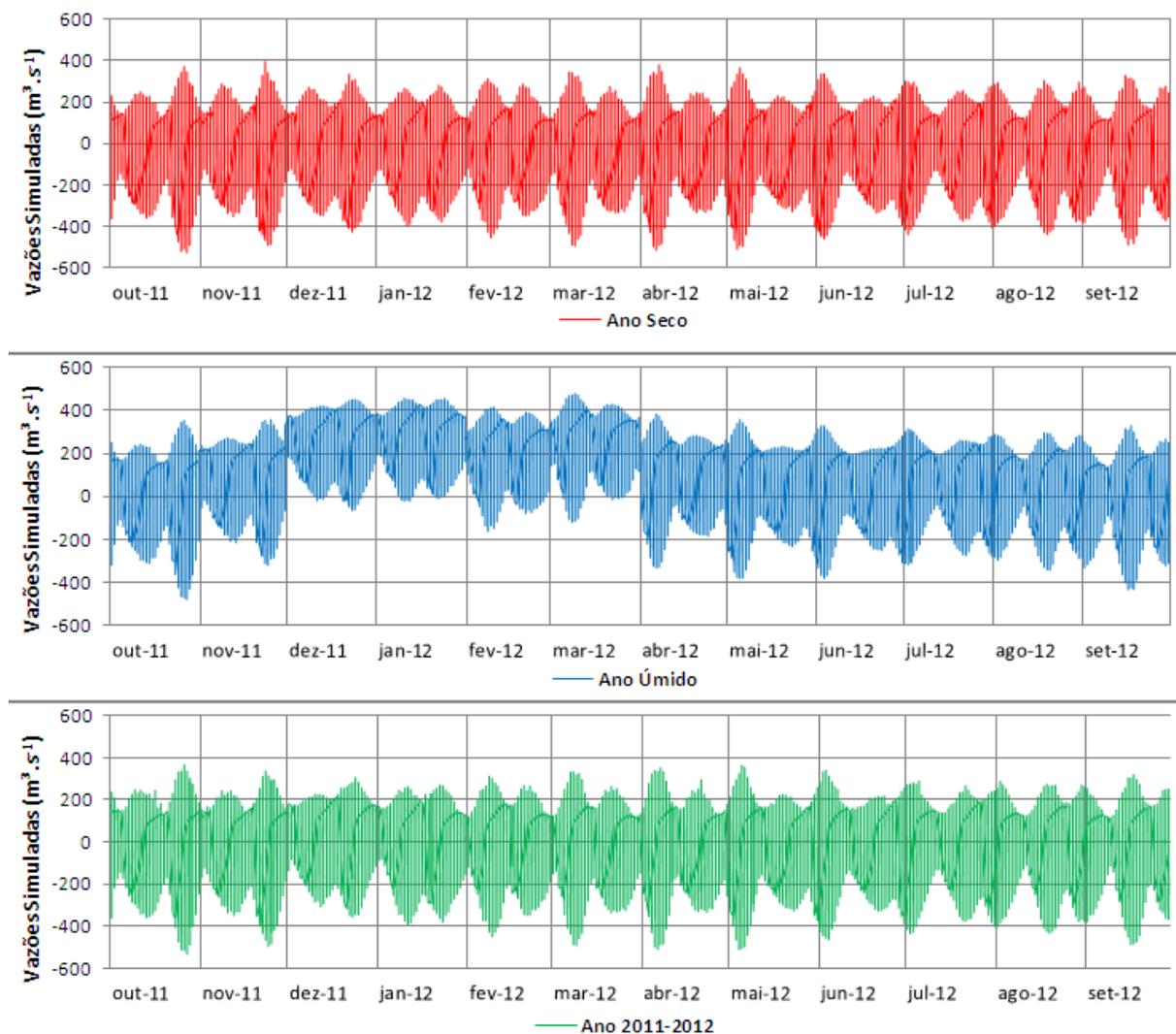


Figura 60 – Vazões simuladas para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 1

O resultado da simulação do cenário ano úmido e nos meses típicos de cheia na região (dezembro a março), apresentou vazões com maior magnitude impedindo que a maré enchente chegasse até o PA 1, possibilitando o aporte de água doce de origem a montante da barragem para o estuário. Nos outros meses, o comportamento hidrodinâmico, manteve-se uniforme em relação às magnitudes das vazões de enchente e vazante.

Nas simulações dos cenários ano seco e ano 2011-2012 as vazões mantiveram-se equivalentes e uniformes, observando-se vazões com maior intensidade durante as marés enchentes, verificando a influência da maré sob o PA 1, em razão das baixas vazões registradas. Nota-se também, que as vazões com maior magnitude ocorreram na enchente e em condição de maré de sizígia nos cenários ano seco e

ano 2011-2012, alcançando o valor de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto que, as vazões de maré vazante, alcançaram máximo de $360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A Figura 61 representa o resultado das simulações de Salinidade (‰) no PA 1 para os cenários propostos modelados no SisBaHiA.

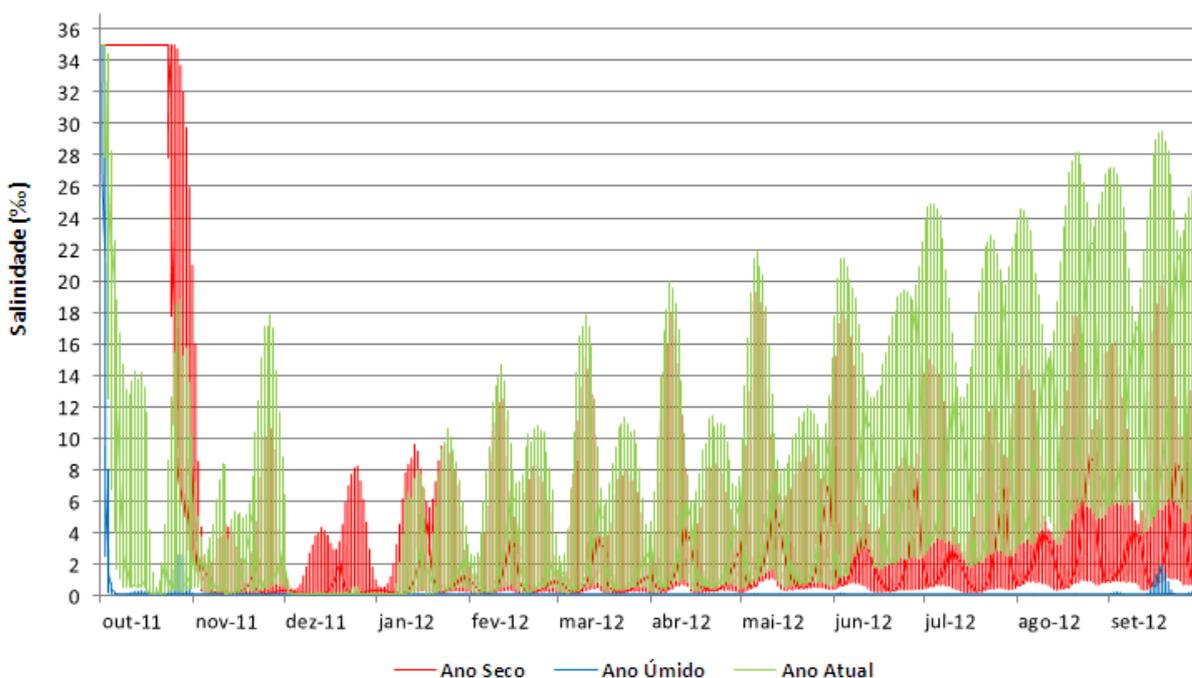


Figura 61 – Salinidade (‰) para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 1

Os resultados de salinidade para o cenário ano úmido mostram que o PA 1 não é influenciado pela forçante de maré, em razão das vazões defluentes o que é evidenciado pelos valores de salinidade, que apresentam níveis abaixo de $0,5‰$, característico de água doce (BRASIL, 2005), permitindo a classificação do ambiente como límnico (VENICE, 1958).

Durante os cenários hidrológicos ano seco e ano 2011-2012, as variações de salinidade no PA 1, mantiveram-se na caracterização de ambiente de água salobra ($0,5‰$ a $30‰$) (BRASIL, 2005), verificando-se apenas em alguns meses característicos de cheia da região (dezembro a março), modificações para ambientes oligohalino e mesohalino (VENICE, 1958). Ambientes do tipo mixohalino são favoráveis ao desenvolvimento do biota eurialino, mais resistente a variação de salinidade no ambiente e que geralmente, é localizado na região de desembocadura do estuário.

5.1.2 PONTO AMOSTRAL 2 (PA 2)

Os resultados hidráulicos simulados no PA 2 (Figura 62), representam o padrão de comportamento hidrodinâmico, relacionado aos cenários propostos pelos hidrogramas defluentes da usina ao estuário.

