



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS
TROPICAIS
MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS

FRANCISCO RAFAEL DE LIMA XAVIER

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA DO RIO JAGUARIBE UTILIZANDO O
MODELO NUMÉRICO DELFT3D

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

X19a Xavier, Francisco Rafael de Lima.

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA DO RIO JAGUARIBE UTILIZANDO O MODELO
NUMÉRICO DELFT3D / Francisco Rafael de Lima Xavier. – 2019.
103 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar,
Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Hidrodinâmica. 2. Modelagem numérica. 3. Dinâmica estuarina. 4. Tempo de Residência.
I. Título.

CDD 551.46

FRANCISCO RAFAEL DE LIMA XAVIER

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA DO RIO JAGUARIBE UTILIZANDO O MODELO
NUMÉRICO DELFT3D

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Marinhas Tropicais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de Concentração: Multidisciplinar

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A minha família pelo apoio e incentivo a continuar aprimorando meus conhecimentos.

Agradeço, ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira pela confiança depositada em mim para a realização desse trabalho, por todos os ensinamentos, apoio e excelente orientação.

A Marcella, por ter aguentado ouvir todo o meu trabalho repetidas vezes, mesmo sem entender do que se tratava.

Aos amigos do Laboratório de Oceanografia física (LOF) que me acompanharam ao longo desse caminho. Bárbara, Gabriela, Airton, Gustavo, Ítele, Ivo e todos os outros, pelas conversas, risadas, momentos alegres e de desespero e pelo aprendizado compartilhado. Vocês tornam o LOF um local extremamente acolhedor e divertido.

Ao Prof. Dr. Francisco José da Silva Dias, ao Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI) e ao Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO) por disponibilizarem os dados utilizados para validar este trabalho.

“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

O estuário do Rio Jaguaribe, localizado no estado de Ceará, apresenta durante período chuvoso circulação clássica, enquanto que no período seco o estuário torna-se hipersalino. Devido ao déficit de água na região, construções como barragens e açudes são necessárias para um melhor uso dos recursos hídricos, porém modificam a dinâmica sedimentar no estuário e podem intensificar a hipersalinização. Este trabalho objetiva avaliar a hidrodinâmica e a sua variação espaço-temporal, considerando condições médias climatológicas e um cenário seco. O modelo Delft3D foi usado para simular a circulação hidrodinâmica durante um ano climatológico e um ano seco. Nos contornos abertos o modelo foi forçado por seis componentes de maré (M2, S2, N2, O1, K1 e P1) da região e a salinidade foi fixada em $37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Para forçar o modelo foram usados os padrões de vento local, e o fluxo climatológico de água em superfície e de vazões fluviais climatológicas. Os resultados de nível do mar foram validados com harmônicos de maré locais. As velocidades do modelo foram validadas com dados *in situ*, coletados no ano de 2009. O modelo apresentou boa correlação para as componentes de maré, corrente longitudinal e residual apresentando parâmetros $\text{skill} > 0,65$. A estratificação longitudinal de salinidade também mostrou boa correlação com a literatura. A circulação estuarina foi dominada pela descarga fluvial durante o período chuvoso, possuindo um padrão de circulação unidirecional ao longo do canal, podendo tornar-se bi-direcional na entrada do estuário. Durante o período seco, os dois cenários apresentaram um padrão bi-direcional, mostrando a influência da maré sobre a circulação estuarina. Com a presença de vazão fluvial, o sistema estuarino apresentou uma configuração clássica, enquanto que no período em que as vazões fluviais foram cessadas o estuário se tornou hipersalino, com valores de salinidade chegando a $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ a montante. A vazão fluvial mostrou forte influência sobre o tempo de residência de partículas dentro do estuário, fazendo com que as partículas saíssem do sistema em 18 horas, durante o período chuvoso, ou fossem acumuladas a montante do estuário, durante o período seco sem vazão fluvial.

Palavras-chave: Hidrodinâmica. Modelagem numérica. Dinâmica estuarina. Tempo de Residência.

ABSTRACT

The Jaguaribe River estuary, located in Ceará state, Brazil, shows a classical estuarine circulation during the rainy season. During the dry season, the estuary became hypersaline. The consequent water deficit in the region led to the construction of weirs and dams, which may intensified the problems of hypersalination and changed the sediment dynamics within the estuary. The main goal is to characterize the overall hydrodynamics and its spatio-temporal variation, considering average climatological conditions and dry conditions. The Delft3D model was used to simulate the circulation during one climatological year and a dry year. The model was forced in the open boundaries with the four main tidal components (M2, S2, N2, O1, K1 e P1) for the region. The salinity at the boundaries were set to 37 ppt. Local winds, climatological discharge values and hydrological balance were used to force the model. The tidal sea level results from the model were validated with local tidal harmonics. The velocities from the model were compared with in situ data collected in 2009. The model show a good correlation for tidal components and longitudinal current, with skill > 0.65. The vertical stratification of salinity also showed a good correlation in comparison with the literature. The estuarine circulation was dominated by the fluvial discharge during the wet period, having a unidirectional circulation pattern along the channel, which can become bi-directional at the entrance of the estuary. During the dry period, even with small river discharge a bi-directional circulation occurred, showing the influence of the tidal circulation on the estuary total circulation. During the period in which the system presented river discharge, the estuary presented a classic classical configuration, while in the period that the river discharge was stopped the estuary became hypersaline, with salinity values reaching 40 ppt upstream. The river discharge showed a strong influence on the residence time of particles inside the estuary, causing the particles to leave the system in 18 hours during the rainy period or accumulated upstream of the estuary during the dry period with no river discharge.

Keywords: Hydrodynamics. Numerical modeling. Morphodynamics. Estuary dynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização do estuário do rio Jaguaribe. As linhas vermelhas correspondem as interfaces entre o alto estuário e o médio estuário (AE/ME) e entre o médio estuário e o baixo estuário (ME/BE), onde os dados de ADCP foram coletados.	26
Figura 2 – Total de precipitação mensal para o ano de 2009 (laranja) e médias climatológicas de precipitação mensal (azul).	29
Figura 3 – Balanço hídrico climatológico.	30
Figura 4 – Fluxograma de interação dos módulos do modelo Delft3D.	34
Figura 5 – Esquematização de (A) um modelo- σ e (B) um modelo-z.	36
Figura 6 – Conjunto de pontos utilizados como domínio no modelo	38
Figura 7 – Resolução da grade.	39
Figura 8 – Disposição dos flutuadores ao longo da grade hidrodinâmica. Laranja - Alto estuário; Azul - Médio estuário; Vermelho - Baixo Estuário.	45
Figura 9 – Velocidade longitudinal observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009)	49
Figura 10 – Velocidade longitudinal observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009).	50
Figura 11 – Velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009). As linhas verticais denotam o valor médio da coluna d'água.	51

Figura 12 – Velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009). As linhas verticais denotam o valor médio da coluna d’água.	51
Figura 13 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	53
Figura 14 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	53
Figura 15 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	54
Figura 16 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	54
Figura 17 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	55
Figura 18 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	55
Figura 19 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	56
Figura 20 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	56
Figura 21 – Média vertical das salinidades do modelo em um perfil longitudinal entre a desembocadura e 18 km a montante durante a preamar de sizígia do mês de agosto de 2009.	59

Figura 22 – Variação longitudinal da salinidade encontrada por Schettini <i>et al.</i> (2014a) entre a desembocadura e 35 km a montante do estuário do Rio Jaguaribe. Dados médios da coluna d’água.	59
Figura 23 – Variação temporal da salinidade apresentada por Frota <i>et al.</i> (2013) para a região do médio Jaguaribe para o mês de novembro do ano 2009 em um ponto coletado no médio estuário.	60
Figura 24 – Variação temporal da salinidade modelada para a região do médio Jaguaribe.	61
Figura 25 – Magnitude e direção da velocidade média ao longo do estuário, durante a enchente de uma maré de sizígia do período chuvoso, para os cenários com vazões climatológicas. Interface ME/BE (A) e interface AE/ME (B).	63
Figura 26 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (Abril) para o cenário com vazões climatológicas.	64
Figura 27 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (Novembro) para o cenário com vazões climatológicas.	65
Figura 28 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (abril) para o cenário com vazões climatológicas.	66
Figura 29 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (novembro) para o cenário com vazões climatológicas.	67
Figura 30 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (abril) para o cenário seco.	69

Figura 31 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (novembro) para o cenário seco.	70
Figura 32 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (abril) para o cenário seco.	71
Figura 33 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (novembro) para o cenário seco.	73
Figura 34 – Concentração de flutuadores no cenário climatológico para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de abril. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).	77
Figura 35 – Concentração de flutuadores no cenário climatológico para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de novembro. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).	78
Figura 36 – Concentração de flutuadores no cenário climatológico para todo estuário do rio Jaguaribe durante o mês de abril (A) e novembro (B). As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas dentro ou fora do estuário (plataforma).	79

Figura 37 – Concentração de flutuadores no cenário seco para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de abril. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).	83
Figura 38 – Concentração de flutuadores no cenário seco para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de novembro. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).	84
Figura 39 – Concentração de flutuadores para todo estuário do rio Jaguaribe no cenário seco durante o mês de abril (A) e novembro (B). As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma). . . .	85
Figura 40 – Variação longitudinal da salinidade durante a baixa-mar (A) e preamar (B) de sizígia do mês de abril para o cenário com vazões climatológicas.	87
Figura 41 – Estratificação vertical da média de salinidade para o mês de abril (A e B, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) e o mês de novembro (C e D, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) para o cenário climatológico.	88
Figura 42 – Variação longitudinal da salinidade durante a baixa-mar (A) e a preamar (B) de sizígia do mês de novembro para o cenário com vazões climatológicas.	89

Figura 43 – Estratificação vertical da média de salinidade para o mês de abril (A e B, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) e o mês de novembro (C e D, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) para o cenário seco.	90
Figura 44 – Variação longitudinal da salinidade durante a preamar (A) e a baixamar (B) de sizígia do mês de abril com vazões para o cenário seco. .	91
Figura 45 – Tempo de hiper-salinização do estuário para o cenário seco, após cessadas as vazões.	92
Figura 46 – Variação longitudinal da salinidade durante a preamar (A) e a baixamar (B) de sizígia do mês de novembro com vazões para o cenário seco.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2 – Vazões médias mensais usadas nas simulações do cenário climatológico (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2018) e do cenário seco (CAVALCANTE, 2018).	32
Tabela 3 – Harmônicos de maré para o Rio Jaguaribe	33
Tabela 4 – Descrição dos módulos utilitários do Delft3D-FLOW	37
Tabela 5 – Parâmetros físicos constantes utilizados nas simulações.	43
Tabela 6 – Comparação entre as amplitudes dos harmônicos de maré modelados e observados.	47
Tabela 7 – Comparação entre as frequências dos harmônicos de maré modelados e observados.	47
Tabela 8 – Comparação dos máximos valores da corrente longitudinal média da seção em superfície modelada e observada, na interface AE/ME e ME/BE, durante o período seco (Novembro/2009).	48
Tabela 9 – Diferença de magnitude entre a corrente longitudinal média em superfície modelada e observada, na interface AE/ME e ME/BE, durante o período chuvoso com vazões de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	estado do Ceará
E	leste
ETP	evapotranspiração potencial
ETR	evapotranspiração real
FEMAR	Fundação de Estudos do Mar
FUNCEME	Fundação Cearense de Recursos Hídricos
Hg	mercúrio
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LGCO	Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica
LHiCEAI	Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores
NEB	Nordeste do Brasil
REQM	raiz do erro quadrático médio
SE	sudeste
Te	tempo de exposição
Tr	tempo de residência
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZC	zona costeira
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZM	zona de mistura estuarina
ZR	zona do rio

LISTA DE SÍMBOLOS

km	quilômetros
km^2	quilômetros quadrados
m	metros
m^2	metros quadrados
m^3	metros cúbicos
s	segundos
t	tonelada
z	coordenada vertical
ζ	elevação do nível do mar
d	profundidade abaixo do plano de referência
h	hora
ppt	Partes por mil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivos	24
2	ÁREA DE ESTUDO	25
2.1	Caracterização geral da região	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Elaboração da base de dados para o estuário do Rio Jaguaribe	28
3.1.1	<i>Dados de precipitação</i>	28
3.1.2	<i>Dados de evapotranspiração</i>	30
3.1.3	<i>Dados de vento</i>	31
3.1.4	<i>Dados de vazão</i>	31
3.1.5	<i>Regime de marés</i>	32
3.1.6	<i>Dados de Batimetria</i>	33
3.2	O modelo hidrodinâmico Delft3D	33
3.2.1	<i>O módulo Delft3D-FLOW</i>	34
3.3	Definição do domínio	37
3.4	Criação da grade numérica	37
3.5	Propriedades da grade numérica	38
3.5.1	<i>Ortogonalidade</i>	38
3.5.2	<i>Resolução</i>	39
3.6	Interpolação batimétrica	40
3.7	Condições de contorno	40
3.8	Calibração e Validação hidrodinâmica	40
3.9	Configuração do modelo	42
3.10	Tempo de residencia e tempo de exposição	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46

4.1	Validação do modelo numérico	46
<i>4.1.1</i>	<i>Nível do mar</i>	46
<i>4.1.2</i>	<i>Velocidade residual e longitudinal</i>	47
<i>4.1.3</i>	<i>Salinidade</i>	58
4.2	Cenários climatológico e seco	61
<i>4.2.1</i>	<i>Campos de velocidade</i>	61
<i>4.2.2</i>	<i>Tempo de residência e exposição</i>	74
<i>4.2.3</i>	<i>Salinidade</i>	86
5	CONCLUSÕES	96
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXOS	103
	ANEXO A – Tabela FEMAR	104

1 INTRODUÇÃO

As regiões costeiras são compostas por um conjunto de ecossistemas: manguezais, marismas, dunas, recifes de corais, lagunas, baías, deltas, estuários, costões, dentre outros. Todos esses ecossistemas desempenham um papel fundamental no que diz respeito às atividades humanas, apresentando uma alta taxa de produtividade, possuindo uma alta biodiversidade e oferecendo uma gama de recursos naturais e serviços vitais para o crescimento das populações. Diversas atividades humanas ocorrem nessa região, como indústrias, navegação, recreação, pesca entre outras, gerando diversos impactos, como a poluição oriunda dos grandes centros urbanos. (DAS, 1998; MANN, 2000; MOBERG; RÖNNBÄCK, 2003) .

As populações se desenvolveram em torno dos ecossistemas estuarinos, criando uma associação direta entre esses ecossistemas e questões econômicas, sociais e ambientais. Os estuários são regiões de transição entre o continente e o oceano gerando uma variação diária de salinidade e densidade, gerada pelo encontro de águas continentais com águas oceânicas. São ambientes altamente dinâmicos, possuem uma alta produtividade, servem de berçário natural, zona de alimentação e abrigo para diversas espécies de vertebrados e invertebrados (LACERDA; MARINS, 2002; MAIA *et al.*, 2006; GARRISON, 2010).

A primeira definição física de uma região estuarina classificava um estuário como um corpo de água costeiro semifechado, que possui uma livre conexão com o oceano aberto, onde a água do mar é diluída pela água da drenagem continental (CAMERON; PRITCHARD., 1963). Porém essa definição não contempla regiões onde o balanço hídrico pode se tornar negativo, como é o caso do Nordeste do Brasil (NEB). Potter *et al.* (2010) expandiu essa definição de estuários para contemplar não apenas regiões de climas temperados, mas também ambientes que possam apresentar períodos de estiagem, gerando regimes hipersalinos e periódicos fechamentos da conexão com o

mar, chegando a seguinte definição:

Estuário é um corpo costeiro parcialmente fechado que pode ser permanente ou periodicamente aberto com o oceano e o qual recebe ao menos um deságue periódico de um rio, e assim, enquanto sua salinidade é tipicamente menor do que a água do mar e varia temporalmente ao longo do seu comprimento, podendo tornar-se hipersalino em regiões onde a perda de água por evaporação é alta e as entradas de água doce e maré são desprezíveis.

A região do semi-árido brasileiro é bastante afetada pela sazonalidade da precipitação, apresentando episódios de seca e conseqüentemente um deficit hídrico. O Clima Tropical Quente Semiárido caracteriza grande parte do estado do Ceará (CE), influenciando significativamente os estuários da região (MARENCO *et al.*, 2015). Devido a essas características climáticas, uma rede de barramentos e reservatórios foi construída ao longo dos principais rios do estado com o intuito de aumentar a oferta hídrica (ÁGUAS, 2006).

As barragens perenizam os rios antes intermitentes, alteram as vazões naturais, reduzem a carga de sedimentos, alteram a circulação estuarina, modificam os processos de erosão e deposição, podendo também acarretar em irreversíveis quadros de hipersalinização (JIANG *et al.*, 2001; MARINS *et al.*, 2003; PINHEIRO; MORAIS, 2010; POTTER *et al.*, 2010). Outro problema associado aos barramentos é a deterioração da qualidade da água dos estuários, no estuário do Rio Jaguaribe, por exemplo, a redução das vazões fluviais causadas pelos barramentos e agravadas durante o período de seca acarretam uma maior acumulação do mercúrio (Hg), enquanto que em cenários com uma alta vazão fluvial esse Hg seria transportado pelos sedimentos para fora do estuário e acumulado na plataforma continental (LACERDA *et al.*, 2012).

A técnica de modelagem numérica é uma importante ferramenta para estudo de controle da poluição e da qualidade de água. Com a utilização da modelagem numérica pode-se obter uma representação da hidrodinâmica e paralelamente entendimento da evolução dos processos químicos, biológicos e geológicos que ocorrem em um sistema.

Modelos numéricos podem ser utilizados para diversos fins, como mostrar a dispersão da pluma de um emissário submarino (GREGORIO, 2009), representar a circulação termohalina, estrutura da circulação baroclinica e hidrodinâmica de um estuário tropical (ANDUTTA *et al.*, 2008) ou o transporte de sedimentos (LUO *et al.*, 2013; HU *et al.*, 2009). Dessa forma os principais motivos para se utilizar um modelo são:

- I) Auxiliar a compreensão sobre o comportamento de um sistema;
- II) Fazer previsões de possíveis cenários para o sistema estudado;
- III) Auxiliar nas tomadas de decisão, quanto a gestão desse sistema;
- IV) Gerar informações preliminares sobre um sistema.