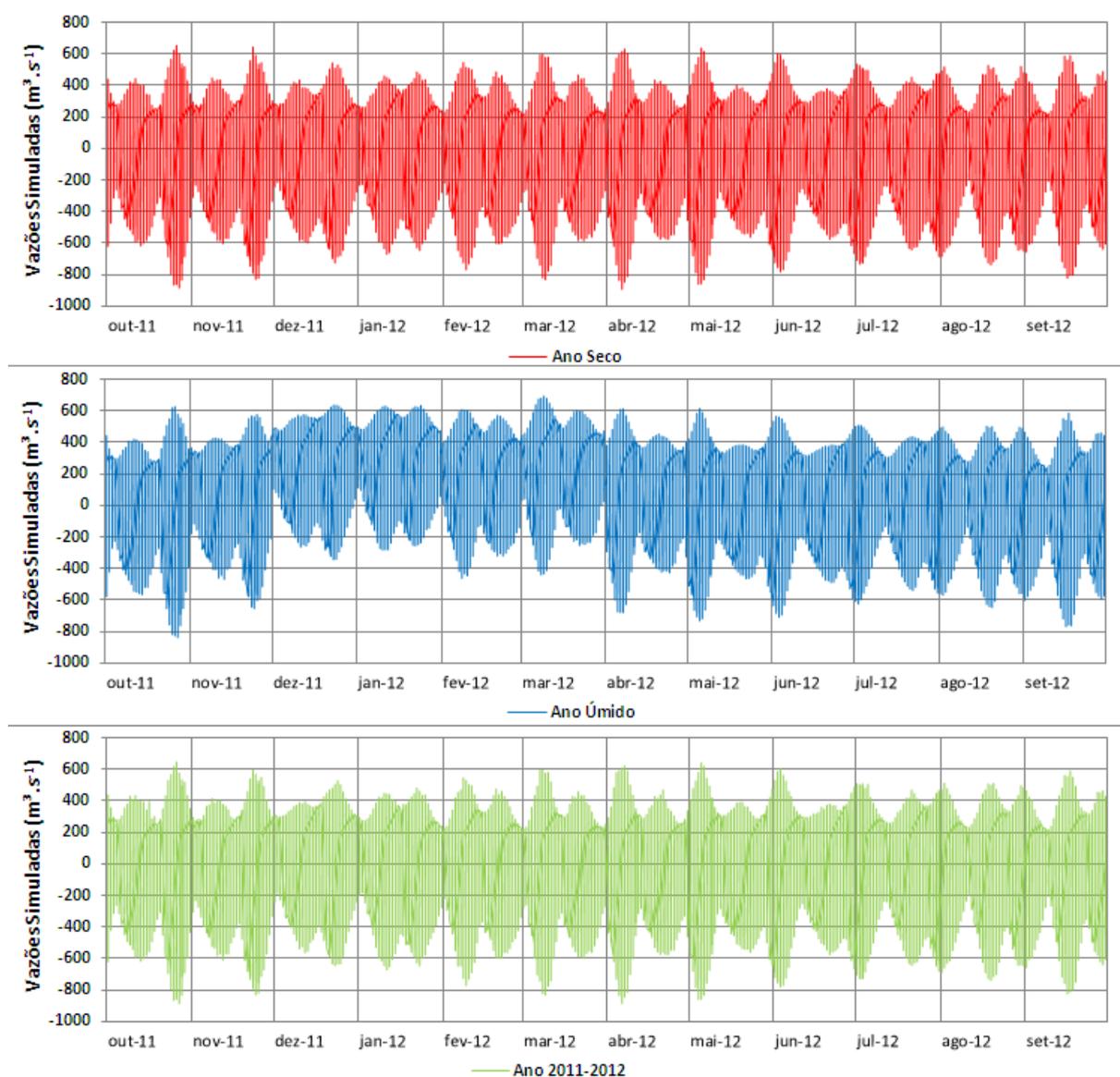


Figura 62 – Vazões simuladas para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 2

Os resultados apresentam-se praticamente, uniformes, comparando-se as vazões simuladas dos cenários hidrológicos, excetuando apenas, o cenário ano úmido para o período característico de cheia da região (dezembro a março), que apresentou vazões com altas magnitudes defluentes da usina.

Nos cenários ano seco e ano 2011-2012, o comportamento hidráulico apresentou maiores vazões durante o ciclo de maré enchente e na condição de maré de sizígia, registrando vazões de $900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e vazões mais baixas na maré vazante em condição de maré de sizígia, chegando a $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, verificando a maior influência da maré no PA 2 em relação ao PA 1.

A Figura 63 representa o resultado das simulações de Salinidade (‰) no PA 2 para os cenários propostos para modelagem no SisBaHiA.

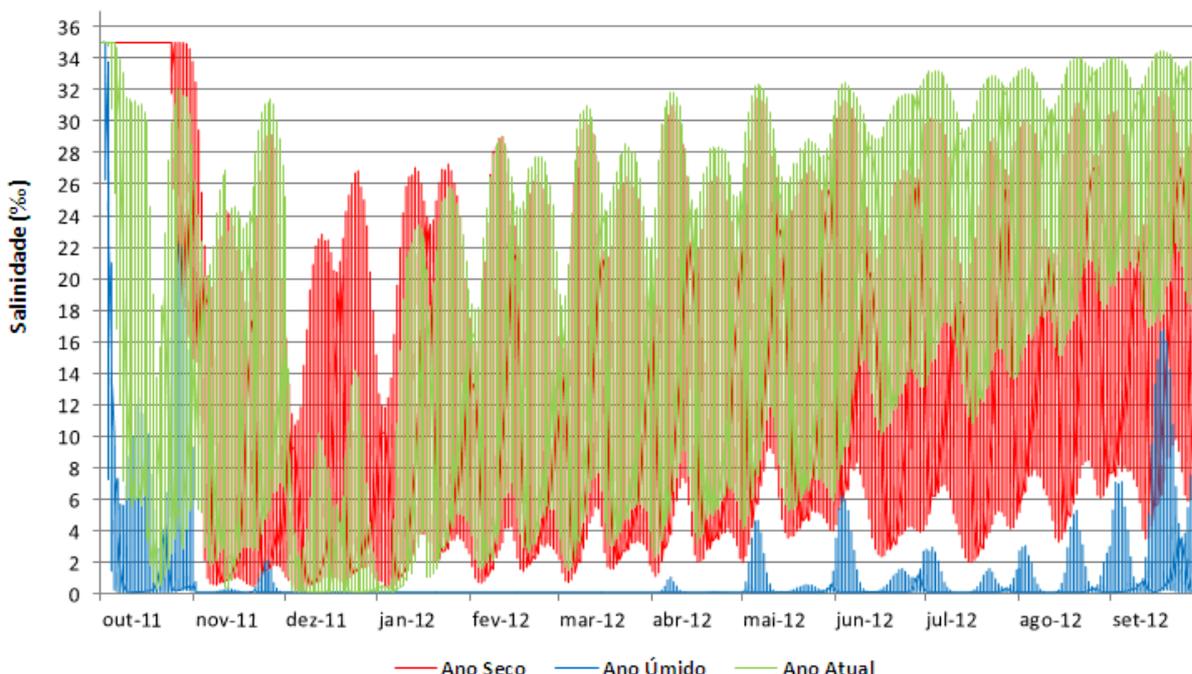


Figura 63 – Salinidade (‰) para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 2

Os resultados da simulação de salinidade para o cenário ano úmido apresentaram aumento significativo de salinidade das águas, visto que, a localização do PA 2 está relativamente próxima ao PA 1. Tais variações, provavelmente, impactaram na caracterização ambiental, modificando o ambiente límnico para ambiente oligohalino em alguns meses e mesohalino em outros (VENICE, 1958). Apesar de parecer pequena a alteração ambiental, pode ocasionar o deslocamento do biota estenoalino para ambientes à montante do estuário, mais favoráveis ao seu desenvolvimento, em razão de baixas variações na faixa de salinidade.

Durante os cenários hidrológicos ano seco e ano 2011-2012, as variações de salinidade no PA 2, mantiveram-se praticamente, sob a classificação de ambiente

característico de águas salobra a salina, variando de 1‰ a 34‰ (BRASIL, 2005), proporcionando modificações para ambiente mixohalino, variando entre oligohalino a polihalino (VENICE, 1958), também favoráveis ao desenvolvimento do biota eurialino, em razão da larga faixa de salinidade no ambiente.

5.1.3 PONTO AMOSTRAL 3 (PA 3)

A Figura 64 representa o hidrograma de vazões defluentes da usina para os cenários hidrológicos simulados, utilizados como vazão afluente ao domínio da modelagem.

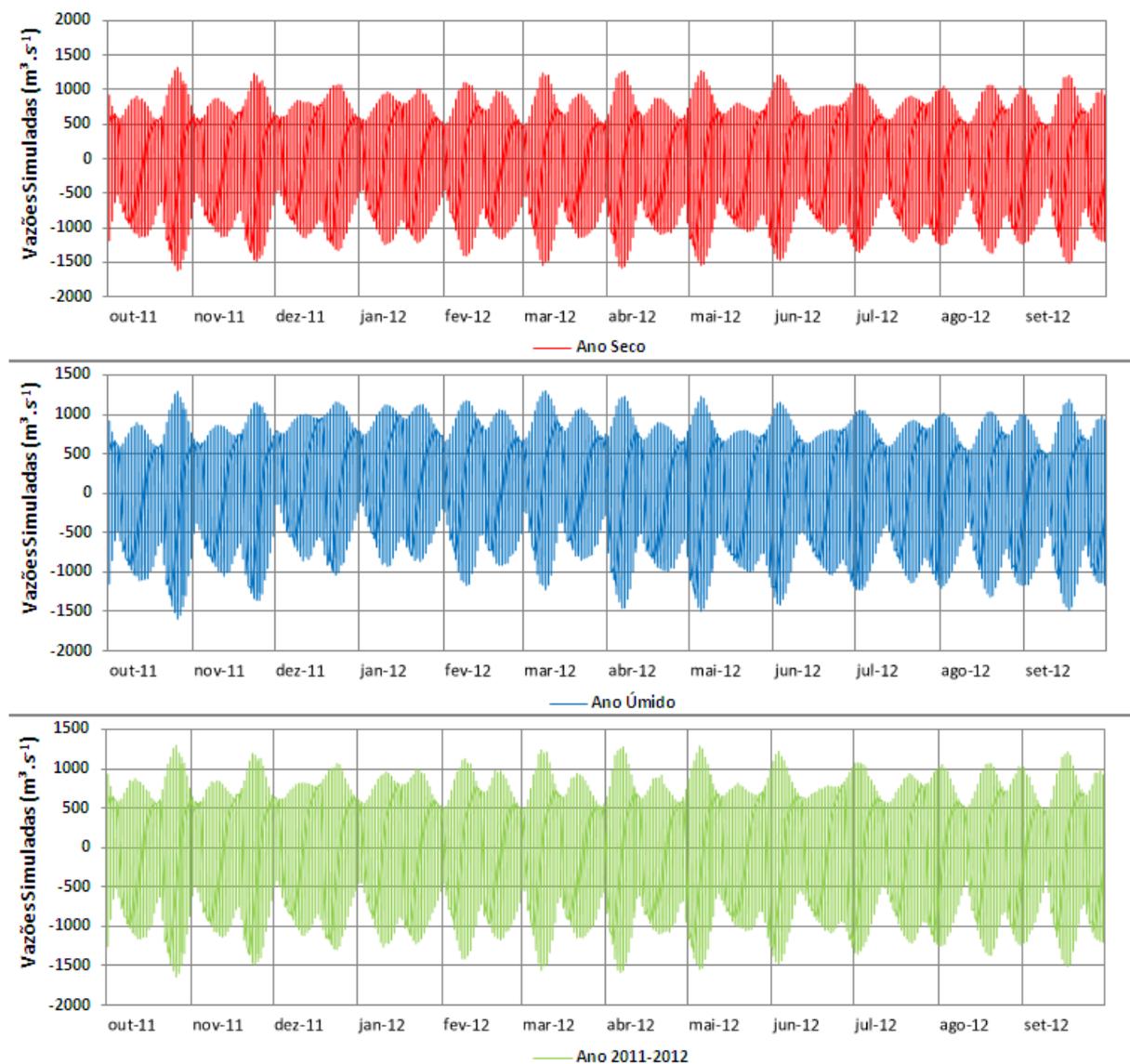


Figura 64 – Vazões simuladas para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 3

Os resultados simulados no PA 3, apresentaram, praticamente, uniformidade entre as magnitudes das vazões para os cenários propostos, independentemente, do hidrograma defluente da usina, perdendo a capacidade da variabilidade sazonal na localidade. Nota-se, que o PA 3 é totalmente influenciado pela forçante de maré e características ambientais, que variam baseadas no comportamento do seu ciclo. As vazões registradas na maré enchente sob condição de maré de sizígia foram registradas com magnitudes a cerca de $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, maiores do que as vazões registradas na maré vazante sob mesma condição de maré em magnitude média de $1.300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A Figura 65 representa o resultado das simulações de Salinidade (‰) no PA 3, referente aos cenários propostos na simulação através dos hidrogramas de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 afluente ao estuário.

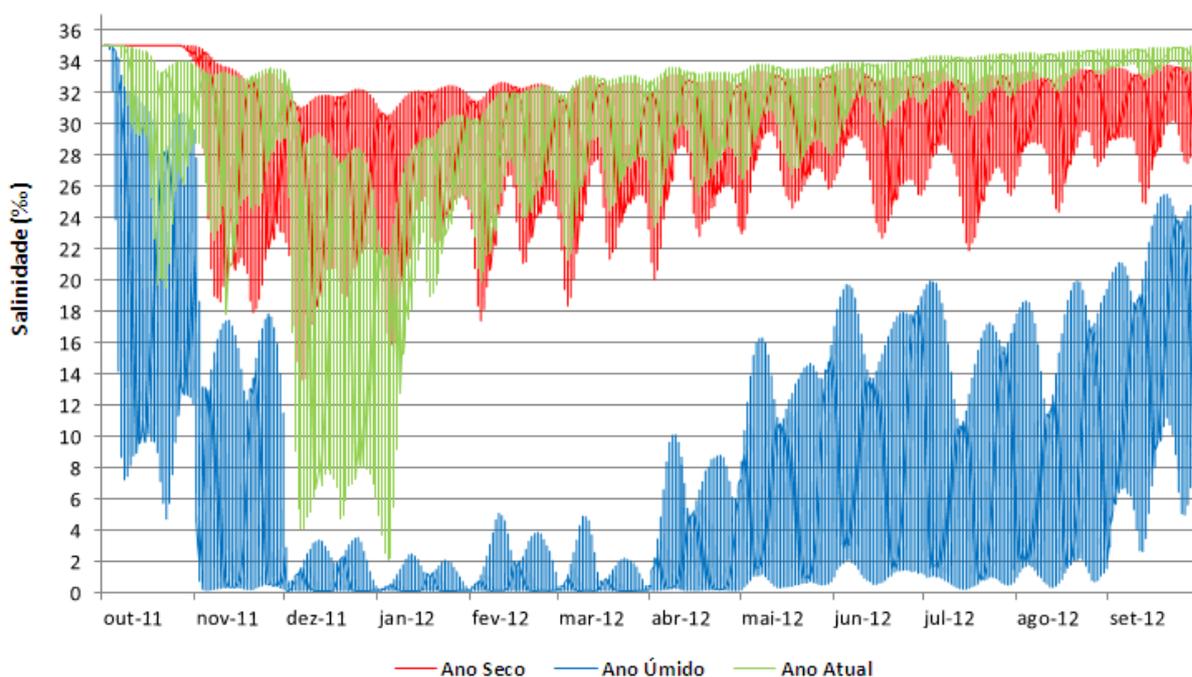


Figura 65 – Salinidade (‰) para os cenários hidrológicos característicos de ano seco, ano úmido e ano 2011-2012 no PA 3

Os resultados da simulação de salinidade para o cenário ano úmido apresentaram maior alteração de salinidade das águas, pelo fato de estar sendo influenciado pela maré, apesar das altas magnitudes de vazões defluentes. A caracterização do ambiente passou de oligohalino em alguns momentos do período característico de

cheia para Polihalino, apresentando ampla faixa de variação da salinidade para o período hidrológico (VENICE, 1958).

Nos cenários ano seco e ano 2011-2012, a salinidade manteve-se sob a caracterização de ambiente salino a salobro, variando apenas, em razão do ciclo de maré da região. A faixa de valores de salinidade variou entre 2‰ a 35‰, promovendo a classificação do ambiente em polihalino (VENICE, 1958), favorável ao desenvolvimento do biota eurialino, em razão da ampla faixa de variação de salinidade no ambiente.

A verificação da intrusão salina no trecho fluvioestuarino ocorreu através da localização da isohalina de 5‰, para cada cenário proposto de simulação, observando as diversas condições e situações a que estão submetidos o trecho estudado. Os resultados simulados pelo modelo SisBaHiA através do módulo de qualidade de água para a salinidade, estando nas condições de marés de sizígia e quadratura, na situações de marés enchente e vazante e nos períodos característicos de cheia e estiagem na região, são apresentados a seguir.

As Figuras 66 e 67 representam o perfil longitudinal da salinidade para o cenário ano seco, nas condições de maré de sizígia e quadratura, nos períodos característicos de cheia e estiagem da região e sob a influência do ciclo de marés enchente e vazante.

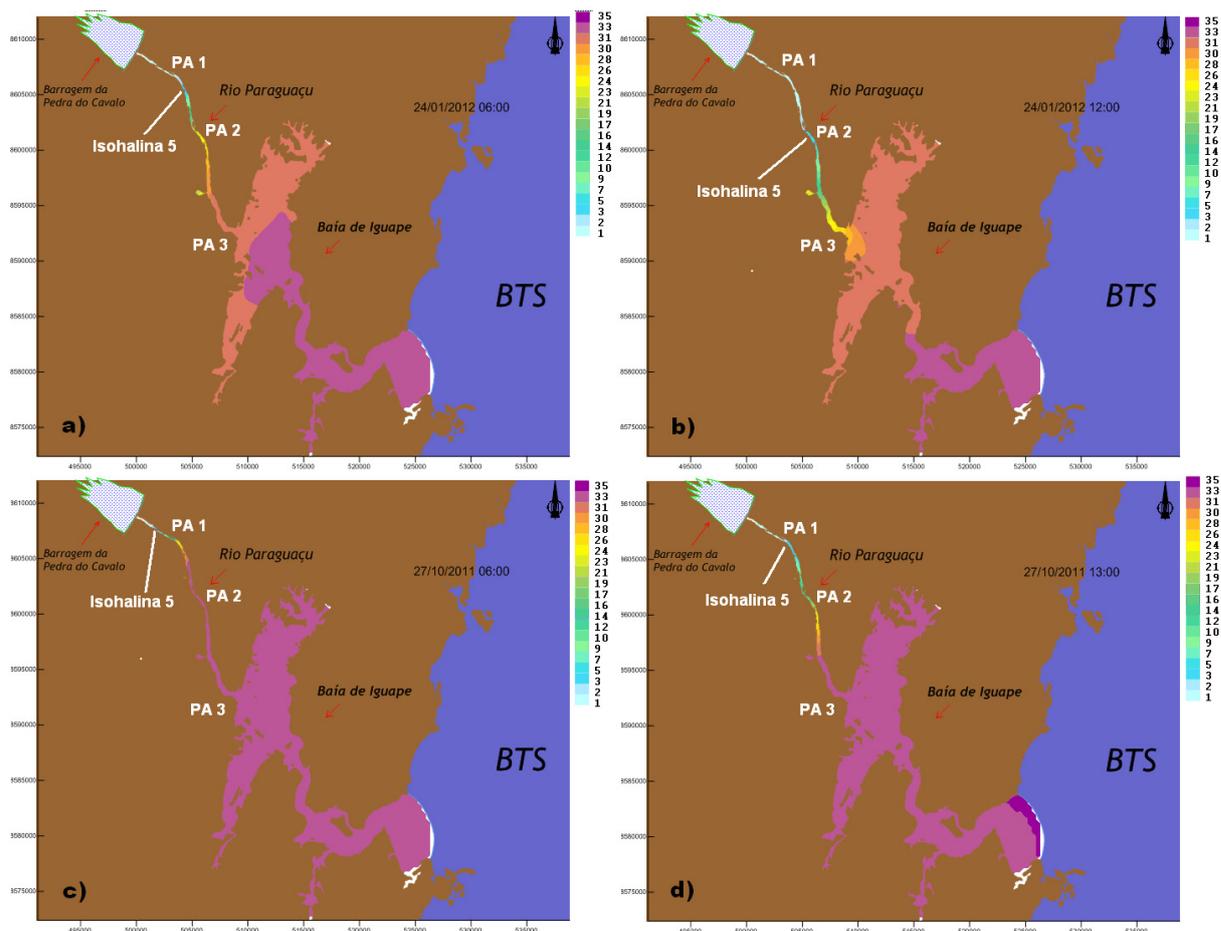


Figura 66 – Perfil longitudinal da Salinidade (‰) para o cenário ano seco e nas condições:
 a) maré de sizígia – período de cheia – preamar; b) maré de sizígia – período de cheia – baixa-mar; c) maré de sizígia – período de estiagem – preamar. d) maré de sizígia – período de estiagem – baixa-mar