Neste estudo utilizou-se o modelo Delft3D para estudar a hidrodinâmica do Rio Jaguaribe e determinar a sua importância nos processos de troca com a plataforma continental.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é avaliar a hidrodinâmica do estuário do Rio Jaguaribe e a sua variação espaço-temporal.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Implementar um modelo numérico tridimensional e baroclínico para a região estuarina do Rio Jaguaribe.
- Analisar as variações espaço-temporal do campo de salinidade e velocidade dentro do estuário;
- Analisar o tempo de residência do estuário;
- Determinar as principais forçantes da circulação em diferentes condições hídricas.

2 ÁREA DE ESTUDO

O rio Jaguaribe é o principal curso d'água do CE, com uma bacia de drenagem que ocupa cerca de 48% do território do estado, em km^2 . As condições hidrológicas peculiares dessa região, clima semi-árido e presença de barramentos, motivaram o presente estudo. A área de estudo é a região do estuário do rio Jaguaribe localizada na bacia hidrográfica do Baixo-Jaguaribe, litoral leste do CE. A área estuarina modelada estende-se até 20 km adentro do estuário a partir da sua foz. Possui seu limite superior no município de Aracati e seu limite inferior no município de Fortim (Figura 1). Para um melhor entendimento das características hidrodinâmicas da região é necessário uma avaliação preliminar das características climáticas, geológicas e geomorfológicas da área.

2.1 Caracterização geral da região

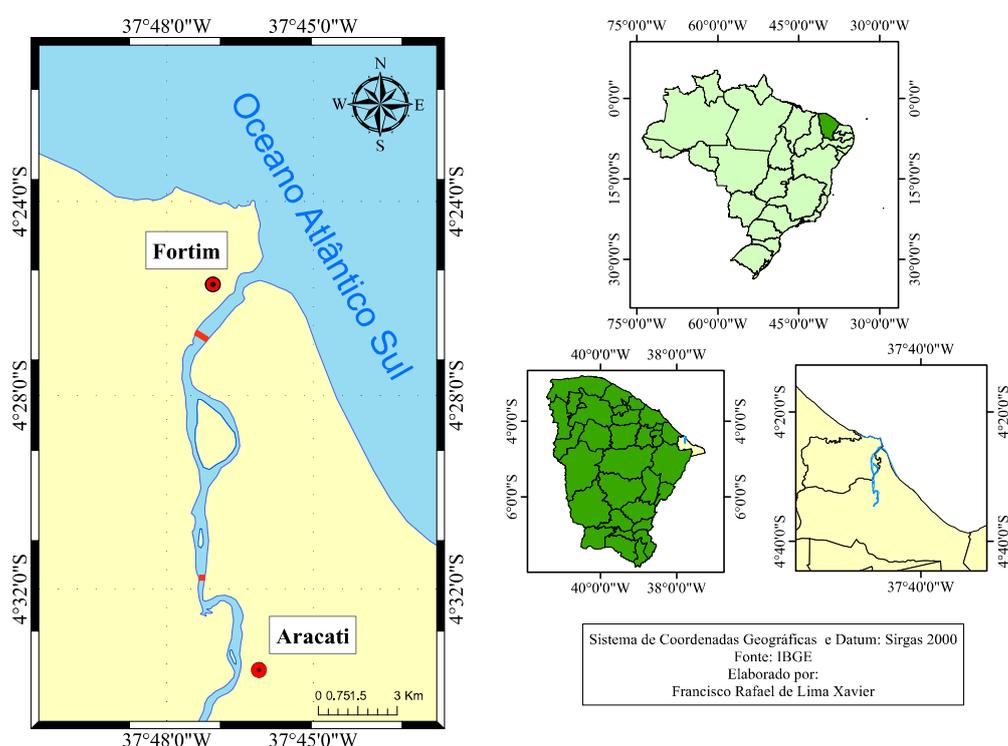
O CE encontra-se na região semi-árida do NEB. Essa região é caracterizada por apresentar elevadas temperaturas ao longo do ano e uma variação sazonal da precipitação, com dois períodos bem distintos. Essa sazonalidade no regime de chuvas acaba por resultar em um déficit hídrico entre os meses de julho e janeiro. O período chuvoso se estende de dezembro a maio, com precipitações concentradas no mês de abril e o período seco se estende de junho a novembro (AZEVEDO *et al.*, 1998; DIAS, 2007).

O regime pluviométrico é governado por sete mecanismos principais: i) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); ii) Influência das Frentes frias; iii) Ondas de leste; iv) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN); v) Complexos convectivos de meso-escala; vi) Brisa marinha; vii) Linhas de instabilidade (FERREIRA, 2005).

A ZCIT é o mecanismo mais importante para a precipitação do estado. Ela é formada pela confluência dos ventos alísios próximo ao equador, podendo ser caracterizada como um grande cinturão de nuvens que circunda o globo que varia de posição entre 15° norte e 4° sul ao longo do ano (FERREIRA, 2005; REBOITA *et al.*,

2010). A sua influência também atua sobre a precipitação e a nebulosidade dessa região, influenciando no padrão de ventos, que oscilam entre leste (E) e sudeste (SE), no primeiro e no segundo semestre, respectivamente (SILVA, 2004; SILVA *et al.*, 2010).

Figura 1 – Mapa de localização do estuário do rio Jaguaribe. As linhas vermelhas correspondem as interfaces entre o alto estuário e o médio estuário (AE/ME) e entre o médio estuário e o baixo estuário (ME/BE), onde os dados de ADCP foram coletados.



Fonte – O autor.

Uma característica marcante do rio Jaguaribe é a variação natural de sua descarga fluvial onde, antes da construção de barramentos artificiais, oscilava entre $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e zero, em um curto intervalo de tempo, e hoje perenizada, variando entre 20 e $60 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (CAMPOS *et al.*, 2000).

A maré da região é caracterizada como semi-diurna, apresentando duas

preamares e duas baixa-mares ao longo de 24 horas e 50 minutos com um regime de meso-maré, com a amplitude de maré variando até 2,8 m.

A região no entorno do Jaguaribe é composta por embasamento cristalino, rochas pluto-vulcanossedimentares e coberturas sedimentares não metamorfolizadas, possuindo uma baixa infiltração (MORAIS *et al.*, 2002). Esse tipo de solo, faz com que a precipitação controle a intensidade e periodicidade das vazão, fazendo com que só haja vazão quando houver precipitação.

Na cidade de Itaiçaba, a aproximadamente 34 km da foz do rio, foi construída um dique (passagem molhada) para captação da água do rio para abastecimento de água da cidade de Fortaleza via canal em parte do ano os processos que ocorrem no estuário sofrem uma influência significativa das atividades antrópicas das cidades de Itaiçaba, Aracati e Fortim, aumentando a concentração de nutrientes e poluentes. Quando o período chuvoso chega e a intensidade das chuvas aumenta, ocorre o transbordamento da passagem de Itaiçaba fazendo com que o aporte fluvial tenha influência significativa sobre o sistema, retirando os poluentes que se concentraram durante o período seco no estuário (MARINS *et al.*, 2003; PAULA FILHO, 2004).

O sistema estuarino pode ser classificado e dividido em três zonas, onde os limites entre essas zonas apresenta flutuações de acordo com o clima da região e variações de maré. A primeira é a zona do rio (ZR), localizada entre as cidades de Itaiçaba e Aracati, sendo caracterizada pela predominância dos processos de dinâmica fluvial. A segunda é a zona de mistura estuarina (ZM), entre as cidades de Fortim e Aracati, é marcada por intensos processos de mistura entre as águas fluviais e marinhas. A terceira zona é a zona costeira (ZC), estando da barra da cidade de Fortim e oceano aberto, é caracterizada como ambiente marinho (DIAS *et al.*, 2005; ESCHIRIQUE; MARINIS, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho consiste em quatro partes principais:

Elaboração da base de dados para ser usada como forçante e na calibração e validação do modelo. Nesta fase foram levantados dados de evapotranspiração potencial, velocidade e direção dos ventos, precipitação e das componentes harmônicas de maré, da batimetria e das séries temporais de vazão disponíveis na literatura.

A segunda parte consiste na implementação, calibração e validação do modelo Delft3D-FLOW para simular a hidrodinâmica do estuário do Rio Jaguaribe durante o ano de 2009. Este ano foi escolhido pela disponibilidade de dados para a validação do modelo. O ano de 2009 representa um ano atípico com precipitações e vazões acima da média climatológica.

A terceira parte consiste em simular as condições hidrodinâmicas do Rio Jaguaribe durante um ano usando valores médios climatológicos de vazão e dos forçantes atmosféricos. Também foi feita um terceiro cenário com simulações durante um ano representando as vazões de um ano seco em relação a climatologia da região.

A quarta parte consiste na aplicação do modelo hidrodinâmico no estudo do tempo de residência e descarga para todos os cenários modelados.

3.1 Elaboração da base de dados para o estuário do Rio Jaguaribe

De forma geral a região de estudo possui ausência de observações de dados meteorológicos, portanto foram utilizados dados das estações mais próximas ou que melhor representam as condições observadas na região do rio Jaguaribe.

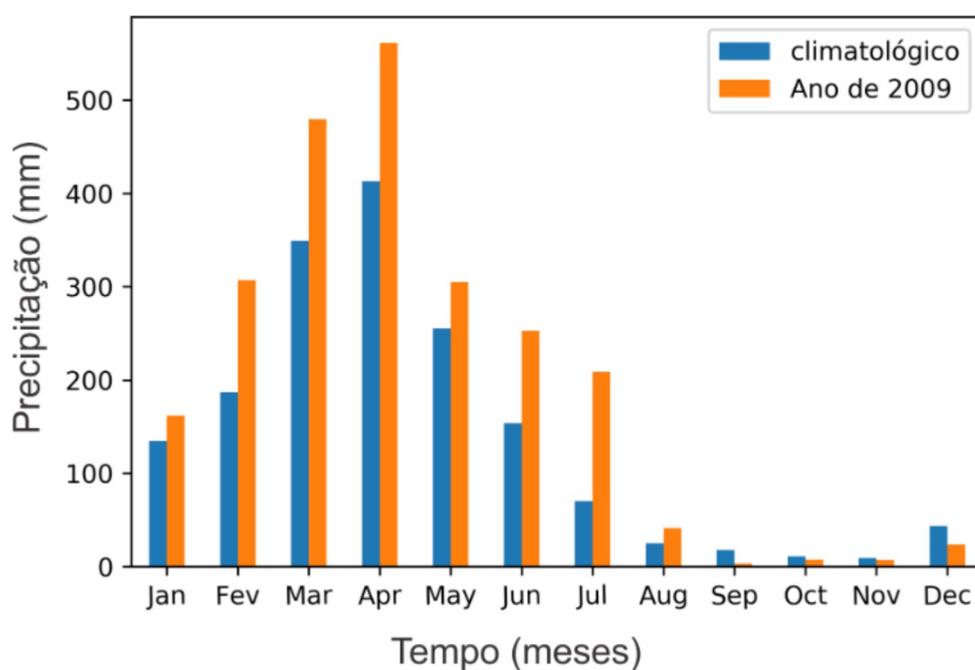
3.1.1 Dados de precipitação

Os dados médios mensais de precipitação usados como forçantes do modelo são provenientes do posto pluviométrico do município de Aracati operado pela Fundação

Cearence de Recursos Hídricos (FUNCEME). Esta estação possui dados de 1974 a 2018.

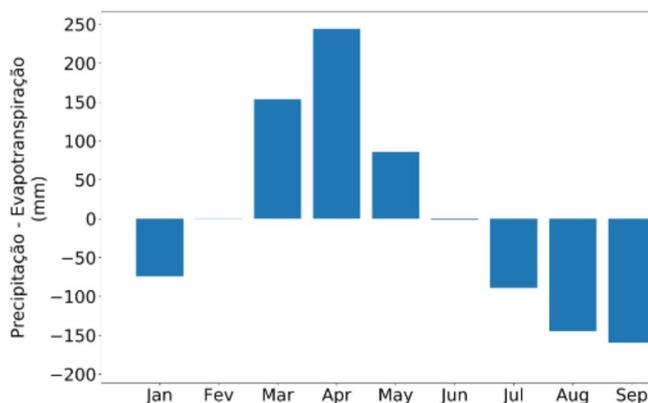
A simulação para o ano de 2009 foi forçada com dados médios mensais deste ano e as simulações dos cenários secos e climatológico com os valores médios mensais climatológicos (Figura 2). Estes dados juntamente com o de evapotranspiração são usados no cálculo do balanço hídrico (precipitação - evaporação) que é o forçante de fluxo de água por superfície das simulações (Figura 3).

Figura 2 – Total de precipitação mensal para o ano de 2009 (laranja) e médias climatológicas de precipitação mensal (azul).



Fonte – O autor.

Figura 3 – Balanço hídrico climatológico.



Fonte – O autor.

3.1.2 Dados de evapotranspiração

Evapotranspiração é o processo de transporte da água na forma de vapor para a atmosfera, podendo ser evapotranspiração potencial (ETP) ou evapotranspiração real (ETR). A ETP é a capacidade máxima de água que pode ser perdida como vapor, em uma determinada condição climática, por um meio contínuo de vegetação, que cobre uma superfície que está na capacidade de campo ou acima desta. ETR é a quantidade real de transferência de vapor dada as condições da região (umidade do solo, condições de cultura e etc.). Para fins do balanço hídrico utiliza-se a ETP tendo em vista que toda a superfície está acima da capacidade de campo.

Os valores médios mensais de ETP utilizados em todas as simulações do presente trabalho foram obtidos pelas normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o posto convencional de Jaguaruana, tendo sido estimada pelo método de THORNTHWAITE (1948). Não existem dados disponíveis para o cálculo da ETP durante o ano de 2009 e portanto na simulação deste ano também foram usados dados climatológicos.

3.1.3 *Dados de vento*

Dada a indisponibilidade de dados de vento na região de estudo, foram utilizados os dados de vento da cidade de Fortaleza. Apesar da distância estes dados representam de forma mais adequada as condições encontradas junto a costa quando comparado com dados coletados em estações em localidades interioranas.

As simulações médias climatológicas foram forçadas com médias mensais de intensidade e direção do vento obtidas da estação convencional do INMET (código OMM: 82397) localizada na cidade de Fortaleza, a uma altura de 10 m, para os anos de 1987 a 2018.

Na simulação do ano de 2009 o modelo foi forçado com dados referentes ao ano de 2009 provenientes da mesma estação.

3.1.4 *Dados de vazão*

Devido a falta de dados de vazão para rio Jaguaribe na região da barragem de Itaiçaba, foi necessário considerar os valores de vazão da barragem de Jaguaruana (Q_{jag}), descontadas as saídas de água para o canal do trabalhador (Q_{ctb}), como valores representativos para a região estuarina (Equação 3.1).

$$Q_{Itai} = Q_{Jag} - Q_{ctb} \quad (3.1)$$

A tabela 2 mostra os valores de vazão utilizados para o cenário climatológico e para o cenário seco, respectivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2018; CAVALCANTE, 2018). Durante o cenário seco foi considerado a influência da evaporação na região não modelada do estuário. Para isso foi calculado o fluxo de água perdido por evaporação para toda a área não modelada a montante, acrescentado esse fluxo negativo em superfície nos períodos onde a vazão é nula.

Tabela 2 – Vazões médias mensais usadas nas simulações do cenário climatológico (OLIVEIRA *et al.*, 2018) e do cenário seco (CAVALCANTE, 2018).

Período (meses)	Vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) Climatológico	Vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) Seco
Janeiro	30,2	38,0
Fevereiro	81,2	10,0
Março	213,3	58,0
Abril	321,3	100,0
Maio	240,1	27,0
Junho	45,5	10,0
Julho	20,2	-0,9
Agosto	13,4	15,0
Setembro	12,9	-0,9
Outubro	3,4	-0,9
Novembro	15,1	-0,9
Dezembro	14,6	-0,9

Fonte – Adaptado de Oliveira *et al.* (2018) e Cavalcante (2018)

3.1.5 Regime de marés

Como forçantes do regime de maré nas simulações foram usados os harmônicos de maré calculados pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) na estação maregráfica localizada na margem direita do Rio Jaguaribe, próximo a pedra do chapéu.

Para tanto foram utilizados os seis principais harmônicos de maré da região (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1 , P_1) (Tabela 3).

Os harmônicos de maré foram usados como forçantes nos limites abertos do modelo e posteriormente para validar os resultados de maré modelados no ponto da estação maregráfica da FEMAR.

Tabela 3 – Harmônicos de maré para o Rio Jaguaribe

Componentes semi-diurnos	Amplitude (m)	Fase(°)
M2	0,855	137
S2	0,268	158
N2	0,028	177
Componentes diurnos		
K1	0,072	230
O1	0,057	193
P1	0,024	230

Fonte – Adaptado de FEMAR (2014)

3.1.6 *Dados de Batimetria*

Os dados de batimetria utilizados no presente trabalho foram obtidos de duas fontes diferentes:

1. Dados batimétricos do estuário foram coletados e fornecidos pelo projeto do Ministério da Agricultura intitulado "Projetos Básicos e Executivos de Dragagem Para os Estuários dos Rios Choró (Cascavel), Pirangi (Beberibe), Jaguaribe (Aracati) e Barra Grande (Icapuí), no Litoral do Estado do Ceará";
2. Dados da plataforma foram obtidos através da digitalização de cartas náuticas e dados do ETOPO 2.

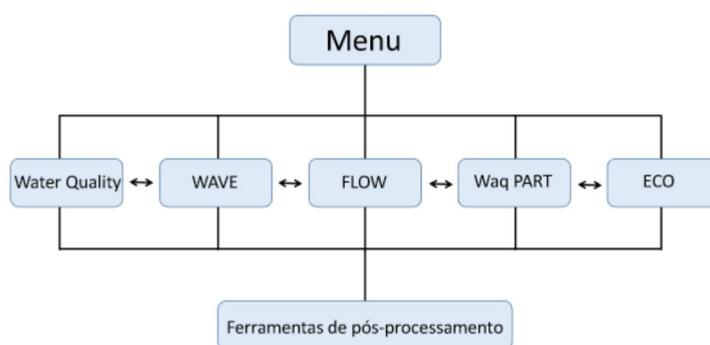
Todos os dados foram ajustados para o mesmo sistema de coordenadas e Datum.

3.2 O modelo hidrodinâmico Delft3D

O modelo hidrodinâmico utilizado neste trabalho foi o Delft3D, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Deltares (Delft, Holanda), é um modelo numérico inter-multidisciplinar. O modelo é dividido em diversos módulos, sendo: 1) O principal para

simular processos hidrodinâmicos, transporte de sedimentos e variações morfológicas (FLOW), 2) Propagação de ondas curtas (WAVE), 3) Qualidade de água em grandes reservatórios (Water Quality), 4) Qualidade de água em reservatórios médios (Waq PART), 5) Modelagem ecológica (ECO). Todos os módulos são agrupados em torno de uma única interface gráfica, podendo interagir entre si e serem pós-processados, também, em uma única interface (Figura 4).

Figura 4 – Fluxograma de interação dos módulos do modelo Delft3D.



Fonte – Adaptado de Deltares (2014)

3.2.1 O módulo *Delft3D-FLOW*

O Delft3D-FLOW é um módulo hidrodinâmico e de transporte, multidimensional (2D ou 3D) que calcula o fluxo não estacionário e os fenômenos de transporte resultante de forçantes como a força da maré e variáveis meteorológicas, em uma grade escalonada (retilínea ou curvilínea), utilizando o método de diferenças finitas para solução das equações de águas rasas (LESSER *et al.*, 2004).

O módulo FLOW foi desenvolvido para diversas áreas de aplicação, dentre elas:

- Estudos de correntes geradas por maré e/ou fluxos de vento;

- Simulações de descargas fluviais;
- Simulações de reservatórios e lagos profundos;
- Simulações de tsunamis e ondas de enchente;
- Intrusão salina;
- Transporte de sedimentos e processos morfodinâmicos;
- Transporte de materiais dissolvidos e poluentes.

O modelo possui formulações matemáticas que levam em consideração os fenômenos físicos, dentre eles:

- Efeito barotrópico e baroclínico;
- Força de Coriolis;
- Equações do estado da água;
- Fluxos turbulentos;
- Transporte de constituintes conservativos;
- Forçante de maré nos limites abertos;
- Cisalhamento e stress do vento com variação espaço-temporal;
- Cisalhamento de fundo variando espacialmente;
- Vazão afluente e efluente;
- Evaporação e precipitação;
- Regiões *wet-and-dry*.

O contorno de um rio, um estuário ou uma região costeira são geralmente curvos, não sendo bem representados por grades retangulares. Para diminuir o erro introduzido por grades retangulares o modelo utiliza coordenadas curvilíneas ortogonais. Esse tipo de coordenada permite um melhor ajuste das células de grade ao formato da área de estudo, reduzindo a propagação de erros e permitindo, também, um melhor refinamento em regiões com um alto gradiente horizontal.

A distribuição de camadas segue o sistema de coordenadas vertical σ (modelos-

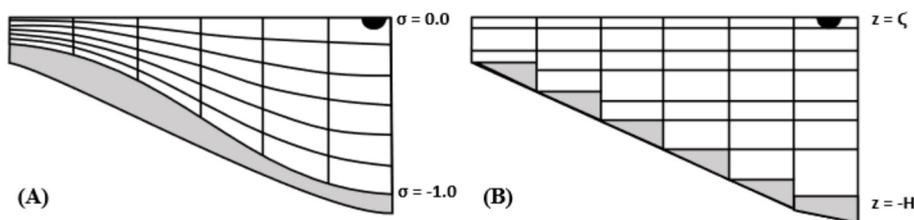
σ) é definida pela equação 3.2 (PHILLIPS, 1957).

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (3.2)$$

Sendo, z a coordenada vertical no espaço físico do modelo, ζ a elevação do nível do mar acima do plano de referência ($z = 0$), d a profundidade abaixo do plano de referência, H a profundidade total.

Os modelos- σ possuem profundidade adimensional, variando entre -1 no fundo e 0 na superfície, ou seja, o número de camadas verticais é constante, variando apenas sua espessura (Figura 5). Como este tipo de modelo é ajustado tanto no fundo quanto na superfície é obtido uma representação suavizada da topografia.

Figura 5 – Esquemática de (A) um modelo- σ e (B) um modelo- z .



Fonte – Adaptado de Deltares (2014)

O modelo Delft3D-FLOW possui uma série de módulos acessórios: RGF-GRID, QUICKIN, Delft3D-TRIANA, Delft3D-TIDE, Delft3D-NESTHD, GPP, Delft3D-QUICKPLOT (Tabela 4).

Tabela 4 – Descrição dos módulos utilitários do Delft3D-FLOW

Módulo	Descrição
RGFGRID	Geração de grades curvilíneas
QUICKIN	Tratamento e manipulação de dados orientados ao grid, tais como, batimetria e condições iniciais
Delft3D-TRIANA	Analisar séries temporais de maré geradas pelo Delft3D (off-line)
Delft3D-TIDE	Analisar séries temporais de maré e velocidades medidas <i>in situ</i>
Delft3D-NESTHD	Gerar condições de contorno através de uma saída de outro modelo
GPP	Visualização e animação dos resultados
Delft3D-QUICKPLOT	Visualização e animação dos resultados

Fonte – Adaptado de Deltares (2014)

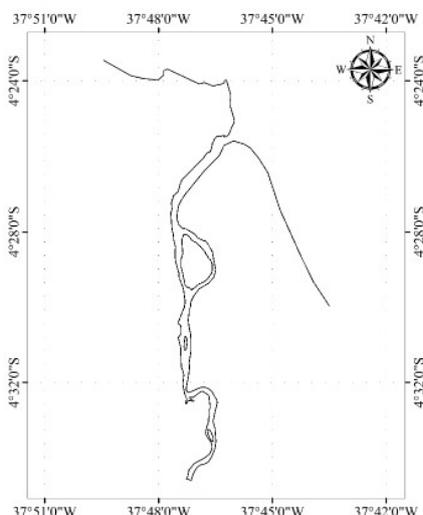
3.3 Definição do domínio

Antes de se começar a construção de uma grade numérica, o primeiro passo a ser tomado é a definição dos limites a serem modelados. Foi extraída uma imagem de satélite da região estuarina do Rio Jaguaribe utilizando imagens do *Google Earth* para o ano de 2009. Após feita a extração dessa imagem, foi realizado o georreferenciamento da mesma no *software Q-GIS* e a partir dela foi criado o contorno do domínio modelado (Figura 6).

3.4 Criação da grade numérica

A grade gerada para o domínio abrange a área estuarina do Rio Jaguaribe, uma porção da região costeira adjacente e parte da plataforma continental. Devido ao formato e ao tamanho da região estuarina e levando em consideração que a posição e orientação da grade devem representar os canais principais, o formato da costa e as ilhas presentes no estuário, optou-se por utilizar uma grade curvilínea e telescópica. Esse

Figura 6 – Conjunto de pontos utilizados como domínio no modelo



Fonte – O autor

modelo de grade possibilita uma melhor previsão numérica em menores escalas, aumentando a precisão e eficiência computacional, evitando consideravelmente o aumento de tempo e espaço computacional necessários (HILL, 1968; TOBON, 2002).

A grade gerada para a área de estudo possui um total de 11.429 células computacionais, sendo, 103 na direção M e 439 na direção N, onde M e N são coordenadas perpendiculares e alinhadas ao eixo principal do estuário, respectivamente .

3.5 Propriedades da grade numérica

A criação de grades curvilíneas no modelo Delft3D deve levar em consideração alguns aspectos para que seja mantida a sua qualidade.

3.5.1 Ortogonalidade

A ortogonalidade é o cosseno do ângulo (φ), entre as linhas da grade nas direções ξ, η (M,N). O valor recomendado de ortogonalidade é $\cos(\varphi) < 0,02$ próximo

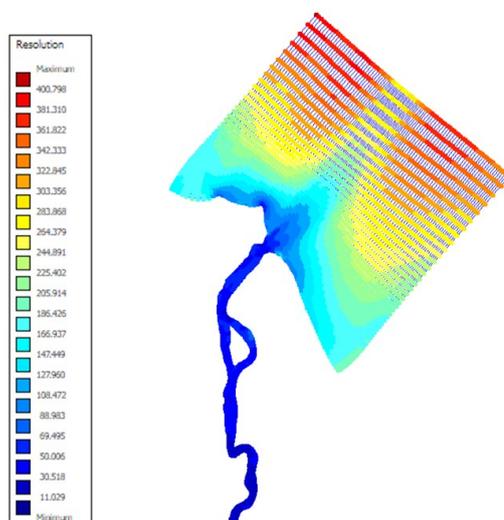
aos limites abertos, podendo exceder este valor em regiões com uma alta complexidade morfológica e em pontos próximos aos contornos fechados sem acrescentar muitos erros no termo de advecção do modelo.

A grade apresentou uma boa ortogonalidade, com cossenos menores que 0,02 em todas as regiões próximas aos limites fechados, não excedendo o valor de 0,02 em quase toda sua totalidade.

3.5.2 Resolução

Em grades curvilíneas a resolução é dada pela raiz quadrada da área da célula de grade. Deve-se levar em conta que o tamanho de uma célula não deve ser maior que 1,4 vezes o tamanho da célula adjacente. Para o domínio modelado a resolução variou de 11 m no canal estuarino a 400,8 m na plataforma continental e os limites de mudança de resolução foram atendidos (figura 7).

Figura 7 – Resolução da grade.



Fonte – O autor

3.6 Interpolação batimétrica

A geração da malha batimétrica do modelo foi feita através da divisão de três áreas para a interpolação de dados dos dados batimétricos descritos na seção 3.1.6:

1. Interpolação para a área do canal principal;
2. Interpolação apenas da área do canais secundários;
3. Interpolação da plataforma continental.

3.7 Condições de contorno

Foram definidos quatro limites de forçantes para o domínio, três na plataforma continental (Norte, Leste e Oeste) e um a montante do estuário (descarga fluvial). Nos limites abertos da plataforma continental foram inseridos dois tipos de forçantes:

1. No limite Norte foi inserido a forçante barotrópica de maré , utilizando as componentes harmônicas descritas na tabela 3 da seção 3.1.5;
2. Nos limites Leste e Oeste as condições de contorno foram do tipo Neumann com o parâmetro de refração α máximo (1000 s²). esta condição de contorno impõe um gradiente barotrópico ao longo da costa, em combinação com a variação barotrópica do limite Norte.

Nos limites a montante do estuário foram aplicados pontos de descarga para simular a vazão, utilizando os dados mencionados na seção 3.1.4 e salinidade zero.

Nas condições de contorno abertas a salinidade foi configurada para 37 $g \cdot kg^{-1}$.

3.8 Calibração e Validação hidrodinâmica

A calibração do modelo consiste em ajustar as configurações do modelo de modo a haver uma maior concordância entre o processo modelado e o real. Esse ajuste

pode ser realizado através da modificação dos parâmetros físicos do modelo dentro de limites compatíveis com seus significados físicos.

A validação é a análise da aproximação dos dados modelados quando comparados com os dados reais. Para validar o modelo foram comparados os resultados para o período chuvoso e o período seco do ano de 2009.

A simulação para o ano de 2009 foi calibrada através do ajuste dos dados de vazão, dispersão horizontal e atrito de fundo. Após a calibração do ano de 2009 as configurações foram mantidas e apenas os forçantes modificados para as simulações dos cenários climatológico e seco.

Para validar a componente maré foi feita uma análise harmônica (PAWLOWICZ *et al.*, 2002) da elevação do nível do mar do modelo, com a finalidade de calcular as amplitudes e fases simuladas para os principais harmônicos de maré da região. Estas amplitudes e fases foram então comparadas com os harmônicos calculados pela FEMAR utilizando o erro percentual (Equação 3.3).

$$Desvio (\%) = \frac{(Obs - Mod)}{Obs} * 100 \quad (3.3)$$

Para validação das correntes simuladas foram comparados os valores de velocidade longitudinal média e velocidade residual calculados a partir dos dados de ADCP coletados no ano de 2009 em dois pontos do rio Jaguaribe e fornecidos pelo Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Estuarina e de Águas Interiores (LHiCEAI) e Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO) (Figura 1). Para análise dos dados de ADCP foi corrigida a rotação dos dados para a inclinação do canal, após essa correção os valores de velocidade foram adimensionalizados ao longo da profundidade e ao final foi feita a média da seção.

Para validação do período chuvoso, foram testados dois cenários. O primeiro cenário utilizou a vazão média apresentada por Dias *et al.* (2016a) ($1.300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), para o período chuvoso na interface AE/ME do estuário do rio Jaguaribe. Segundo Dias *et al.*

(2016a) a vazão do estuário aumenta em direção a jusante, tendo em vista isso optou-se por utilizar uma vazão de $650 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para o segundo cenário e dessa forma tentar ver se os canais secundários possuem uma grande influência nas vazões.

A validação da salinidade se deu através de comparação dos perfis longitudinais com os valores apresentados por Schettini *et al.* (2014) e Frota *et al.* (2013).

Para validação quantitativa dos resultados foi calculado a raiz do erro quadrático médio (REQM) (Equação 3.4) e método sugerido por Willmott (1981), baseado no parâmetro de Skill, definido por Warner *et al.* (2005) (Equação 3.5). O parâmetro skill varia de 0 (completa discordância) a 1 (completa concordância), sendo classificados como excelente ($\text{Skill} > 0,65$), muito bom ($0,65 > \text{Skill} > 0,5$), bom ($0,5 > \text{Skill} > 0,2$) e pobre ($\text{Skill} < 0,2$).

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{l=1}^n \|X_{modelo} - X_{obs}\|^2}{N}} \quad (3.4)$$

$$Skill = 1 - \frac{\sum \|X_{modelo} - X_{obs}\|^2}{\sum \|X_{modelo} - \bar{X}_{obs}\| + \sum \|X_{modelo} - \bar{X}_{obs}\|^2} \quad (3.5)$$

3.9 Configuração do modelo

Os três cenários simulados usaram as mesmas configurações variando apenas as forçantes meteorológicas e de vazão.

Foram usadas 10 camadas verticais do tipo σ igualmente espaçadas. O modelo foi iniciado com o nível da mar e velocidades zero e com um campo uniforme de salinidade de $37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Os valores de vazão foram inseridos ao longo de 18 células no contorno do modelo. Afim de evitar mudanças abruptas na variação da vazão de um mês para outro, a calibração foi feita de tal forma que, o rio começa a simulação com uma vazão nula, onde essa vazão aumenta linearmente até as primeiras 12 h de simulação, onde esta

torna-se constante até dois dias antes do final do mês. A vazão plena do mês seguinte só irá começar três dias após o início do mês, deixando um período de cinco dias para a transição linear entre a vazão de do mês anterior e o atual.

A temperatura foi setada como constante, o coeficiente de rugosidade foi definido pela formulação de Manning nas duas direções (U,V) e o modelo de turbulência foi o K-Epsilon (Tabela 5). O vento foi setado de forma uniforme em toda a grade variando apenas temporalmente de forma linear.

Tabela 5 – Parâmetros físicos constantes utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Número de camadas verticais	10
Passo de tempo	12 s
Fuso horário	-3
Gravidade	9,81 $m \cdot s^{-2}$
Temperatura	29,5 °C
Rugosidade (Manning) em U	0,02
Rugosidade (Manning) em V	0,02
Modelo de turbulência 3D	k-Epsilon

Fonte – O autor.

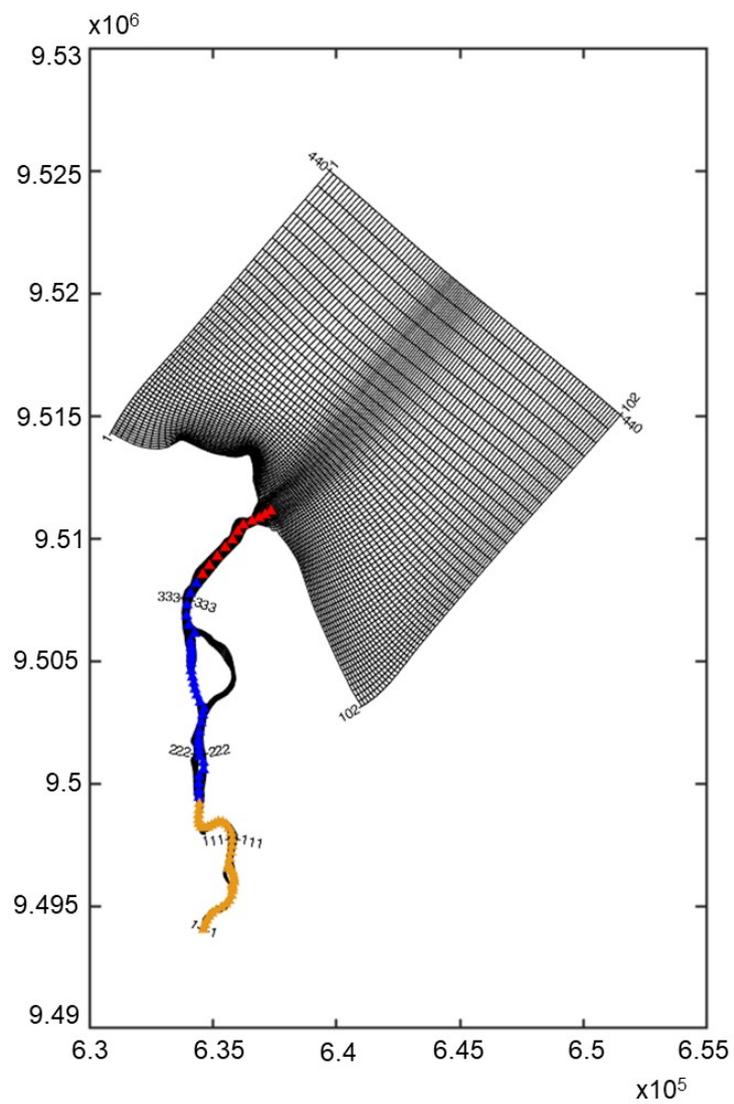
3.10 Tempo de residencia e tempo de exposição

O tempo de residência (Tr) é o tempo que uma partícula ou substância necessita para se deslocar de sua posição inicial e sair do sistema pela primeira vez. O tempo de exposição (Te) é o tempo necessário para que haja a renovação de aproximadamente 63% ($1/e$) de todo o sistema. Para analisar o Tr e de exposição do estuário do rio Jaguaribe foram utilizados flutuadores e traçadores passivos.