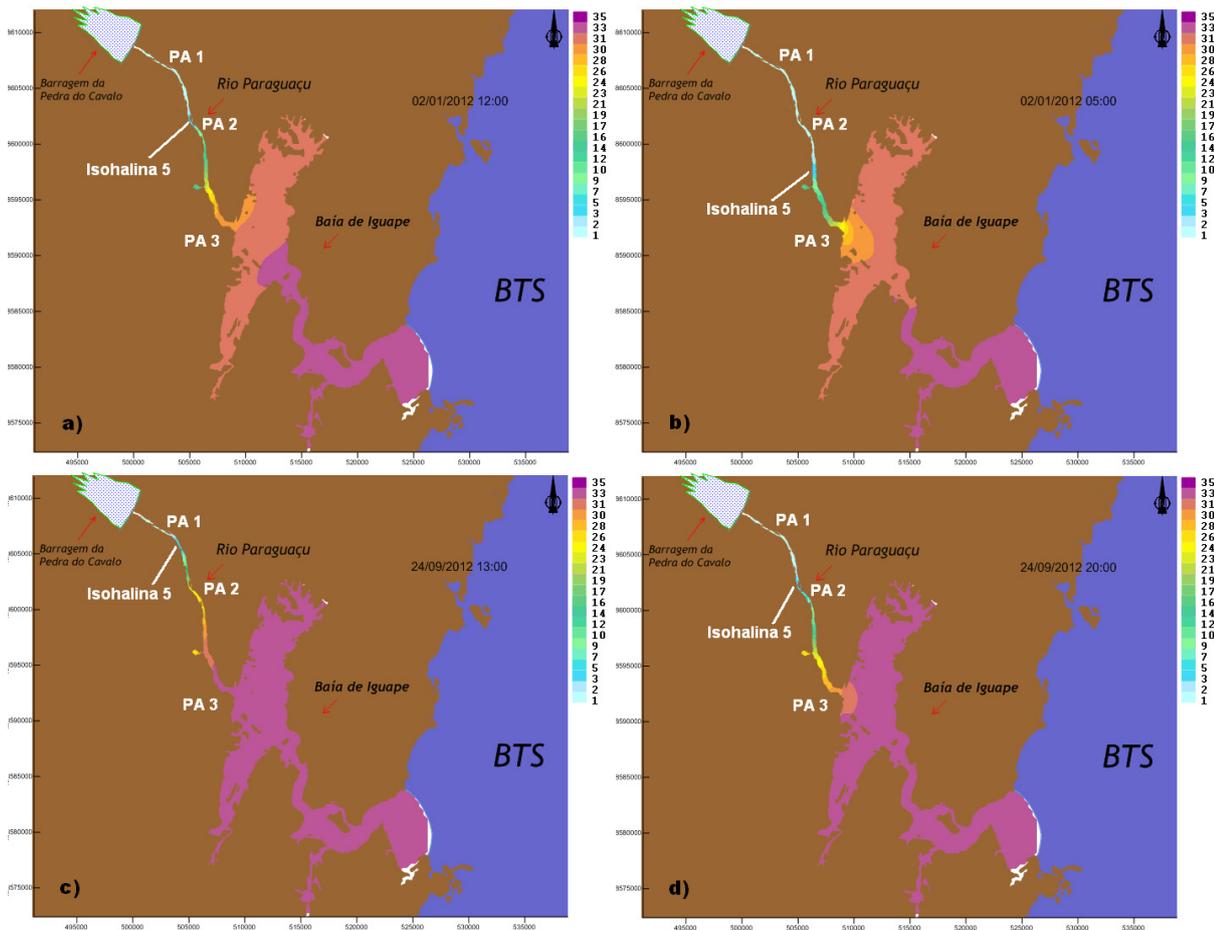


Figura 67 – Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano seco e nas condições: a)maré de quadratura – período de cheia – preamar; b) maré de quadratura – período de cheia – baixa-mar; c) maré de quadratura – período de estiagem – preamar. d) maré de quadratura – período de estiagem – baixa-mar

Os resultados da simulação de salinidade demonstraram que em condições de maré de sizígia, período das cheias e na preamar, a isohalina de 5‰ penetra aproximadamente 14 km variando até 10 km no trecho variando sua localização em função do ciclo da maré. E no período de estiagem e sob as mesmas condições, desloca-se para o limite de influência do estuário, cerca de 18 km variando até 16 km ampliando a faixa de variação de salinidade (5 a 35‰) em todo o trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu.

Em condições de maré de quadratura para os períodos de cheia a intrusão salina penetra no máximo 11 km variando até 7 km, em razão do ciclo de maré. No período de estiagem a intrusão salina alcança 15 km variando até 12 km, relacionado ao ciclo de maré. Os maiores valores de salinidade observadas no trecho fluvioestuarino para o cenário ano seco, foi na condição de maré de sizígia e período de estiagem, relacionado a baixas vazões defluentes no período e os menores

valores foram registradas durante a maré de quadratura e período de cheia, devido a maiores magnitudes de vazões defluentes, tornando possível a caracterização do ambiente como mixohalino, com ampla faixa de variação da salinidade, favorável ao desenvolvimento do biota eurialino.

As Figuras 68 e 69 representam o perfil longitudinal da salinidade para o cenário ano úmido, nas condições de maré de sizígia e quadratura para os períodos característicos de cheia e estiagem da região e sob a influência do ciclo de marés enchente e vazante.

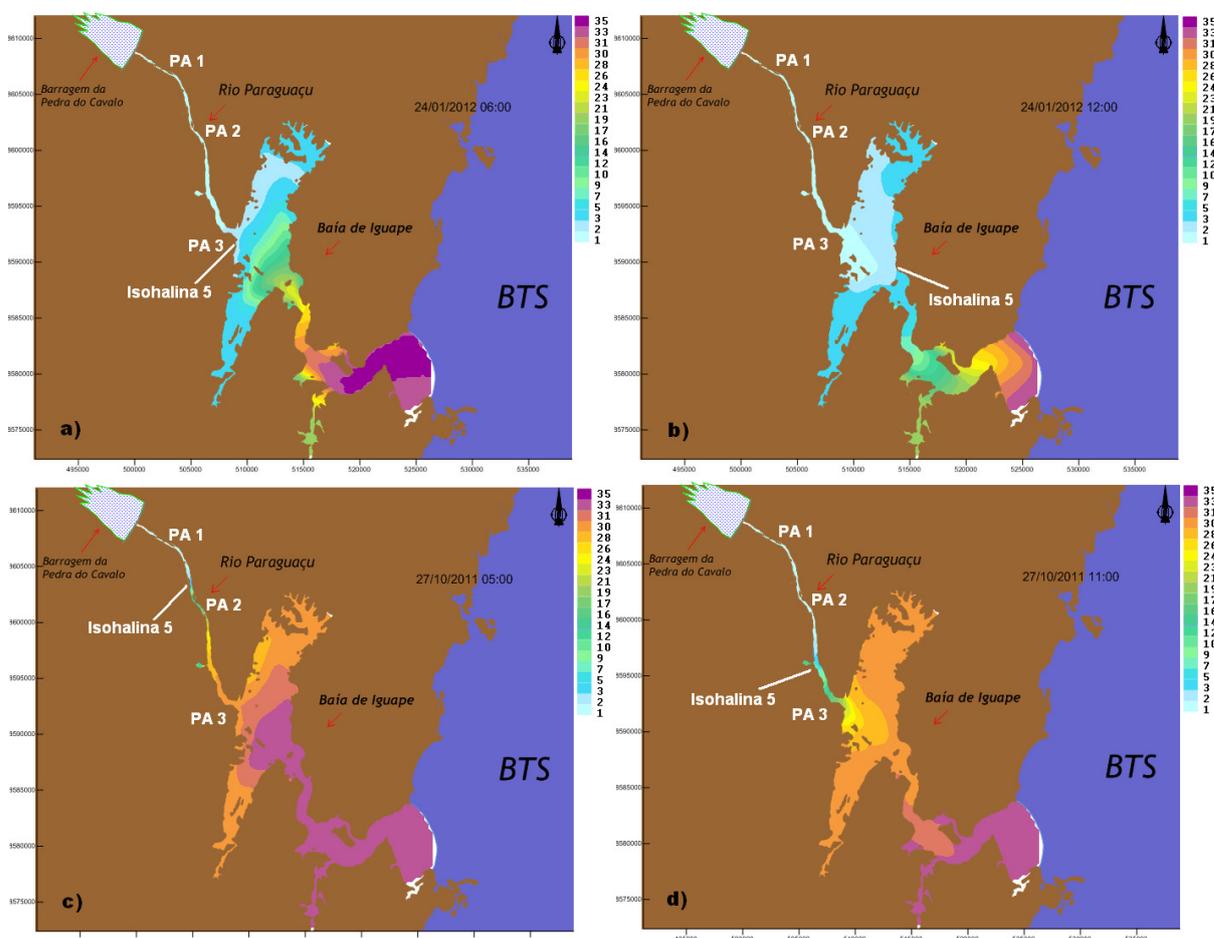


Figura 68 – Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano úmido e nas condições:
 a) maré de sizígia – período de cheia – preamar; b) maré de sizígia – período de cheia – baixa-mar; c) maré de sizígia – período de estiagem – preamar. d) maré de sizígia – período de estiagem – baixa-mar