No caso das partículas há apenas o processo de transporte advectivo. Já no caso do uso de traçadores passivos além da advecção os processos difusivos também são considerados.

Foram inseridos flutuadores ao longo de todo o canal estuarino para analisar o deslocamento de uma partícula qualquer e o seu tempo de residência para cada ponto do estuário. Foram inseridos 80 flutuadores divididos por áreas (Alto estuário, Médio estuário e Baixo estuário) ao longo de todo o canal estuarino (Figura 8).

Figura 8 – Disposição dos flutuadores ao longo da grade hidrodinâmica. Laranja - Alto estuário; Azul - Médio estuário; Vermelho - Baixo Estuário.



Fonte – O autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação do modelo numérico

Como dito anteriormente na seção 3.8 a validação corresponde a comparação dos resultados obtidos do modelo, com variáveis coletadas *in situ* ou disponíveis na literatura. Para validação deste modelo foram comparados dados de nível do mar, velocidades de correntes longitudinais residuais e longitudinais totais, e seções verticais de salinidade. Para efeito de comparação, adotaremos a convenção de $u > 0$ para velocidades longitudinais de vazante e $u < 0$ para velocidades longitudinais de enchente.

4.1.1 Nível do mar

Os dados de nível do mar da simulação do ano de 2009 foram analisados e comparados com os valores dos harmônicos de maré calculados pela FEMAR para o ponto dentro do estuário do Rio Jaguaribe. A amplitude das componentes de maré apresentaram uma pequena superestimação para a componente semi-diurna M2 e uma subestimação para as componentes semi-diurnas S2 e N2 e diurnas (O1, K1, P1) (Tabela 6), com desvio menor que 2%. As fases apresentaram uma superestimação para todas as componentes analisadas (Tabela 7), com desvio menor que 10%. O modelo apresentou um parâmetro skill de 0,99 para amplitude e fase.

Estes resultados demonstram que, de forma geral, o modelo foi capaz de reproduzir a elevação do nível do mar gerado pelo regime de marés dentro do estuário.

Tabela 6 – Comparação entre as amplitudes dos harmônicos de maré modelados e observados.

Componente	Amplitude obs. (m)	Amplitude mod. (m)	Δ Amplitude (m)	Desvio (%)
M2	0,8550	0,8636	-0,0086	1,01
S2	0,2680	0,2649	0,0031	1,16
N2	0,0280	0,0279	0,0001	0,36
O1	0,0570	0,0565	0,0005	0,88
K1	0,0720	0,0718	0,0002	0,28
P1	0,0240	0,0236	0,0004	1,67

Fonte – O autor.

Tabela 7 – Comparação entre as frequências dos harmônicos de maré modelados e observados.

Componente	Frequência obs. (°)	Frequência mod. (°)	Δ Frequência (°)	Desvio (%)
M2	137,00	149,29	-12,29	8,97
S2	158,00	172,75	-14,75	9,34
N2	177,00	192,40	-15,40	8,70
O1	193,00	201,44	-8,44	4,37
K1	230,00	238,24	-8,24	3,58
P1	230,00	241,92	-11,92	5,18

Fonte – O autor.

4.1.2 Velocidade residual e longitudinal

As velocidades longitudinais residuais e totais da simulação para o ano de 2009 foram comparadas e validadas com os dados de ADCP fornecidos pelo LHiCEAI.

Aqui as velocidades residuais foram calculadas após a extração da componente de maré utilizando a análise harmônica.

Os valores médios de velocidade no tempo foram calculados ao longo do mesmo tempo de amostragem. Os valores médios da seção foram calculados através da média ao longo da seção transversal do modelo mais próxima da amostragem com o ADCP.

Durante o período seco (novembro de 2009), os valores da velocidade longi-

tudinal média da seção foram subestimados nas duas interfaces analisadas, alto/médio estuário (AE/ME) e médio/baixo estuário (ME/AE), durante situações de enchente e vazante (Tabela 8 e Figuras 9 e 10).

Embora os valores máximos de velocidade em superfície tenham mostrado um desvio abaixo de 10% na interface AE/ME as velocidades modeladas ficaram subestimadas em comparação com as velocidades observadas *in situ* (Figura 9), principalmente durante as condições de vazante o que ocasionou um parâmetro skill de 0,5 para esta seção durante o período seco.

Em contrapartida as velocidades longitudinais médias para a interface ME/BE embora tenham sido subestimadas apresentaram uma melhor correlação ao longo da coluna d'água (Figura 10) e um parâmetro skill de 0,96.

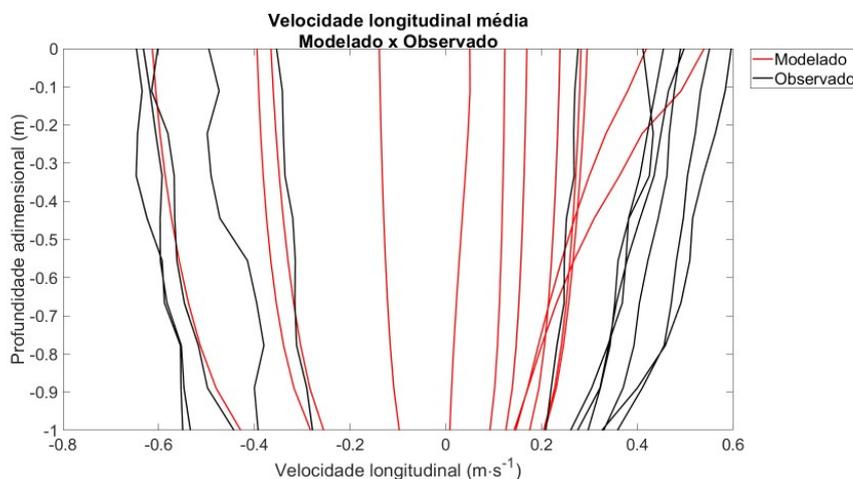
Assim como os dados observados, as velocidades médias de enchente e vazante foram mais intensas na interface ME/BE quando comparadas com a interface AE/ME (Tabela 8).

Tabela 8 – Comparação dos máximos valores da corrente longitudinal média da seção em superfície modelada e observada, na interface AE/ME e ME/BE, durante o período seco (Novembro/2009).

Corrente	Velocidade obs. ($m \cdot s^{-1}$)	Velocidade mod. $m \cdot s^{-1}$	Δ Velocidade ($m \cdot s^{-1}$)	Desvio (%)
AE/ME				
Vazante	0,60	0,54	0,06	10
Enchente	0,64	0,61	0,03	4,69
ME/BE				
Vazante	0,69	0,63	0,06	8,7
Enchente	0,66	0,62	0,04	6,06

Fonte – O autor.

Figura 9 – Velocidade longitudinal observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009)



Fonte – O autor

As velocidades residuais durante o período seco apresentaram uma ótima concordância quando comparado os resultados do modelo com os dados observados. Para a interface AE/ME os dados observados mostraram que a velocidade variou de $0,045 m \cdot s^{-1}$ em superfície a $-0,012 m \cdot s^{-1}$ no fundo com uma média de $0,024 m \cdot s^{-1}$, enquanto que no modelo a velocidade residual variou de $0,045 m \cdot s^{-1}$ em superfície a $0,009 m \cdot s^{-1}$ no fundo com uma média de $0,026 m \cdot s^{-1}$ (Figura 11). A velocidade residual observada da interface ME/BE variou de $0,046 m \cdot s^{-1}$ em superfície a $0,001 m \cdot s^{-1}$ no fundo com uma média de $0,022 m \cdot s^{-1}$, enquanto que no modelo a velocidade residual variou de $0,05 m \cdot s^{-1}$ em superfície a $0 m \cdot s^{-1}$ no fundo com uma média de $0,02 m \cdot s^{-1}$ (Figura 11).

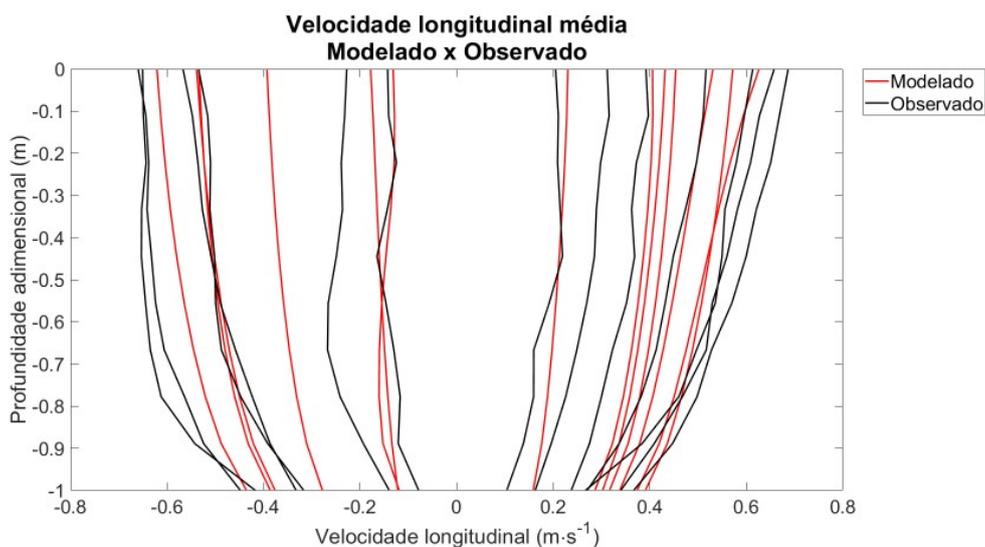
A velocidade residual apresentou para a interface AE/ME e ME/BE um parâmetro skill de 0,96 e 0,99 com um REQM de $0,007$ e $0,003 m \cdot s^{-1}$, respectivamente.

De forma geral, durante o período seco a velocidade longitudinal média simulada apresentou uma boa resposta para a interface ME/BE e ficou subestimado para

a interface AE/ME. Já as velocidades residuais estão em bom acordo com o observado nas duas interfaces. Isso pode ter ocorrido devido a diferença na batimetria da interface AE/ME durante o ano de 2009 (ano em que o dado foi coletado) e o ano de 2012 (ano em que a batimetria foi coletada). Essas diferenças na batimetria podem afetar as correntes de maré em todo o estuário.

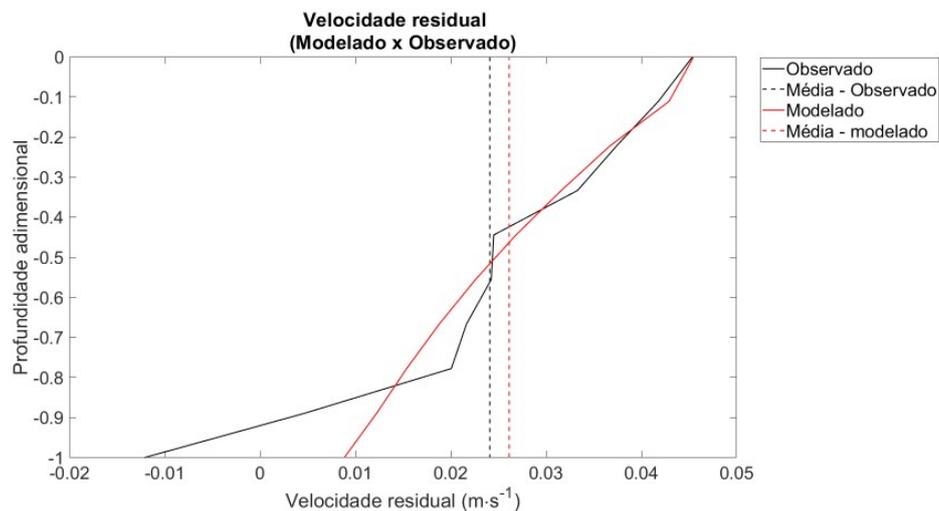
Os perfis de velocidade longitudinal média mostraram uma dominância de correntes de vazante no estuário, estando em acordo com os resultados apresentados por Trucollo *et al.* (2014), Dias *et al.* (2016b).

Figura 10 – Velocidade longitudinal observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009).



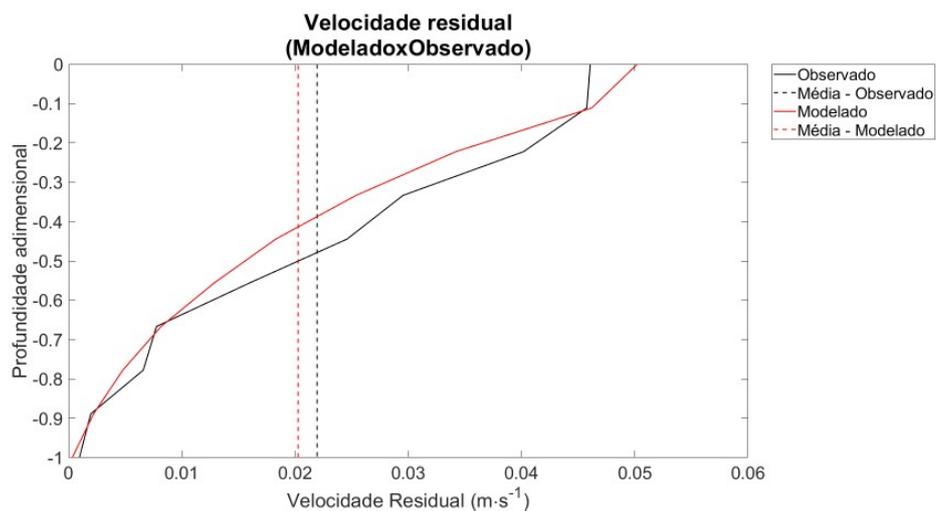
Fonte – O autor.

Figura 11 – Velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009). As linhas verticais denotam o valor médio da coluna d'água.



Fonte – O autor.

Figura 12 – Velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE. Valores médios da seção para o período seco (Novembro de 2009). As linhas verticais denotam o valor médio da coluna d'água.



Fonte – O autor.

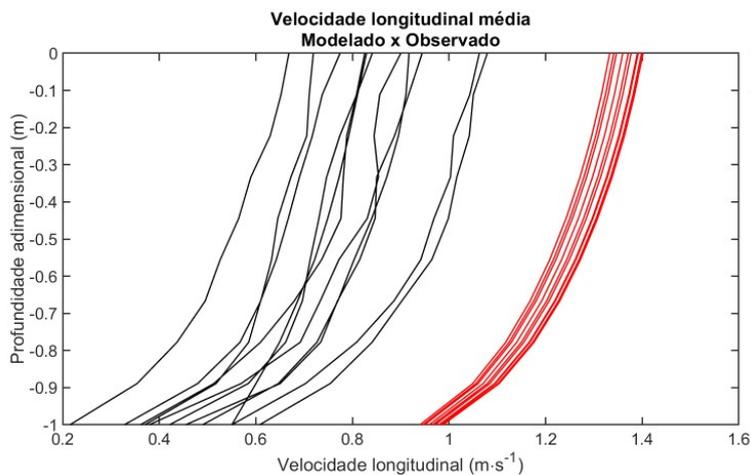
Para o período chuvoso do ano 2009 foram testados dois cenários, o primeiro cenário com vazão constante de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e o segundo com vazão constante de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Os dois cenários apresentaram velocidades máximas em superfície mais intensas para a interface AE/ME. Quando comparado com os dados observados, o cenário de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ apresentou melhores respostas para a interface ME/BE enquanto que o cenário de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ apresentou melhores respostas para a interface AE/ME, com desvios de 5% e 17,59% respectivamente (Tabela 9). Tanto a velocidade longitudinal total quanto a residual apresentaram uma superestimação para a interface AE/ME durante o cenário de maior vazão e uma subestimação na interface ME/BE durante o cenário de menor vazão (Figuras 13 a 20).

Tabela 9 – Diferença de magnitude entre a corrente longitudinal média em superfície modelada e observada, na interface AE/ME e ME/BE, durante o período chuvoso com vazões de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Vazão	Velocidade obs. ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Velocidade mod. $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Δ Velocidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Desvio (%)
AE/ME				
$1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1,08	1,40	-0,32	29,63
$650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1,08	0,89	0,19	17,59
ME/BE				
$1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1,00	0,95	0,05	5
$650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	1,00	0,60	0,40	40

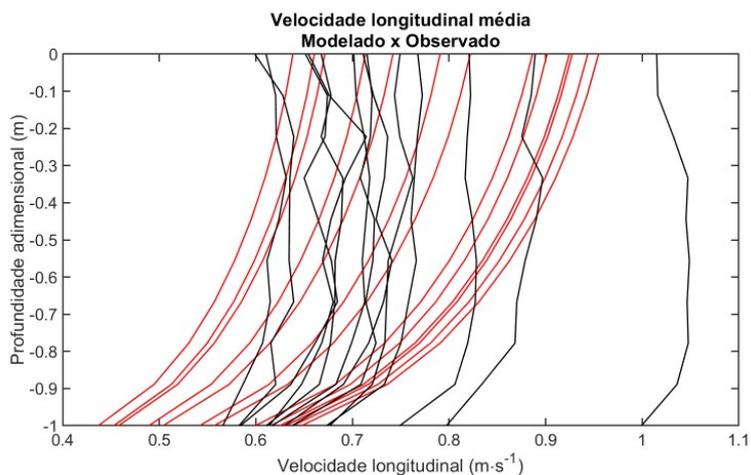
Fonte – O autor.