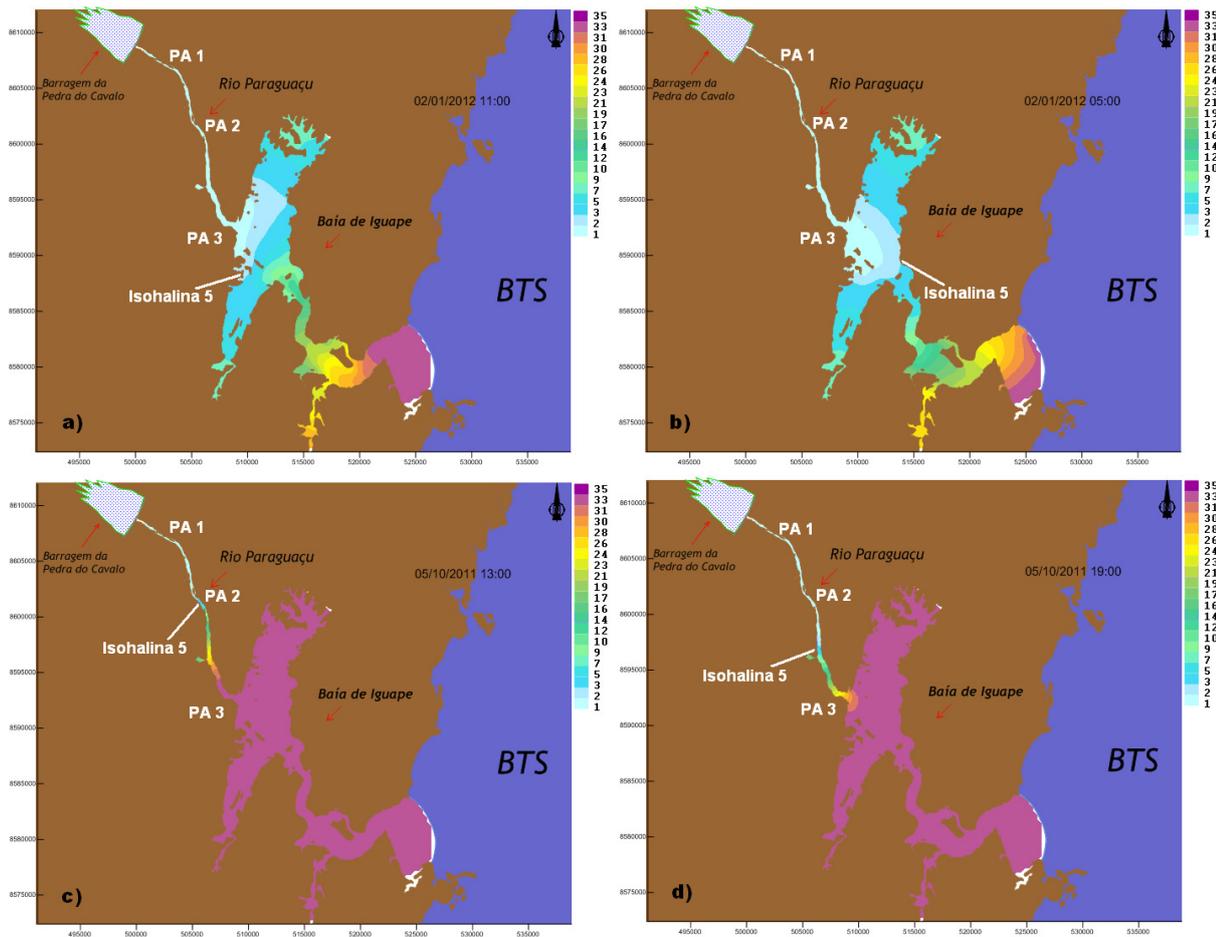


Figura 69 – Perfil longitudinal de Salinidade (%) para o cenário ano úmido e nas condições: a) maré de quadratura – período de cheia – preamar; b) maré de quadratura – período de cheia – baixa-mar; c) maré de quadratura – período de estiagem – preamar. d) maré de quadratura – período de estiagem – baixa-mar

Os resultados da simulação de salinidade demonstraram que em condições de maré de sizígia, período característico de cheias e durante o ciclo de maré, a isohalina de 5‰ não penetra no baixo curso do rio Paraguaçu, enquanto que, no período de estiagem e sob as mesmas condições, penetra cerca de 13 km variando até 7 km, em razão do ciclo de maré.

Em condições de maré de quadratura para o período de cheia a isohalina de 5‰ não penetra no baixo curso do rio Paraguaçu, localizando-se à jusante do trecho e no período de estiagem a intrusão salina penetra no máximo 10 km variando até 7 km, em razão do ciclo de maré. Os valores mais altos de salinidade observados no trecho fluvioestuarino para o cenário ano úmido, foram na condição de maré de quadratura e período de estiagem, apesar da isohalina de 5‰ ter penetrado menor distância, comparada com a condição de sizígia no período de estiagem,

apresentando, no entanto, ampla faixa de salinidade, em função da baixa magnitude das vazões no período. Os menores valores foram registradas durante a maré de quadratura e período característico de cheias, em função de altas magnitudes de vazões defluentes, possibilitando a caracterização de ambiente oligohalino em grande parte do período, sendo favorável a manutenção do biota estenoalino, mais sensível a grandes variações ambientais.

As Figuras 70 e 71 representam o perfil longitudinal da salinidade para o cenário ano 2011-2012, nas condições de maré de sizígia e quadratura e nos períodos característicos de cheia e estiagem da região, sendo influenciado pelo ciclo de marés enchente e vazante.

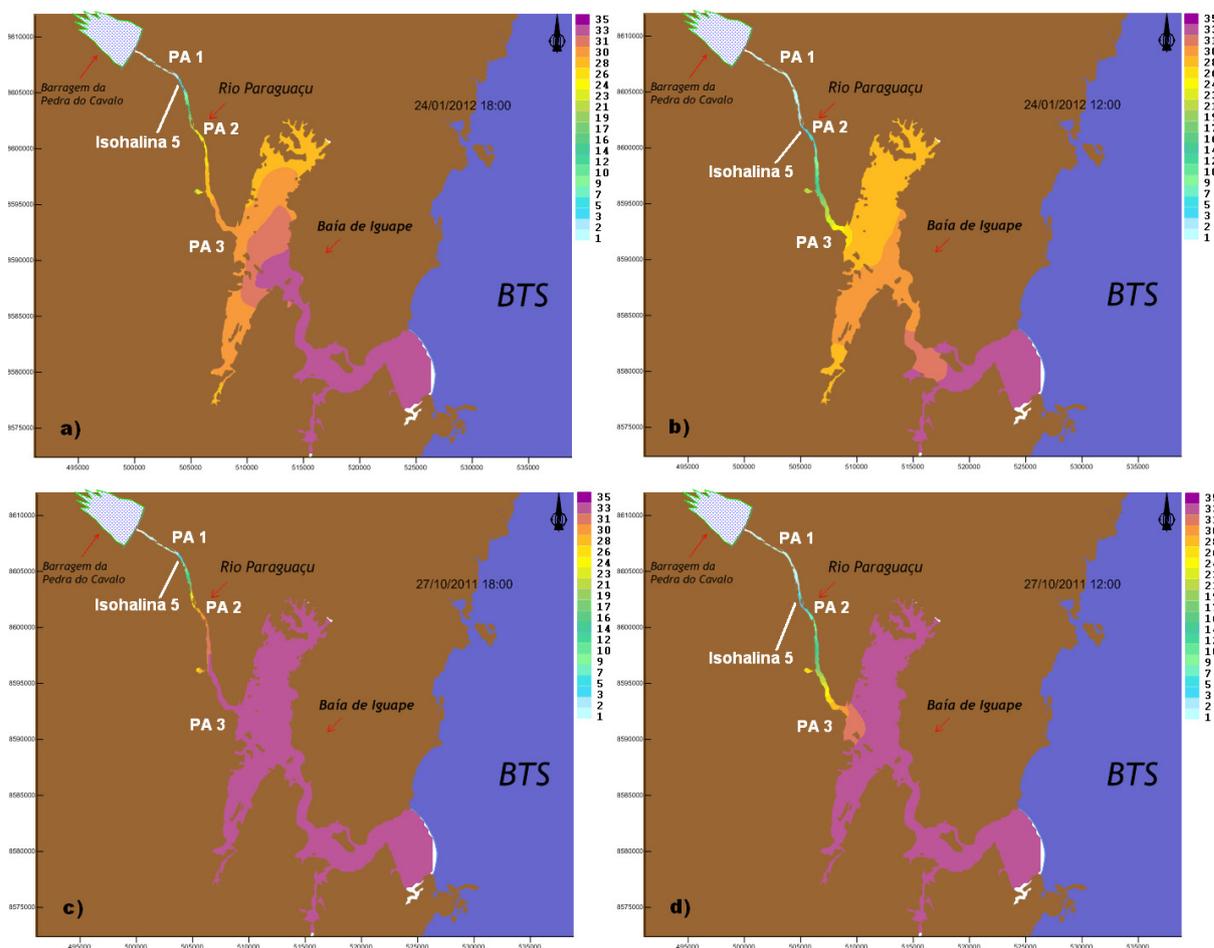


Figura 70 – Perfil longitudinal de Salinidade (%) para o cenário ano 2011-2012 e nas condições: a) maré de sizígia – período de cheia – preamar; b) maré de sizígia – período de cheia – baixa-mar; c) maré de sizígia – período de estiagem – preamar. d) maré de sizígia – período de estiagem – baixa-mar

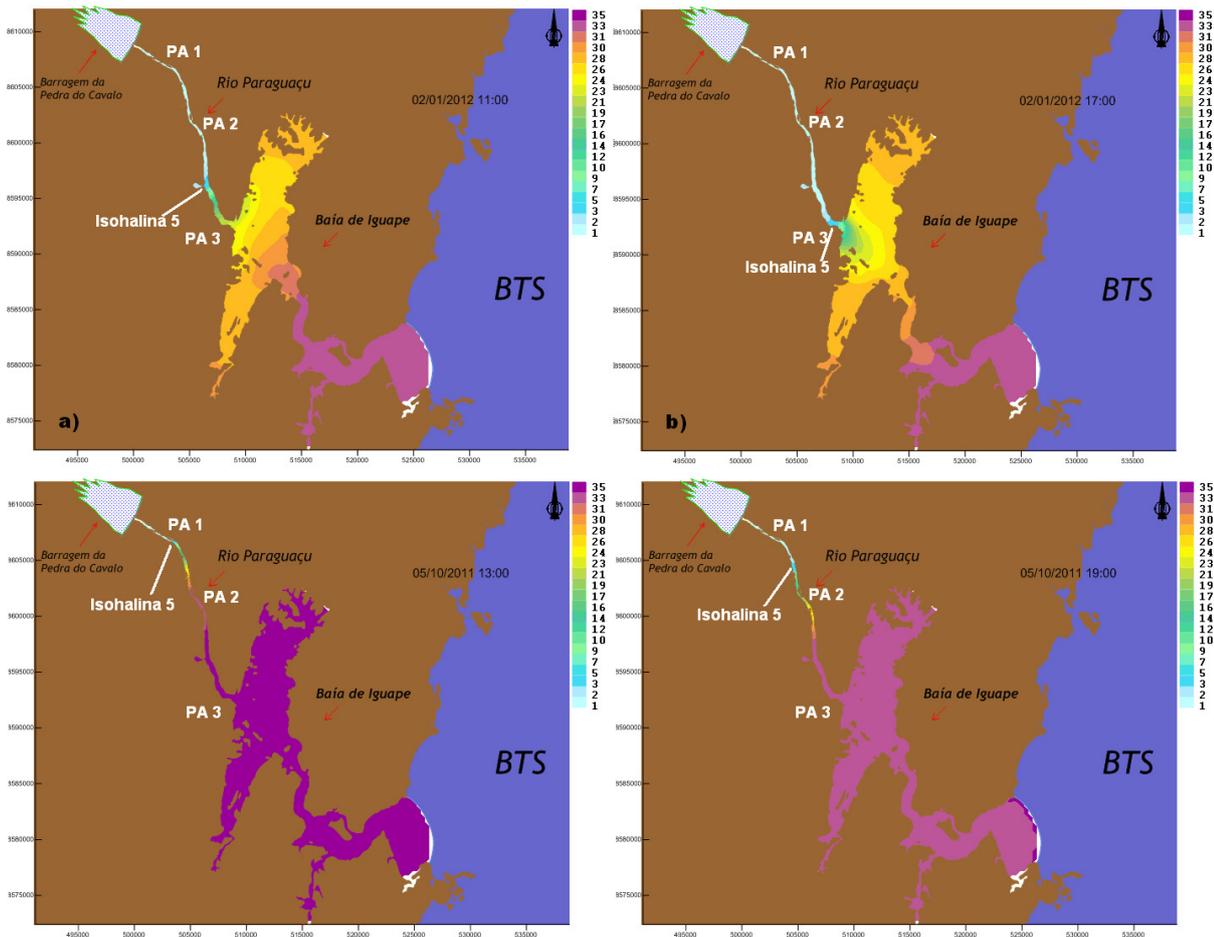


Figura 71 – Perfil longitudinal de Salinidade (‰) para o cenário ano 2011-2012 e nas condições: a) maré de quadratura – período de cheia – preamar; b) maré de quadratura – período de cheia – baixa-mar; c) maré de quadratura – período de estiagem – preamar; d) maré de quadratura – período de estiagem – baixa-mar

Os resultados da simulação de salinidade demonstraram que em condições de maré de sizígia, período característico de cheias e estiagem durante o ciclo de maré, a isohalina de 5‰ penetra no baixo curso do rio Paraguaçu atingindo até 16 km estuário acima, variando até 11 km, em razão do ciclo de maré.