Figura 13 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



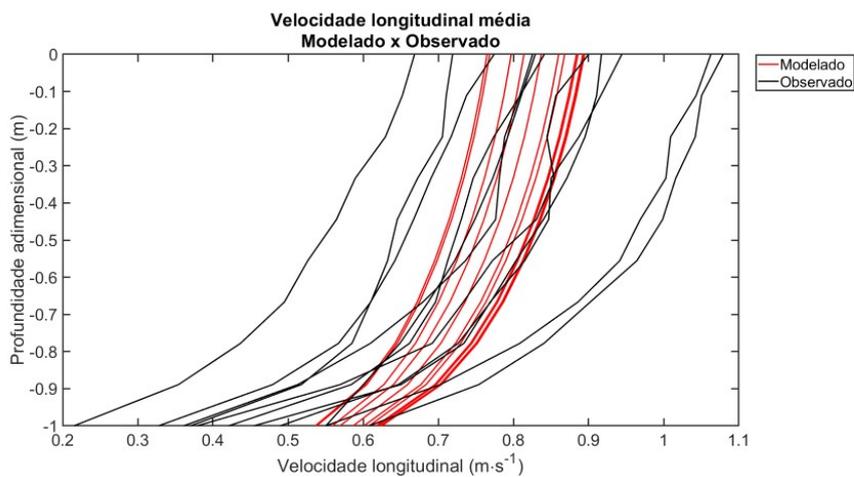
Fonte – O autor.

Figura 14 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



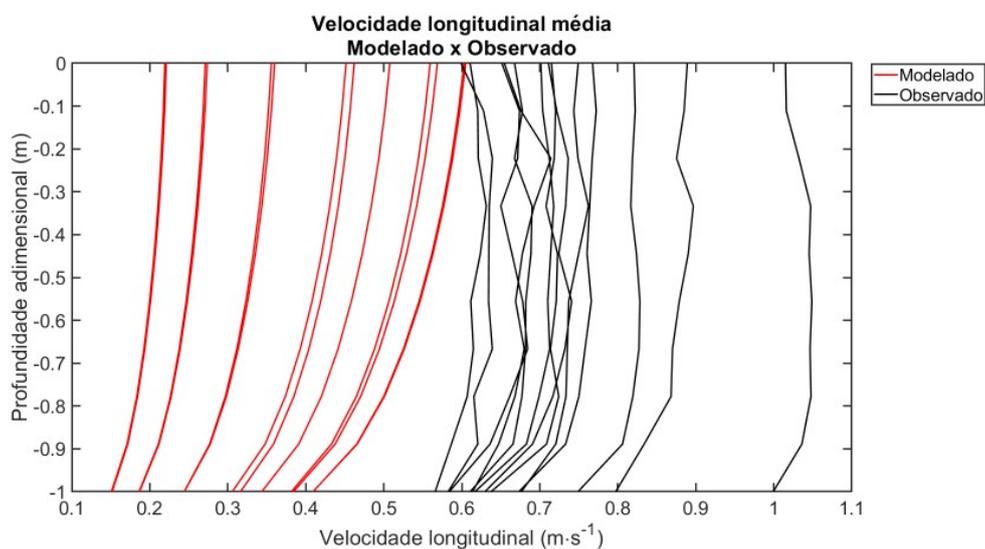
Fonte – O autor.

Figura 15 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



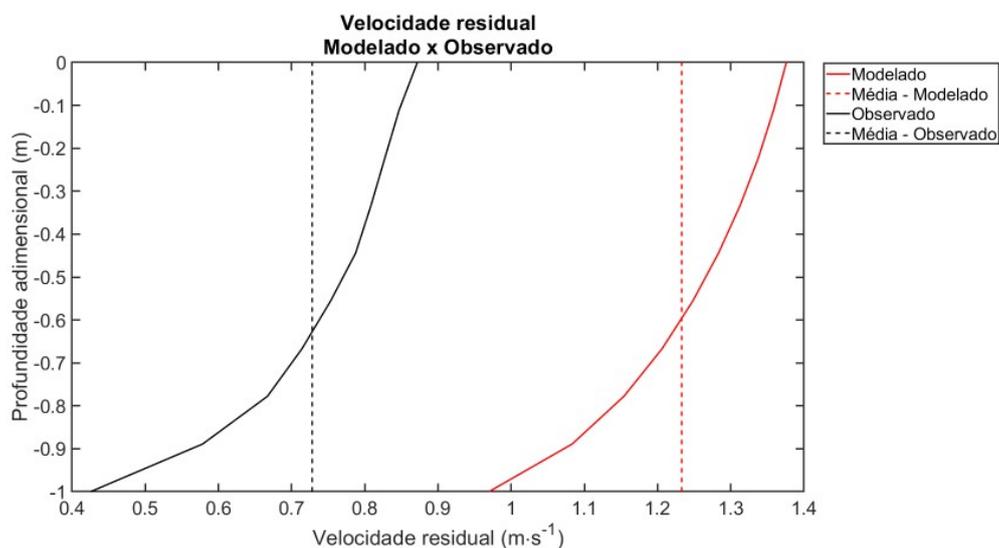
Fonte – O autor.

Figura 16 – Comparativo entre a velocidade longitudinal média observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



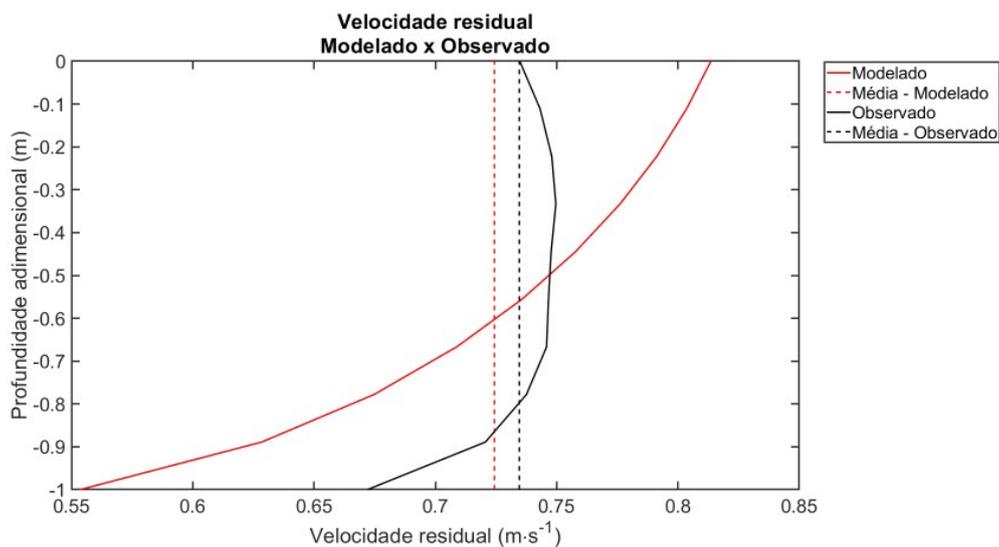
Fonte – O autor.

Figura 17 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface AE/ME, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



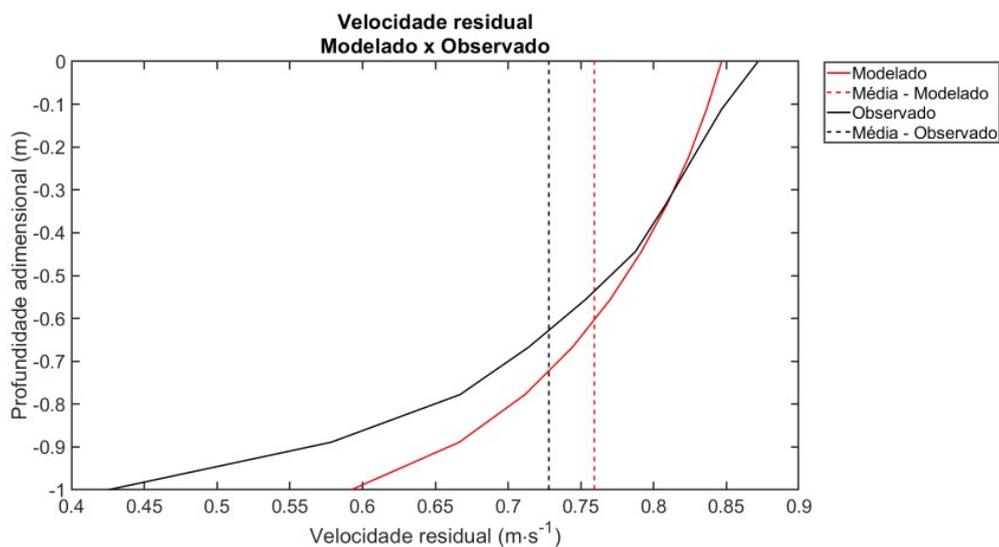
Fonte – O autor.

Figura 18 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $1300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



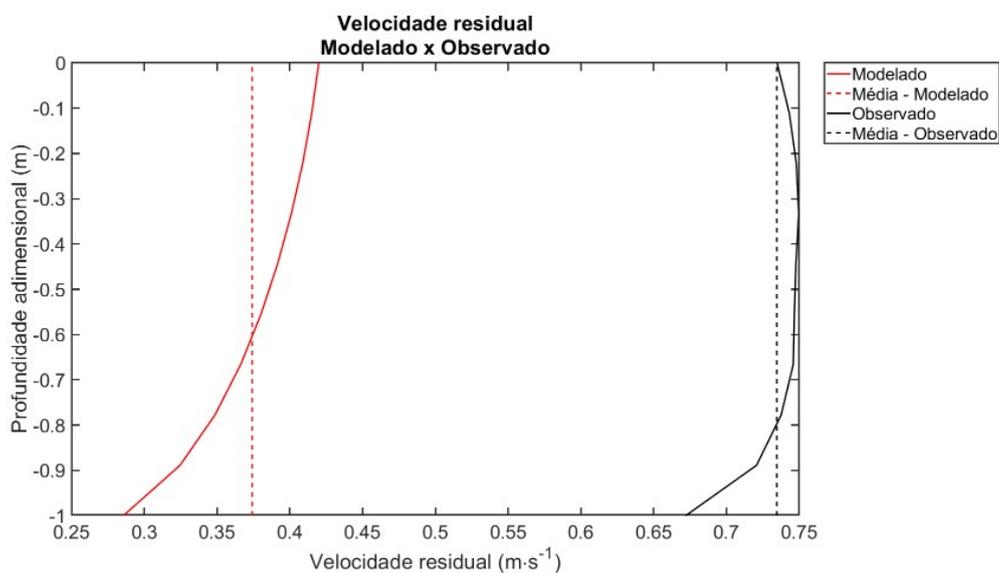
Fonte – O autor.

Figura 19 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Fonte – O autor.

Figura 20 – Comparativo entre a velocidade residual observada (preto) e a modelada (vermelho) para a interface ME/BE, com vazão de $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



Fonte – O autor.

O cenário com $650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de vazão fluvial apresentou um parâmetro skill para a velocidade longitudinal média de 0,33 e $0,53 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e o segundo cenário apresentou um parâmetro skill para a velocidade longitudinal média de 0,79 e 0,3 para as interfaces AE/ME e ME/BE, respectivamente. As velocidades residuais médias apresentaram valores próximos para a interface ME/BE no primeiro cenário (com valores de 0,72 e $0,73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o observado e modelado, respectivamente) e próximos para a interface AE/ME para o segundo cenário (com valores de 0,73 e $0,76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para o observado e modelado, respectivamente).

Durante o primeiro semestre os valores de vazão para a região do Alto Jaguaribe apontados por Dias *et al.* (2016a), foram três vezes mais intensos do que a média climatológica apresentada por Oliveira *et al.* (2018). Por possuir uma bacia de embasamento cristalino, as vazões do rio Jaguaribe estão diretamente ligadas com a taxa de precipitação dessa região e com o volume de água armazenado pelos reservatórios ao longo da bacia. Dessa forma quanto maiores forem as precipitações na região, mais intensa será a descarga do rio. Gusev *et al.* (2004) compara as precipitações em Pelotas e Fortaleza, mostrando que a cada 22 anos ocorre uma anomalia positiva de precipitação no NEB, gerando médias mensais de precipitação bem acima da média. O ano de 2009, foi um ano atípico para a região, onde os reservatórios de todas as bacias quem compõem o rio Jaguaribe ficaram com capacidade máxima, devido as altas taxas de precipitação (COGERH, 2009). Isso pode ter influenciado para que os valores de vazão observados ficassem tão acima da média para o período chuvoso.

Para os cenários do período chuvoso, a interface AE/ME e a interface ME/BE, apresentaram melhores respostas para dois valores de vazão distintos. Isso pode ter ocorrido devido a importância do aporte de água pelos canais secundários, gamboas, polos urbanos e fazendas de carcinicultura não considerados no modelo e que auxiliam nesse ganho de vazão em direção a foz como observado por Bensi (2006). Apesar do modelo considerar o aporte de água devido a precipitação na superfície do estuário e

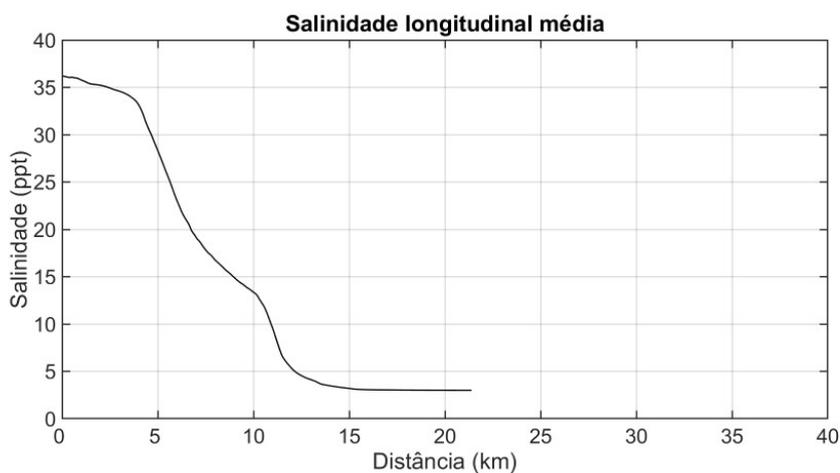
devido a descarga fluvial a montante em simulações futuras é necessário a inclusão dos canais secundários e o aporte ao longo do estuário.

Além disso, é sabido que o aumento do aporte fluvial tende a aumentar as profundidades do canal na região do Alto e Médio estuário, devido ao transporte de materiais para fora do sistema (DIAS *et al.*, 2008; DIAS *et al.*, 2009). Já nos períodos de menores aportes fluviais o sedimento tende a ser retrabalhado dentro do estuário (MARINS *et al.*, 2003). Segundo Bezerra *et al.* (2011), as batimetrias do rio Jaguaribe para o ano de 2004 e 2009 mostraram um aumento da profundidade do canal após a estação chuvosa do ano de 2009. Essas variações na batimetria influenciam na velocidade e sentido do fluxo (MIRANDA, 2002; LEE *et al.*, 2013), podendo criar giros ao longo do canal estuarino ou diminuir as velocidades de corrente. Como a batimetria usada no modelo foi coletada em 2012 e os dados de ADCP usados na validação coletados em 2009, as diferenças de batimetria podem explicar parte das diferenças entre as velocidades observadas e modeladas.

4.1.3 Salinidade

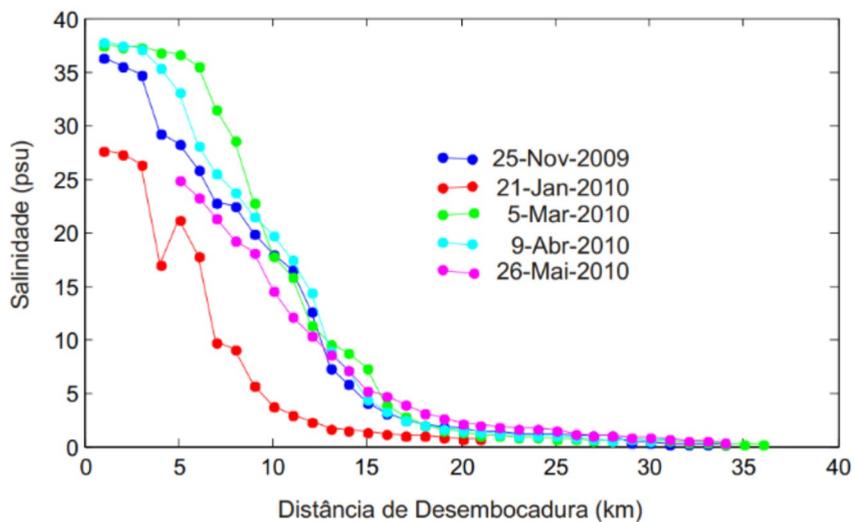
Schettini *et al.* (2014b), ao analisar os dados coletados em novembro de 2009, encontrou uma variação de salinidade ao longo do canal principal que variou entre $37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ na foz e em torno de $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ a 18 km a montante, com uma taxa de decaimento de $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Quando feito a comparação entre os resultados encontrados por Schettini *et al.* (2014a) e os resultados obtidos na simulação para o mesmo período, a variação da salinidade foi próxima oscilando de $36,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ a $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ na foz e a 18 km a montante, respectivamente, possuindo uma taxa de decaimento de $1,9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (Figura 21 e 22).

Figura 21 – Média vertical das salinidades do modelo em um perfil longitudinal entre a desembocadura e 18 km a montante durante a preamar de sizígia do mês de agosto de 2009.



Fonte – O autor.

Figura 22 – Variação longitudinal da salinidade encontrada por Schettini *et al.* (2014a) entre a desembocadura e 35 km a montante do estuário do Rio Jaguaripe. Dados médios da coluna d'água.

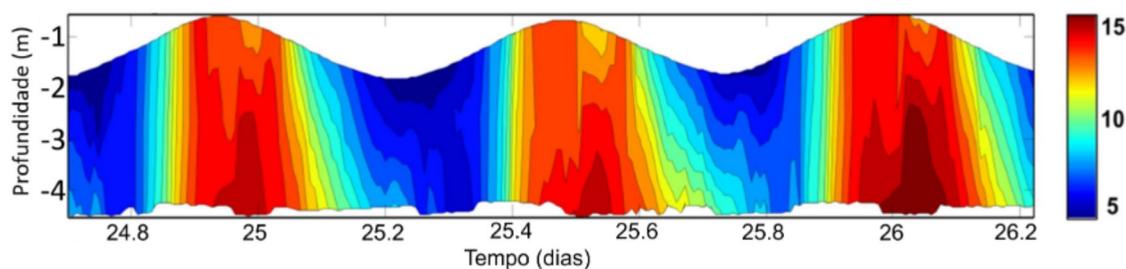


Fonte – Adaptado de Schettini *et al.* (2014a)

A estratificação vertical de salinidade ao longo do tempo encontrada por Frota *et al.* (2013) para o mês de novembro do ano de 2009, apresentou valores variando de $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ em superfície a $20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ no fundo (Figura 23). As simulações para o mesmo período mostraram estratificação vertical de salinidade próxima à apresentada pelos autores Frota *et al.* (2013), com valores de salinidade variando de $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ em superfície e $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ no fundo (Figura 24).

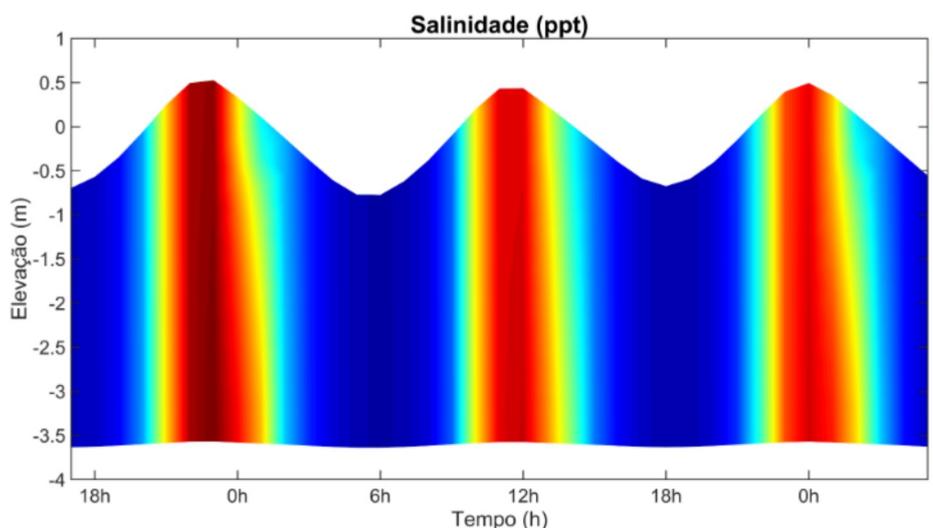
Com base nestes resultados pode-se notar que o modelo foi capaz de reproduzir o campo de salinidade observado no rio Jaguaribe durante o ano de 2009.

Figura 23 – Variação temporal da salinidade apresentada por Frota *et al.* (2013) para a região do médio Jaguaribe para o mês de novembro do ano 2009 em um ponto coletado no médio estuário.



Fonte – Adaptado de Frota *et al.* (2013).

Figura 24 – Variação temporal da salinidade modelada para a região do médio Jaguaribe.



Fonte – O autor.

4.2 Cenários climatológico e seco

Após a validação dos resultados das simulações para o ano de 2009, as vazões e forçantes climatológicos foram mudados afim de simular condições hidrodinâmicas para um ano climatológico e um ano seco.

4.2.1 Campos de velocidade

Os campos de velocidade analisados referem-se a velocidade longitudinal média da seção e a velocidade residual nas interfaces AE/ME e ME/BE e as distribuições horizontais dos campos de velocidade média da coluna d'água na estação chuvosa (mês de abril) e seca (novembro) dos cenários climatológico e seco.

Durante o período chuvoso do cenário com vazões climatológicas a velocidade longitudinal média apresentou dois padrões ao longo do estuário. Na interface ME/BE a velocidade longitudinal média apresentou um padrão bidirecional, enquanto que na interface AE/ME a velocidade longitudinal média apresentou um padrão unidireci-

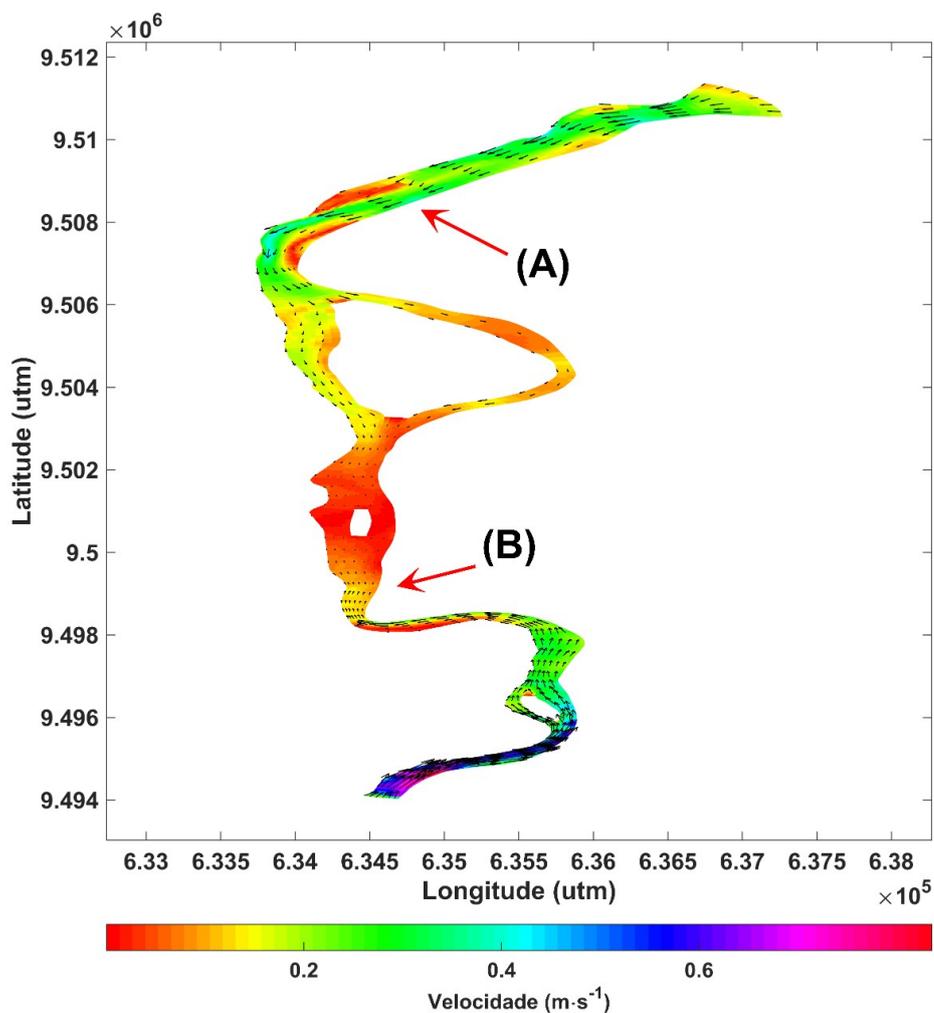
onal (Figura 26). Na interface ME/BE as velocidades em superfície foram mais intensas durante a vazante chegando a possuir valores negativos de velocidade longitudinal média, mostrando a influência da maré na inversão da direção das correntes nesta região. As velocidades variaram de $-0,25$ a $0,91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície, com um decaimento em direção ao fundo durante a vazante e um aumento em direção ao fundo durante a enchente, variando entre $-0,28$ e $0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente. O padrão bidirecional observado na interface ME/BE, não é observado na interface AE/ME, apresentando esta, um padrão unidirecional. O padrão de correntes dessa interface mostra que o aporte fluvial tem maior influência na direção das correntes nessa região. As velocidades em superfície variaram entre $0,09$ e $0,59 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, decaindo em direção ao fundo, onde variaram de $0,07$ a $0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Por ter sido um ano atípico para as taxas pluviométricas do estado, o aporte fluvial no ano de 2009 foi muito acima da média, fazendo com que neste ano em questão o estuário fosse advectado para fora dos limites geomorfológicos (DIAS *et al.*, 2016a).

Diferentemente do que foi observado no cenários com vazões fluviais para o ano de 2009, mesmo com o pico de vazão climatológica as correntes não apresentaram um padrão unidirecional em todo o estuário.

A influência da maré pôde ser sentida em todo o baixo estuário até a região do médio estuário, alterando o sentido e as velocidades da corrente ao longo da coluna d'água (Figura 25). A confluência entre as regiões dominadas pela maré e a região dominada pelo aporte fluvial, se localizou próximo a interface AE/ME apresentando sentido e velocidades nulos.

Figura 25 – Magnitude e direção da velocidade média ao longo do estuário, durante a enchente de uma maré de sizígia do período chuvoso, para os cenários com vazões climatológicas. Interface ME/BE (A) e interface AE/ME (B).

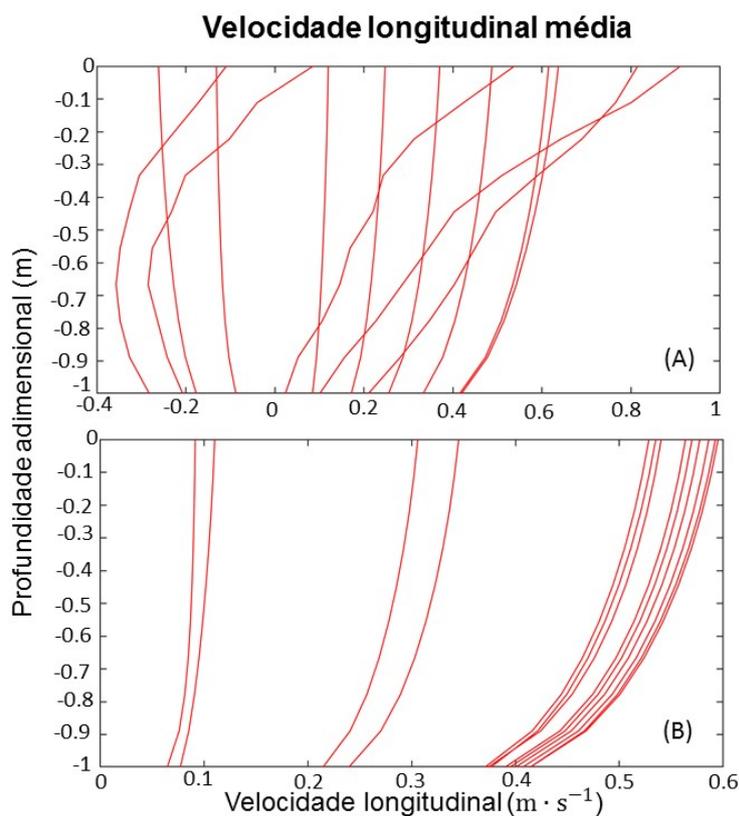


Fonte – O autor.

O período seco do cenário com vazões climatológicas apresentou um padrão bidirecional para a velocidade longitudinal média nas duas interfaces do estuário. Nesse

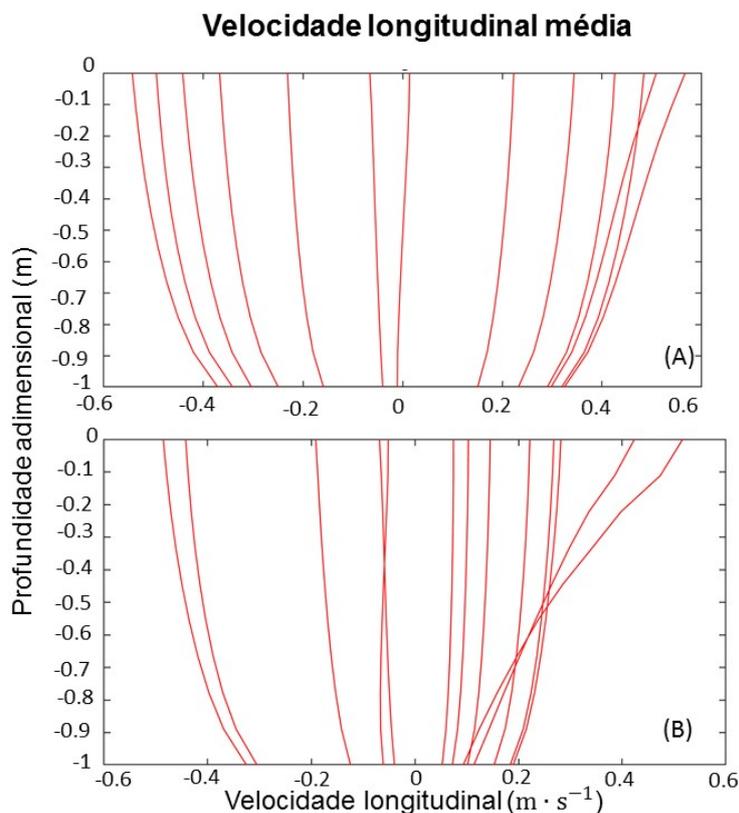
período o estuário apresentou uma dominância da maré vazante, com velocidades variando na interface ME/BE de $-0,55$ a $0,58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície e decaindo para $-0,38$ e $0,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no fundo, na interface AE/ME as velocidades variaram de $-0,48$ a $0,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície, decaindo para $-0,34$ a $0,19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no fundo (Figura 27). Esse padrão bidirecional apresentado ao longo do estuário durante o período seco, mostra que a pequena descarga fluvial presente neste período não consegue dominar a oscilação da maré, tornando-se as marés o principal mecanismo de controle sobre a hidrodinâmica da região estuarina.

Figura 26 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (Abril) para o cenário com vazões climatológicas.



Fonte – O autor.

Figura 27 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (Novembro) para o cenário com vazões climatológicas.



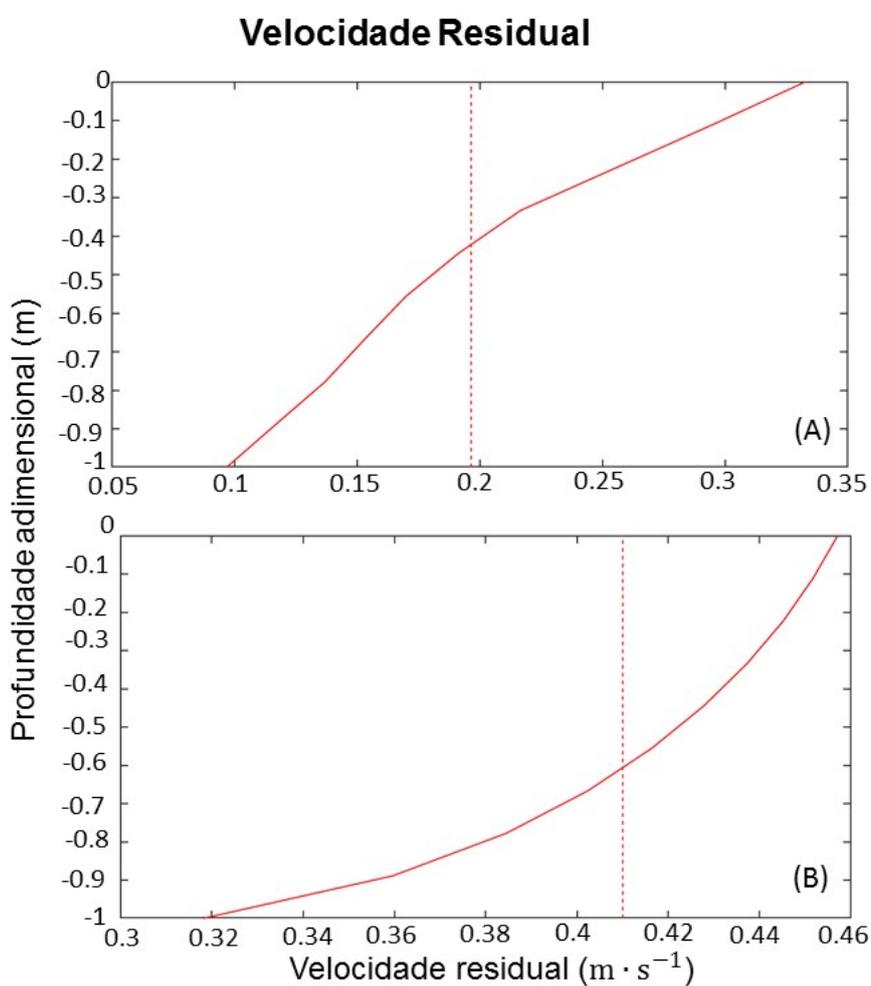
Fonte – O autor.

As velocidades residuais durante o período chuvoso apresentaram valores positivos ao longo de toda a coluna d'água indicando um transporte residual para a plataforma. Os valores de velocidade variaram entre de 0,46 a $0,32 m \cdot s^{-1}$, na superfície e no fundo respectivamente, com um valor médio de $0,41 m \cdot s^{-1}$ (Figura 28-B). Na interface ME/BE a velocidade residual apresentou valores menores em comparação com a interface AE/ME, nessa região a velocidade variou de 0,34 a $0,1 m \cdot s^{-1}$, em superfície e fundo respectivamente, com um valor médio de $0,2 m \cdot s^{-1}$ (Figura 28-A).