Em condições de maré de quadratura para o período de cheia a isohalina de 5‰ penetra pouco no baixo curso do rio Paraguaçu cerca de 7 km, localizando-se próximo ao PA 3 variando até 2,5 km e no período de estiagem a intrusão salina penetra até o PA 1 cerca de 16 km variando até 13 km, em razão do ciclo de maré. Os valores mais altos de salinidade observados no trecho fluviestuário para o cenário ano 2011-2012, foi na condição de maré de sizígia e quadratura, ambos no período de estiagem, apresentando larga faixa de variação da salinidade, relacionada a baixa magnitude das vazões no período. E os valores mais baixos

foram registrados durante a maré de quadratura e período característico de cheias, em função de maior magnitude de vazões defluentes, possibilitando a caracterização de ambiente mixohalino variando a polihalino em grande parte do período, sendo favorável à manutenção do biota eurialino, adaptado a condições de alta variabilidade de salinidade.

5.2 CONDIÇÕES HIDROLÓGICAS DO CENÁRIO VAZÃO RESTRIÇÃO MÁXIMA

O hidrograma de restrição máxima é representado pelo regime de operação da usina até alcançar a vazão de $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mantendo-a durante 1 hora, regredindo em seguida, até a vazão zero (VOTORANTIM, 2013). O objetivo de se aplicar esta vazão é com o propósito de testar a vazão máxima que deve ser defluida pela usina, por exemplo, no processo de esvaziamento do reservatório para esperar o volume das cheias à montante, e que, por segurança, não ocorre o transbordamento de suas margens, inundando as cidades ribeirinhas.

O período selecionado para a simulação é caracterizado pela condição de maré de sizígia e segundo a DHN, a estação maregráfica do Porto de Madre de Deus – Bahia, registrou o nível mais alto da coluna de água no dia 26/10/2011 às 3h:08min, com elevação de 3,10 m e foi considerada como condição extrema para coincidir com o momento de pico da vazão de segurança.

A Figura 72 representa o hidrograma das vazões progressivas defluentes da usina para o cenário vazão restrição máxima, o nível de maré registrado pela estação do Porto de Madre de Deus-BA e os resultados das vazões simuladas para os pontos amostrais.

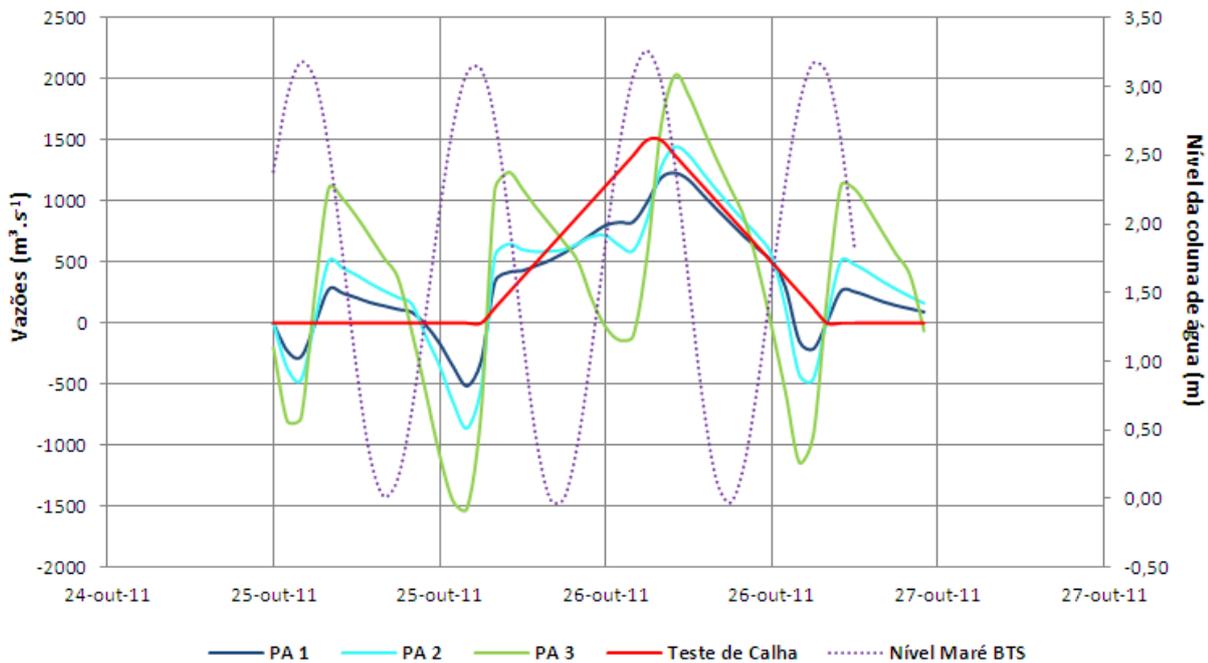


Figura 72 – Vazões simuladas utilizando o hidrograma defluente da barragem para o cenário vazão restrição máxima no trecho fluvioestuarino e no instante em que o nível de maré esteve mais alto

Observa-se que, durante o período em que a usina não deflui para o estuário, o comportamento do fluxo de maré exerceu influência em toda a região fluvioestuarina, e a partir do momento que a usina inicia a liberação da vazão para o estuário, registra-se a mudança do comportamento do hidrograma na região, passando a predominar a influência da vazão defluente no comportamento hidráulico nos PA 1, PA 2 e PA 3, modificando o sentido do escoamento para o estuário abaixo. Entretanto, a partir do instante em que as vazões começam a regredir e atingir magnitudes de $500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ocorre alteração do padrão hidrodinâmico e a região retorna a ser influenciada pela forçante de maré.

A Figura 73 representa o comportamento longitudinal da Salinidade (‰) simulada nos pontos amostrais durante o período de simulação do cenário vazão restrição máxima.

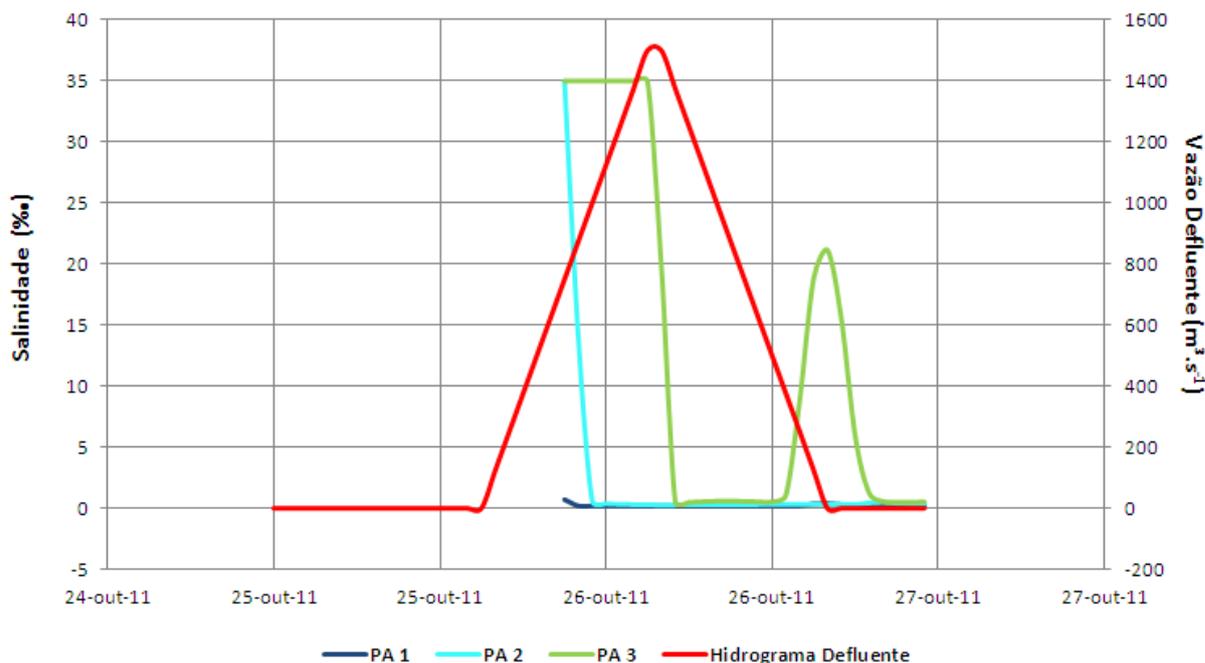


Figura 73 – Salinidade simulada utilizando o hidrograma defluente da barragem para a vazão restrição máxima no trecho fluvioestuarino

Nota-se a diminuição drástica da salinidade em todos os pontos amostrais, em função das características de água doce da massa de água liberada pela usina, com salinidade abaixo de 0,5‰ (BRASIL, 2005) aumentando o fator de diluição no estuário. Observa-se no PA 1 que a salinidade não varia. No PA 2, quando a vazão começa a alcançar magnitude de $800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a salinidade reduz, tornando a água doce. E no PA 3 quando chega a $1.400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ é que exerce impacto neste ponto, reduzindo a salinidade a níveis característicos de água doce, deslocando a isohalina de 5‰ para jusante do PA 3, modificando assim as características do trecho fluvioestuarino para ambiente límnico (VENICE, 1958).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo SisBaHiA representou bem o comportamento hidráulico, o transporte e a dispersão longitudinal dos sais no trecho fluvioestuarino, em relação aos cenários propostos pelo hidrograma ambiental, segundo se comprovou no processo de calibração e validação da modelagem .

A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho em relação à variação espacial e temporal da salinidade no trecho do baixo curso do rio

Paraguaçu, em função dos cenários propostos pelo hidrograma ambiental correspondente ao período hidrológico simulado (1º de outubro de 2011 a 30 de setembro de 2012):

- Cenário Ano Seco:

No período característico de cheias, em condição de maré de sizígia, há intrusão salina (isohalina 5‰) numa extensão de aproximadamente 14 km na preamar (5 a 31‰) no trecho fluvioestuarino, nas proximidades do PA 1, variando até 10 km na baixa-mar (5 a 26‰). No período de estiagem a intrusão salina alcança o limite de influência do estuário, cerca de 18 km na preamar à montante do PA 1, variando até 16 km na baixa-mar, em função do ciclo de maré, ampliando a faixa de variação de salinidade (5 a 35‰) em todo o trecho fluvioestuarino do rio Paraguaçu.

Em condições de maré de quadratura para os períodos de cheia a intrusão salina (isohalina 5‰) penetra no máximo 11 km na preamar (5 a 30‰) variando até 7 km, na baixa-mar (5 a 23‰). Na estiagem a intrusão salina alcança 15 km na preamar (5 a 35‰), variando até 12 km na baixa-mar (5 a 30‰).

Portanto, os valores mais altos de salinidade observados no trecho fluvioestuarino para o cenário ano seco, se referem à condição de maré de sizígia e período de estiagem, relacionado a baixas vazões defluentes no período. Em relação aos valores mais baixos, estes ocorreram durante a maré de quadratura e período de cheia, devido a maiores vazões defluentes, caracterizando o ambiente como mixohalino e permitindo o desenvolvimento do biota eurialino.

- Cenário Ano Úmido:

No período característico de cheias, em condição de maré de sizígia, não há intrusão salina (isohalina 5‰) no trecho fluvioestuarino do baixo curso do rio Paraguaçu, mantendo suas águas como doces, enquanto que, no período de estiagem e sob as mesmas condições, a isohalina penetra cerca de 13 km na preamar (5 a 30‰), variando até 7 km na baixa-mar (5 a 10‰).

Em condições de maré de quadratura para os períodos de cheia também não há intrusão salina no trecho, enquanto que na estiagem a intrusão salina alcança 10 km (5 a 35‰), variando até 7 km (5 a 28‰) em função do ciclo de maré.

Assim, no ano úmido, no período característico de cheias, tanto em condições de maré de sizígia como de quadratura e independente do ciclo de maré o trecho fluvioestuarino mantém-se em condições de ambiente límnico. No período de estiagem, relacionado a baixas vazões defluentes, ocorre acentuada amplitude da faixa de salinidade em maré de quadratura na condição de preamar ao longo do curto trecho de 10 km e em maré de sizígia ao longo de 13 km.

- Cenário Ano 2011-2012:

Tanto no período de cheias como no período de estiagem, em condição de maré de sizígia, há intrusão salina numa extensão de aproximadamente 16 km no trecho fluvioestuarino, nas proximidades do PA 1 (5 a 28‰) e (5 a 35‰), respectivamente, variando até 11 km, proximidades do PA 2 (5 a 24‰) e (5 a 30‰), respectivamente.

Em condições de maré de quadratura para os períodos de cheia a intrusão salina penetra no máximo 7 km (5 a 21‰), variando até 2,5 km (5 a 7‰), nas proximidades do PA 3. Na estiagem, a intrusão salina alcança 16 km (5 a 35‰), nas proximidades do PA 1, variando até 13 km (5 a 33‰) em função do ciclo de maré.

Conclui-se assim que os valores mais altos de salinidade observados no trecho fluvioestuarino para o cenário ano 2011-2012, se referem à condição de maré de quadratura e período de estiagem, relacionado a baixas vazões defluentes no período e o ciclo de maré local. Em relação aos valores mais baixos, estes ocorreram durante a maré de quadratura e período de cheia, devido a maiores vazões defluentes e o ciclo de maré, caracterizando o ambiente no período de cheias como mesohalino e como polihalino no período de estiagem, permitindo o desenvolvimento do biota eurialino.

- De modo geral conclui-se que a variabilidade ambiental em função dos cenários Ano Seco e Ano Úmido foi mantida, o que não ocorreu no Cenário Ano 2011-2012 em função da baixa magnitude das vazões aplicadas em regime operacional uniforme pela usina.

7. RECOMENDAÇÕES

Considerando que, os hidrogramas operacionais da Votorantim tem ciclos de 24 horas, e possui vazão $Q = 0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em grande parte do período do dia, objetivando o atendimento a restrição de vazão sanitária que é a de média diária de $\sim 3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e deflui vazão $Q = 40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante 2 horas e considerando que os ciclos de maré vão mudando de fase a cada dia, seguindo mais ou menos o dia lunar que tem 24 horas e 50 minutos, torna-se fácil verificar que em cada dia a descarga da Votorantim encontra uma situação diferente de níveis e correntes no rio Paraguaçu.

Portanto, torna-se interessante descrever e analisar o comportamento do estuário, destacando-se as diferenças de fase entre vazão (Q) e as correntes e níveis de maré no Rio Paraguaçu. E, as consequências destas diferenças nos níveis, correntes e padrões de salinidade no Paraguaçu, devido às diferenças de descargas da usina entre as correntes de enchente e de vazante variando ao longo dos dias.

Recomenda-se também, a realização de medições hidráulicas a exemplo de perfil de correntes, profundidade e nível da coluna de água em todos os pontos amostrais, possibilitando o confronto dos dados medidos com os dados simulados, permitindo a melhoria da qualidade da calibração e validação da modelagem.

Finalmente, recomenda-se a permanência do monitoramento das características hidráulicas e parâmetros de qualidade da água no estuário do rio Paraguaçu, visando manter registros históricos do comportamento hidrodinâmico e perfil da salinidade da região, subsidiando o estudo de possíveis impactos de barramento à montante de estuários, ocasionados pela regularização do aporte de água doce no ambiente.

8. REFERÊNCIAS

- ALBER, M. *A Conceptual Model of Estuarine Freshwater Inflow Management*. Rev. *Estuaries*, Vol 25, n° 6B, p.1246-1261, 2002.
- BRASIL. 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, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989*. Diário Oficial da União, Brasília, DF.1997.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. *Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências*. Publicação DOU n. 53, de 18/03/2005, pag. 58-63. Brasília, 2005.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Caderno da região hidrográfica Atlântico Leste – Secretaria de Recursos Hídricos*. Brasília: MMA, 2006. 156 p
- BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. *Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000*. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 20 de setembro de 2010.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Relatório ANEEL 2011*. Brasília: ANEEL, 2012. 108p. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Relatorio_Aneel_2011.pdf Acessado em: 19 de março de 2013.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Contrato de concessão nº 19/2002 – ANEEL - AHE Pedra do Cavalo de uso de bem público para geração de energia elétrica, que celebram a união e a Votorantim Cimentos Lda. Brasília-DF: 23 de Abril de 2002. 18p.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. *Relatório de cadastro de barragens outorgadas pela ANA*. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cadastros/cnbarragens.aspx>. Acessado em 29 de junho de 2012.
- BAHIA. INEMA - Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado da Bahia. *Inventário das barragens do Estado da Bahia. 2011*. Disponível em: http://www.inema.ba.gov.br/servicos/mapas-tematicos?dl_page=2. Acessado em: 20 de junho de 2012.
- BARROSO JUNIOR, V. *Metodologia para Geração de Cartas de Correntes de Maré em Sistemas Estuarinos e Recintos Portuários com Aplicação na Baía*

- de Todos os Santos - BA*. 2009. 157 p. Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ, M.Sc, Engenharia Oceânica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- CIRANO, M. & LESSA, G.C. *Oceanographic characteristics of baía de todos os santos, Brazil*. Revista Brasileira de Geofísica Vol. 25 (4): p.363-387. 2007.
 - COELBA - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia S/A & CNO - Construtora Norberto Odebrecht S/A. *Estudos de Viabilidade da Motorização da Barragem de Pedra do Cavalo - Rio Paraguaçu, Bahia*. VOLUME V - MEIO FÍSICO. 2000.
 - COLLIER, M., WEBB, R.H., SCHMIDT, J. C. *Dams and River: A Primer on the downstream Effects of Dams*. United State Geological Survey. Circular 1126. 2. ed. 2000. p.94.
 - COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica em grandes bacias*. 2001. p.194. Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre - RS.
 - COLLISCHONN, W., *Introduzindo Hidrologia*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. Porto Alegre, RS. 2008.
 - CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T.; (orgs.) in: *Geomorfologia: Uma Atualização de Base e Conceitos*. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 9. ed. 2012. p.474.
 - CONSÓRCIO HYDROS / CH2MHILL / COOPETEC. *Estudos de diagnóstico e prognóstico ambientais para a BTS*. 1999/2000 (Ref. ET-170377/PENO-565).
 - CONSÓRCIO HYDROS / CH2MHILL / COOPETEC. *Modelagem computacional para análise de aspectos dos sistemas de disposição oceânica da área metropolitana de Salvador, Ba*. 2003/2004 (PEN0-4144-RF).
 - CONSÓRCIO HYDROS / CH2MHILL / COOPETEC. *Modelagem computacional para análise de aspectos da dinâmica de sedimentos na Baía de Todos os Santos, Ba*. 2003 (PEN0-4145-RF).
 - CONSÓRCIO HYDROS / CH2MHILL / COOPETEC. *Suporte ao monitoramento ambiental da área de influência do emissário submarino do Rio Vermelho - Salvador, Ba*. 2008 (PEN0-7106-RF).
 - DYER, K. R., *Sediment transport processes in Estuaries: in: Geomorphology and Segimentology of Estuaries*. G.M.E. Perillo (Ed) development in Sedimentology, 53 Elsevier Science. 1995 p.423-449.
 - DRONKERS, J, *Tidal Asymetri and estuarine morphology*. Netherlands journal of Sea Research 20 (2/3) 1986. p.117-131.
 - DYER, K. R., *Estuaries: A Physical Introduction*. 2nd ed. Chichester, England, John Wiley & Sons Ltd, 1997. p.195.