A velocidade residual do período seco apresentou valores positivos ao longo

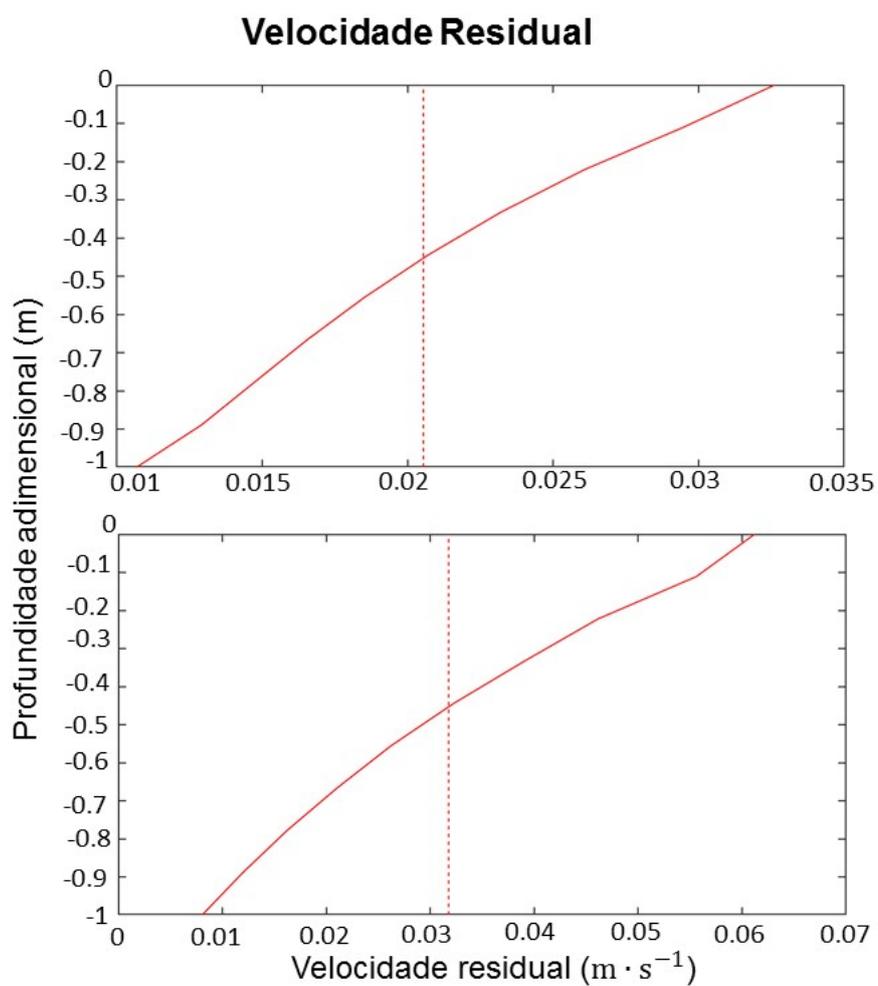
de toda a profundidade também indicando transporte residual para fora do estuário. As velocidades observadas para superfície e fundo foram respectivamente, $0,034$ a $0,011$ $m \cdot s^{-1}$ no ME/BE e de $0,061$ a $0,009$ $m \cdot s^{-1}$ no AE/ME, com valores médios de $0,021$ e $0,031$ $m \cdot s^{-1}$ respectivamente (Figura 29).

Figura 28 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (abril) para o cenário com vazões climatológicas.



Fonte – O autor.

Figura 29 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (novembro) para o cenário com vazões climatológicas.



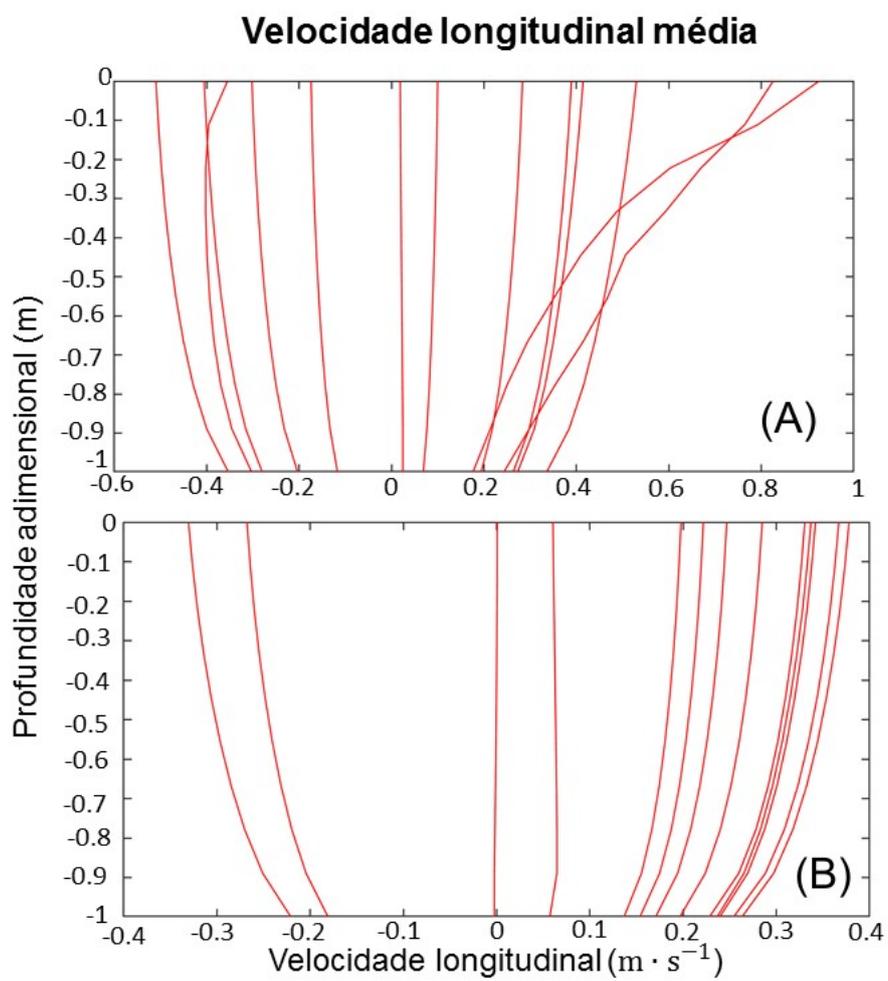
Fonte – O autor.

A simulação para o cenário seco apresentou um padrão bidirecional de velocidade longitudinal média nas duas interfaces durante o período chuvoso (abril). Na interface ME/BE as velocidades variaram de $-0,51$ a $0,92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície a $-0,35$ e $0,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no fundo (Figura 30-A). Na interface AE/ME as velocidades oscilaram entre $-0,33$ a $0,38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície a $-0,22$ a $0,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no fundo (Figura 30-B). Como no cenário climatológico a maré consegue inverter a direção das correntes no ME/BE. Já no AE/ME, pode-se observar que embora haja uma vazão de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ as correntes de maré agora conseguem inverter a direção das correntes e a circulação passa do padrão unidirecional do cenário climatológico para um padrão bidirecional. As velocidades ao longo de um ciclo de maré ocorrem no sentido de vazante em quase a totalidade (84%) do tempo, significando que mesmo embora o estuário apresente uma influência da maré nessa região, a descarga do rio ainda possui um papel dominante no sentido das correntes do cenário seco.

Durante o período seco (novembro) do cenário seco, a velocidade longitudinal média apresentou um padrão bidirecional nas duas interfaces. Na interface ME/BE a velocidade variou entre $-0,54$ a $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície e de $-0,37$ a $0,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no fundo (Figura 31-A). Esta interface também mostrou uma simetria nas correntes ao longo de um ciclo de maré. Na interface do AE/ME a velocidade longitudinal variou entre $-0,58$ e $0,29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ em superfície e entre $-0,39$ e $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no fundo (Figura 31-B). Nesta interface as correntes apresentaram um padrão assimétrico com maiores velocidades e menor período de enchente e menores velocidades e um maior período de vazante.

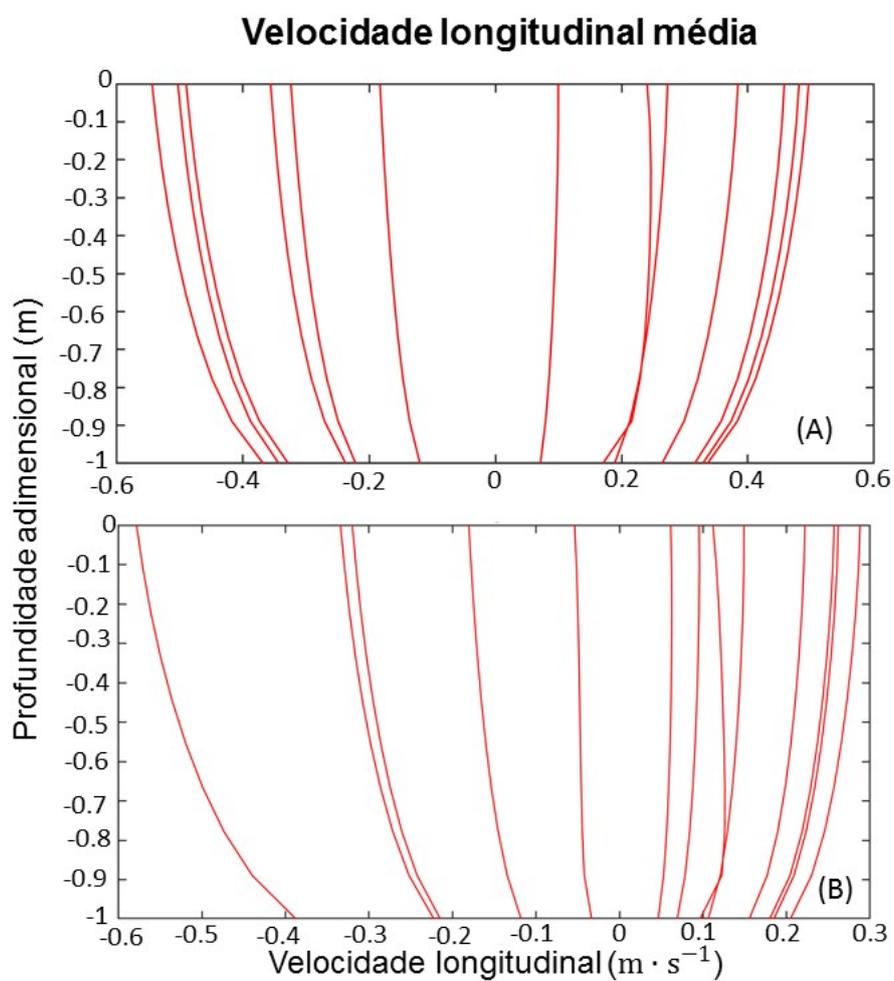
A velocidade residual do período chuvoso, nesta simulação, apresentou um caráter exportador, com a velocidade residual apresentando valores positivos nas duas interfaces, ao longo de toda a coluna d'água. A interface ME/BE apresentou velocidade média de $0,075 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 32-A), enquanto a interface AE/ME apresentou velocidades médias de $0,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 32-B).

Figura 30 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (abril) para o cenário seco.



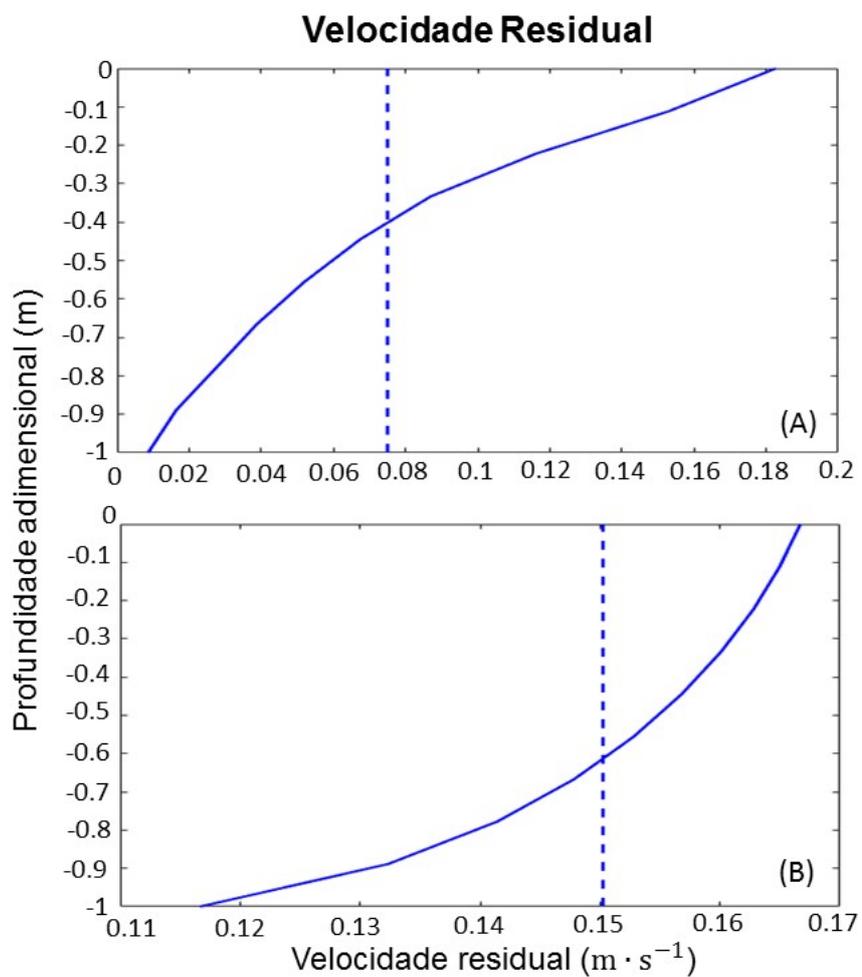
Fonte – O autor.

Figura 31 – Perfil vertical de velocidade longitudinal média para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (novembro) para o cenário seco.



Fonte – O autor.

Figura 32 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período chuvoso (abril) para o cenário seco.



Fonte – O autor.

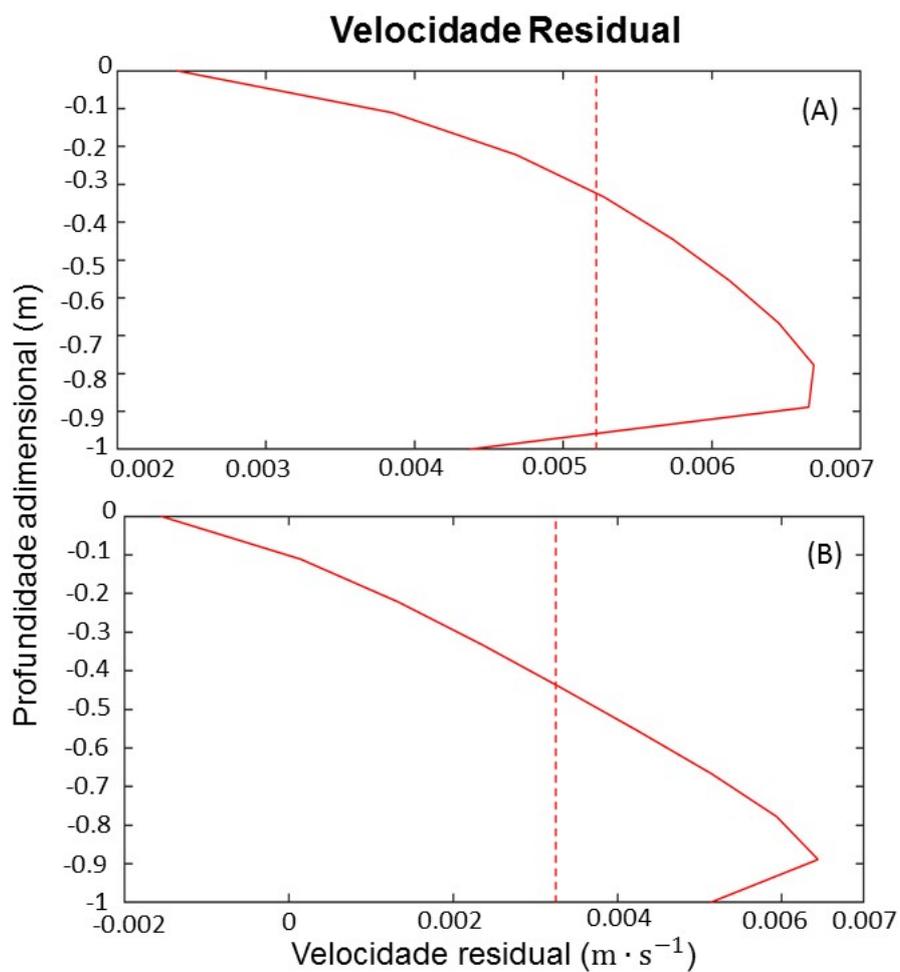
Comparando-se a velocidade residual das duas interfaces, observa-se uma diferença na variação da velocidade ao longo da coluna d'água, na interface ME/BE a velocidade em superfície, embora mais intensa, decai rapidamente até 40% da profundidade e após isso começa a ter uma diminuição mais suave. Em contra partida, na interface AE/ME possui uma queda gradual até aproximadamente 70% da profundidade após isso a velocidade diminui de forma mais abrupta devido ao atrito com o fundo. Essa variação na curva de velocidade ao longo da profundidade nas duas interfaces demonstra que embora a vazão possua uma grande influência na velocidade residual a medida que nos aproximamos da interseção entre o estuário e a plataforma ela começa a ser barrada pelos movimentos costeiros.

A velocidade residual durante o período seco apresentou valores positivos porém muito próximos a zero para todas as profundidades na interface ME/BE, enquanto que a interface AE/ME apresentou valores negativos em superfície e valores positivos ao longo da profundidade (Figura 33). As velocidades residuais desse período apresentaram um comportamento de circulação inversa, com os valores mínimos em direção a continente ocorrendo em superfície e maiores valores em direção a plataforma ocorrendo no fundo. Esse comportamento se deve a carácter hiper-salino deste cenário que será discutido na seção 4.2.3.

Ao contrario do ocorrido no ano de 2009, onde no período chuvoso o estuário apresentou um padrão de correntes longitudinais unidirecional (DIAS *et al.*, 2016a), no cenário climatológico mesmo o mês de maiores vazões apresentou um padrão bidirecional de circulação.