- ESTEVEZ, E. D. *Review and assessment of biotic variables and analytical methods used in estuarine inflow studies*. Rev. Estuaries vol.25, p.1291-1303, 2002.
- FEMAR - Fundação Estudos do Mar. *Estações Maregráficas do Brasil*. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br/#> Acessado em: 12 de novembro de 2013.
- FLANNERY, M.S., PEEBLES, E.B., MONTGOMERY, R.T. *A percent-of-flow approach for managing reductions of freshwater inflows from unimpounded rivers to Southwest Florida estuaries*. Rev. Estuaries. Vol. 25 (6B), p.1318-1332, 2002. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1352860>. Acessado em: 19 de março de 2014.
- GENZ, F. *Avaliação dos efeitos da barragem Pedra do Cavalo sobre a circulação estuarina do Rio Paraguaçu e Baía de Iguape*. 2006. 266 p. Tese Doutorado - Curso de pós-graduação em Geologia, UFBA, Bahia. Disponível em: <http://www.goat.fis.ufba.br/uploads/userfiles/31.pdf>. Acessado em: 26 de maio de 2012.
- GEOGRAFAR - A Geografia dos Assentamentos na Área Rural (UFBA/CNPq). *Inventário Socioambiental de Barragens no Estado da Bahia. Barragens em Processo de Construção*, 2012. Disponível em: <http://www.geografar.ufba.br>. Acessado em: 27 junho de 2012.
- GEOGRAFAR - A Geografia dos Assentamentos na Área Rural (UFBA/CNPq). *Inventário Socioambiental de Barragens no Estado da Bahia. Barragens com Conflitos Socioambientais*, 2012. Disponível em: <http://www.geografar.ufba.br>. Acessado em: 27 de junho de 2012.
- GERMANI, G. I.; DINIZ, E. L.; OLIVEIRA, G. G. de; MATTOS, P. A.; MOURA, P. V.; AGUIAR, J. H. S. *O processo de construção de açudes e barragens no Estado da Bahia: o Inventário Socioambiental das Barragens na Bahia*. Pará. In: III ENCONTRO LATINOAMERICANO CIÊNCIAS SOCIAIS E BARRAGENS. 2012.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. *Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 24. Suplemento - Folha SD.24 – Salvador. Potencial dos Recursos Hídricos*. Rio de Janeiro, 1999. ISBN 85-240-0631-5. 236 p.
- ICOLD - International Commission on Large Dams. *History of the World Register of Dams* by W. Flögl. 2011.
- INEMA/UFBA. *Relatório Intermediário 1 (RI1), referente ao Projeto Estudo do Regime de Vazões Ambientais a Jusante da UHE de Pedra do Cavalo – Baía de Iguape. Volume 1 - Diagnostico e Identificação do Problema*. Contrato n° 012/09 entre INGÁ e UFBA. Salvador-BA, 2010.
- INEMA/UFBA. *Relatório Intermediário 3 (RI3), referente ao Projeto Estudo do Regime de Vazões Ambientais a Jusante da UHE de Pedra do Cavalo – Baía de Iguape. Volume 3 - Aspectos biológicos, hidráulicos, hidrológicos*

- e qualidade das águas*. Contrato n° 012/09 entre INGÁ e UFBA. Salvador-BA, 2013a. 236p.
- INEMA/UFBA. *Relatório Intermediário 4 (RI4), referente ao Projeto Estudo do Regime de Vazões Ambientais a Jusante da UHE de Pedra do Cavalo – Baía de Iguape. Volume 4 - Relatório de Síntese - Documento base para oficina de proposição do hidrograma ambiental*. Contrato n° 012/09 entre INGÁ e UFBA. Salvador-BA, 2013b. 267p.
 - INEMA/UFBA. *Relatório de campanha de campo e simulação hidrodinâmica, medição e simulação de correnteza e parâmetros hidrográficos no estuário do rio Paraguaçu-ba*. Contrato n° 012/09 entre INGÁ e UFBA. Salvador-BA, 2013c. 48p.
 - INEMA/UFBA. *Proposta de Plano de Operação da UHE de Pedra do Cavalo referente a vazão ambiental e Seminário de apresentação dos resultados*. Contrato n° 012/09 entre INGÁ e UFBA. Salvador-BA, 2014. 24p.
 - KING, J.M., THARME, R.E. & VILLIERS, M.S. *Environmental Flow Assessments For Rivers: Manual For The Building Block Methodology*. WRC Report N° 131/00. Fresh Research Unit. University of Cape Town. South Africa, July, 2008.
 - KJFERVE, B. *Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography*. In: John W. Day Jr, Charles A. S. Hall, Dr. W Michael Kemp e Alejandro Yáñez-Arancibia. Ed(s). *Estuarine Ecology*. Canada: John Wiley & Sons, Inc. 1989. Cap. 2, p.47-78.
 - LESSA, G.C., DOMINGUEZ, J.M.L., BITTENCOURT, A.C.S.P., BRICHTA, A. *The Tides and Tidal Circulation of Todos os Santos Bay, Northeast Brazil: a general characterization*. In: Academia Brasileira de Ciências. Anais Vol. 73(2): 2001. 245-261 p.
 - LESSA, G.C., CIRANO, M., GENZ, F., TANAJURA, C.A. S., SILVA, R. R. da., *Oceanografia Física* In: HATJE, V. e ANDREADE, J. B. de (Orgs). *Baía de Todos os Santos: Aspectos Oceanográficos*, Salvador-BA. Ed. EDUFBA. 2009. Cap.III 67-119 p.
 - LIMA G.M.P & LESSA G.C. *The fresh-water discharge in Todos os Santos Bay and its significance to the general water circulation*. Revista Pesquisas. Porto Alegre-RS, Vol. 28. 2002. p. 85-98.
 - LIMA G.M.P., LESSA G.C., FRANKLIN, T.S. *Avaliação dos impactos da barragem de Santa Helena no trecho estuarino do rio Jacuípe, litoral norte da Bahia - Brasil*. In: Quaternary and Environmental Geosciences. Vol. 2, N° 1. 2010. p. 40-54.
 - MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B.; *Princípios de oceanografia física de estuários*. EDUSP - Editora da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 2002. 424 p. ISBN: 85-314-0675-7.

- NICHOLS, M.M., BIGGS, R.B. *Estuaries. In: Davis, R.A. (Ed.). Coastal Sedimentary Environments*. Berlin. Springer-Verlag. 1985. p. 77-186.
- PALMA, E. G. A. *Gestão do território em Unidades de Conservação: o caso da APA Lago Pedra do Cavalo*. Monografia do curso de Especialização em Geografia do Semi-Árido Brasileiro - Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS: Feira de Santana, 2002.
- PERILLO, G. M. E. *Definitions and Geomorphologic Classification of Estuaries. In: Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Chapter 2. Developments in Sedimentology. Vol. 53. 1995. p. 17-47.*
- POWELL, G.L., MATSUMOTO, J., BROCK, D.A. *Methods for Determining Minimum Freshwater Inflow Needs of Texas Bays and Estuaries*. *Rev. Estuaries*. Vol 25, 6B, p. 1262-1274, 2002.
- RAMOS, M. A. B. *Estudos Geoquímicos Relativamente à Dinâmica de Marés no Estuário Lagunar do Rio Paraguaçu – Bahia – Brasil*. 1993. 96 p. Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Geociências, UFBA, Bahia.
- ROSMAN, P. C. C., CUNHA, C. L. N., CABRAL, M. M. *et al. Referência Técnica do SisBaHiA*. COPPE /UFRJ. Programa de Engenharia Oceânica, Rio de Janeiro, RJ. Versão 9.2, 2013. 249 p. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V92.pdf. Acessado em: 15 de abril de 2013.
- SCHETTINI, C.A.F. *Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC*. In: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH*. Volume 7, Nº 1, p.123-142. 2002.
- SILVA, A. F. da. *Características Hidrodinâmica do Estuário da Beira, Moçambique*. 2011. 118 p. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Oceânica, COOPE. UFRJ, Rio de Janeiro.
- SILVA, L. S. *Estudo Numérico da Circulação e da Estrutura Termohalina no Canal de São Sebastião - São Paulo*. 2001. 276 p. Tese Doutorado. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SKLAR F.H., BROWDER, J.A. *Coastal Environmental Impacts Brought About by Alterations to Freshwater Flow in the Gulf of Mexico*. *Environmental Management*, 22. (4): p. 547-562. 1998.
- STEWART, R. H. *Introduction to Physical Oceanography*. Department of Oceanography Texas A & M University. Copyright 2003 ed.
- TOPÁZIO E.F. *Modelagem de plumas do emissário com T_{90} variável na costa oceânica de Salvador-BA*. 2003. 129 p. Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ, M.Sc, Engenharia Oceânica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

- TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: EDUSP. 1993. 943 p.
- TUCCI, C.E.M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Associação Brasileira de Recursos Hídricos: EDUSP. 1998. 669 p.
- UNESCO technical papers in marine science nº 37 “*Background papers and supporting data on the Practical Salinity Scale 1978*”, publish in 1981
- VENICE System. *Symposium on the classification of brackish Waters*, Venice. Archives Oceanography and Limnology, Vol.11, Nº supplement. 1958. 1-248p.
- VOTORANTIM ENERGIA - Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo, 2009. *Plano Operativo da UHE Pedra do Cavalo*. São Paulo, 2009. 20 p.
- VOTORANTIM ENERGIA - Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo, 2010. *Relatório consolidado dos programas ambientais da UHE Pedra do Cavalo. Programas do meio físico: hidrologia, geologia, sedimentologia, estudo de vazões, salinidade e qualidade da água. Programas do meio biótico: Comunidades planctônicas e bentônicas, ictiofauna e manejo pesqueiro*. São Paulo, Revisado Abril/2010. 491 p.
- VOTORANTIM ENERGIA - Usina Hidrelétrica Pedra do Cavalo. *Plano Operativo da UHE Pedra do Cavalo*. São Paulo, 2013.
- XAVIER A.G. *Análise da Hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos – BA*. 2002. 222 p. Tese Doutorado (COPPE/UFRJ, D.Sc, Engenharia Oceânica) Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.