Comparando-se o cenário climatológico com o cenário seco, é possível observar uma redução nos valores das velocidade residual. No mês de novembro do cenário seco a velocidade residual, quase nula, em conjunto com a hipersalinidade que ocorre no estuário (seção 4.2.3), força uma circulação inversa no estuário com as maiores velocidades ocorrendo próximas ao fundo e em direção a plataforma.

Figura 33 – Perfil vertical de velocidade residual para a interface ME/BE (A) e a interface AE/ME (B), durante o período seco (novembro) para o cenário seco.



Fonte – O autor.

4.2.2 *Tempo de residência e exposição*

Para o cenário com vazões climatológicas e seco foram analisados os tempo de residência e exposição para os meses de abril e novembro, representando os períodos de maiores e menores vazões fluviais, respectivamente. Nas figuras 34 e 35 são apresentados as concentrações de flutuadores em cada seção do estuário como apresentado na figura 8. Uma contração 1 significa que 100% dos flutuadores liberados em uma região se encontram dentro daquela região. Com o passar do tempo as concentrações de flutuadores tende a diminuir na região de liberação e aumentar nas demais. Também é mostrado a concentração de flutuadores fora do estuário (plataforma). O T_r mínimo é definido como momento em que a concentração em plataforma deixa de ser zero (ou seja, ao menos uma partícula liberada em uma determinada região chega na plataforma) e o tempo máximo quando a concentração estabiliza (ou seja, todos os flutuadores deixaram o estuário pela primeira vez). O T_e é o tempo necessário para que a concentração inicial de partículas em uma dada região chegue a 36%.

Observando o T_r e o T_e de cada região, temos que no mês de abril os flutuadores da região do baixo estuário, médio estuário e alto estuário apresentaram um T_r mínimo e máximo variando entre de 4,8 e 18 horas, 7 e 30 horas e 9 e 32 horas, respectivamente (Figura 34).

Embora exista a presença de vazão 40% dos flutuadores liberados no baixo estuário chegaram a entrar no médio estuário devido a advecção pelas marés. Percebe-se também que aproximadamente 20% dos flutuadores retornou da plataforma para o estuário devido a influência das correntes de enchente de maré.

Devido a vazão os flutuadores do médio estuário não apresentaram nenhuma conectividade com o alto estuário, condizendo com o que foi apresentado sobre os campos de corrente para esse período. Percebe-se também que as marés transportam os flutuadores entre a plataforma e o baixo estuário.

Já os flutuadores liberados no alto estuário são transportados para as demais regiões sofrendo oscilações entre as mesma com as correntes de maré até serem totalmente advectados para fora do estuário.

Os Te do baixo, médio e alto estuário foram de 6.9, 7, 3.3 horas, respectivamente mostrando que a concentração inicial de flutuadores cai muito rápido devido as correntes.

Durante o mês de novembro os flutuadores da região do baixo estuário, médio estuário e alto estuário apresentaram um Tr variando entre de 1 e 4,8 horas, 4 horas e 17,25 dias e 3,8 e 37 dias, respectivamente (Figura 35).

Durante esse período é possível notar, devido a baixa vazão, a influência da oscilação da maré sobre os flutuadores nas três regiões. É possível observar que a oscilação de maré tem papel fundamental no transporte dos flutuadores no baixo estuário, com a concentração de flutuadores chegando a zero nas cinco primeiras horas e voltando a aumentar para 72% aproximadamente seis horas depois.

Os flutuadores liberados no médio estuário foram transportados para as demais regiões, variando de acordo com as oscilações da maré, sendo em quase sua totalidade transportados para o baixo estuário e apenas 1% dos flutuadores chegaram no alto estuário devido as correntes de enchente.

Os flutuadores lançados no alto estuário, são advectados para as demais regiões, sofrendo uma maior influência das oscilações de maré, quando comparados com os flutuadores lançados em abril dessa mesma simulação, sendo observado a presença de flutuadores nessa região até 28 dias depois do lançamento.

O Te das regiões do baixo, médio e alto estuário foi de 2, 30, 19 horas, respectivamente. Comparando o Te de abril e novembro, podemos observar maiores valores em novembro, mostrando a influência que a vazão exerce sobre a renovação de água do estuário.

A figura 36-A apresenta o Tr e Te do estuário como um todo. De forma geral,

durante o mês de abril todos os flutuadores saíram do sistema pelo menos uma vez em 1,3 dias, percebendo-se também a menor influência da maré no estuário como um todo. O Te foi de 0,75 dias (Figura 36-A).

No mês de novembro todas as partículas saíram da região estuarina em um período de 37 dias, podendo ser observado uma influência mais preponderante da maré sobre a concentração de flutuadores. O estuário demorou 8 dias para renovar 64% do seu volume (Figura 36-B). Este valor é cerca de 10x maior que o valor do período chuvoso mostrando a importância da vazão para a renovação das águas do sistema.

Figura 34 – Concentração de flutuadores no cenário climatológico para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de abril. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).

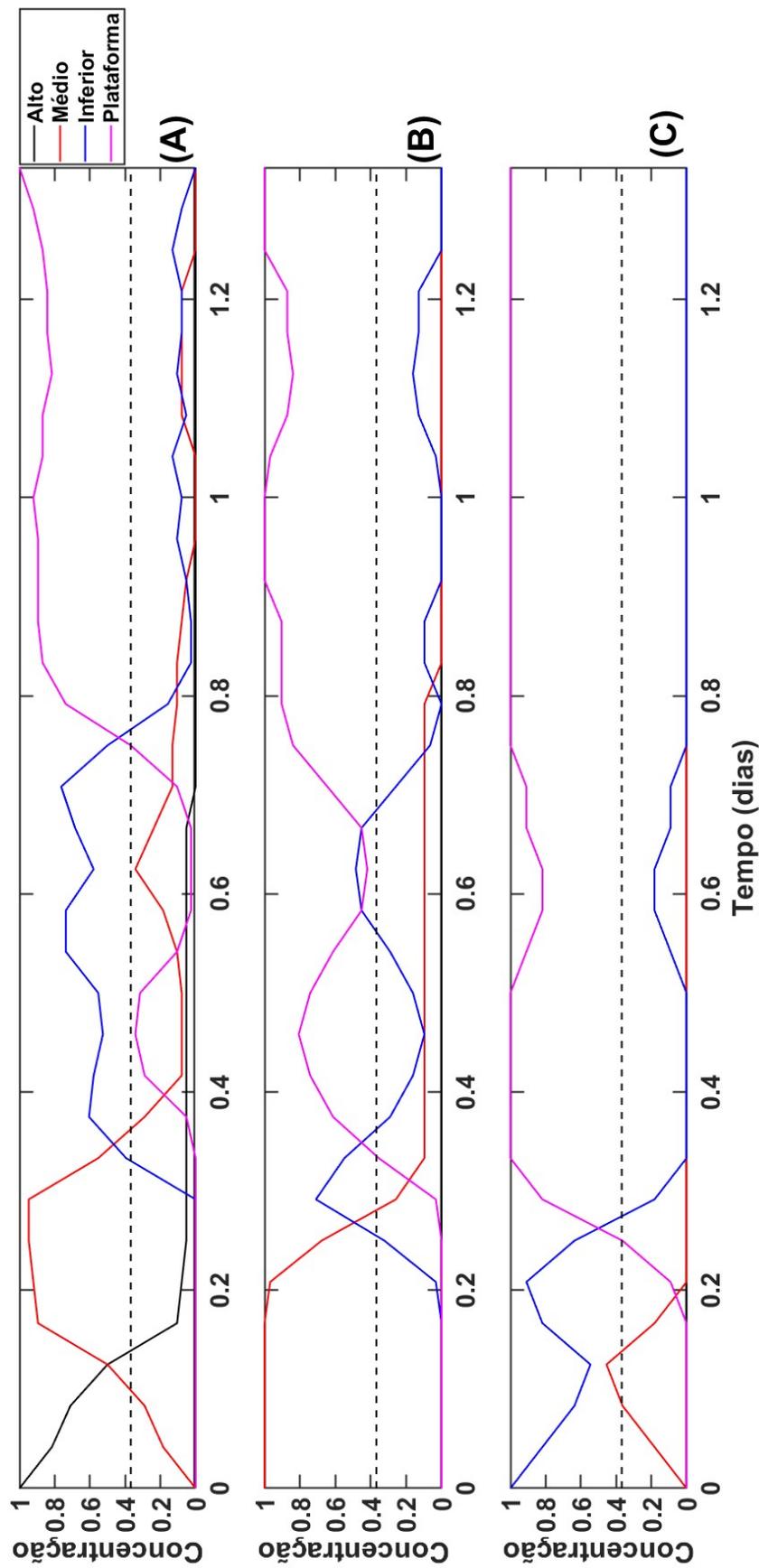


Figura 35 – Concentração de flutuadores no cenário climatológico para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de novembro. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).

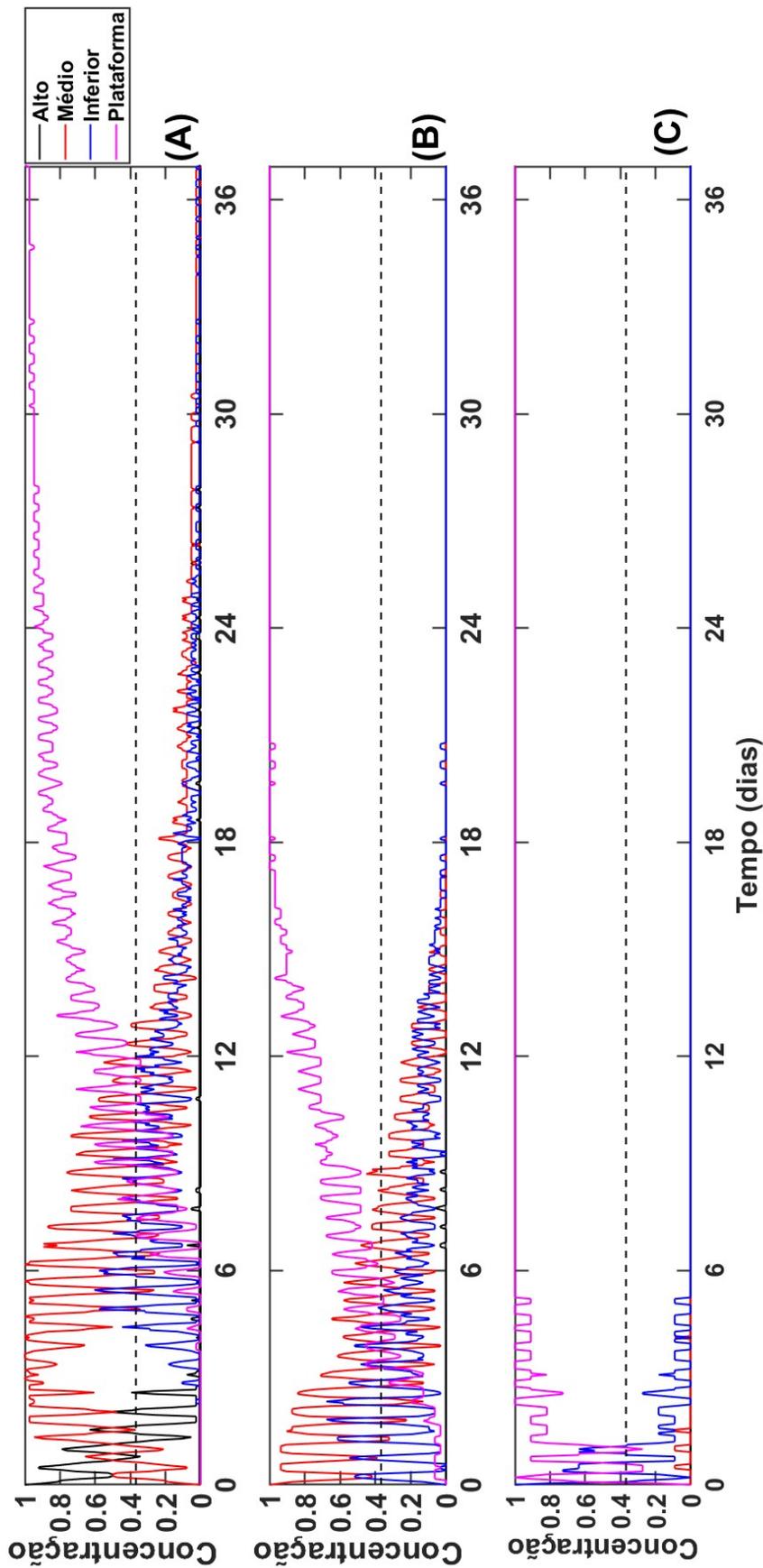
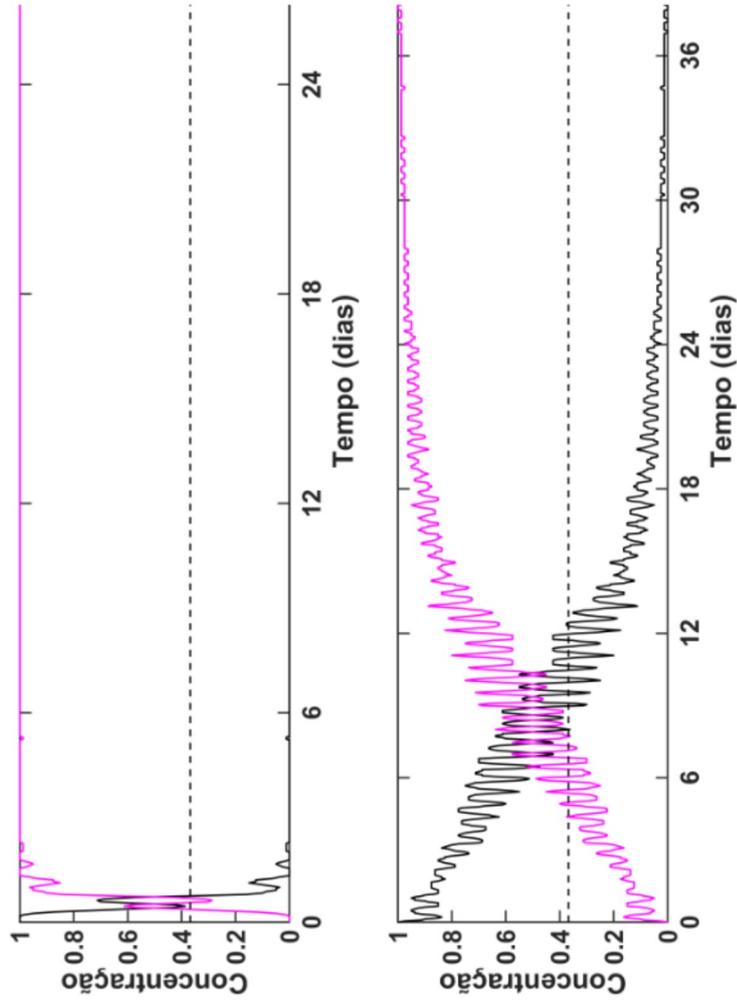


Figura 36 – Concentração de flutuadores no cenário climatológico para todo estuário do rio Jaguaribe durante o mês de abril (A) e novembro (B). As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas dentro ou fora do estuário (plataforma).



Fonte – O autor.

Lacerda *et al.* (2013), utilizando um modelo de caixa, apresentou que para o ano de 2009 os tempos de residência do estuário variaram na estação chuvosa e na estação seca variaram entre 0,5 e 3 dias e 0,2 e 13 dias, respectivamente. Malhadas *et al.* (2009) apresenta que o tempo de residência da lagoa costeira de Óbidos, varia de acordo com mudanças na profundidade dos canais. No presente estudo o Tr variou para a estação chuvosa e seca entre 0,2 e 1,3 dias e 0,04 e 37 dias. Embora não seja possível fazer uma comparação direta entre os resultados devido a diferença nas metodologias aplicadas, essa diferença no tempo de residência pode ter sido ocasionada pela diferenças na vazão.

Para o cenário seco também foram analisadas os Tr e Te nos meses de abril e novembro, para representar os períodos com vazão e sem vazão.

No mês de abril os flutuadores da região do baixo estuário, médio estuário e alto estuário apresentaram um Tr variando entre de 7,2 e 21 horas, 10 horas e 3,5 dias e 23,8 horas e 5,5 dias, respectivamente (Figura 37).

De todos os flutuadores liberados no baixo estuário, 90% deles chegaram a atingir o médio estuário durante as três primeiras horas, mesmo havendo a presença de vazão. Percebe-se também uma oscilação entre 10% e 20% no total de flutuadores que voltam da plataforma para o baixo estuário, devido as correntes de enchente. Assim como o cenário de vazão climatológica não há conectividade entre o baixo e alto estuário.

Os flutuadores lançados no médio estuário foram advectados para o baixo estuário, oscilando devido as correntes de maré. Nas três primeiras horas houve um transporte de 22% dos flutuadores para a região do alto estuário, devido as correntes de enchente, mas após este período a vazão transportou estes flutuadores para as demais seções. Nota-se que não havia conectividade entre o médio e alto setor no cenário vazão climatológica.

Os flutuadores liberados no alto estuário foram advectados para as outras regiões pela vazão, apresentando um padrão de oscilação causado pela maré apenas no

médio estuário e baixo estuário.

Durante o mês de novembro os flutuadores da região do baixo, médio e alto estuário apresentaram um Tr variando entre de 0,04 e 45 dias, 4,2 e 86,42 dias e 53 e 57 dias respectivamente (Figura 38).

Diferente dos resultados para o período de maior vazão e o cenário climático, agora em nenhuma das regiões os flutuadores liberados saíram completamente do estuário. Também pela primeira houve conectividade entre o baixo estuário e o alto estuário, onde cerca de 36% dos flutuadores liberados no baixo estuário chegaram na região do alto estuário.

Nas primeiras oito horas de simulação 100% dos flutuadores liberados no baixo estuário foram advectados para o médio estuário devido a corrente de enchente. Após um período de 3 dias, 72% dos flutuadores foram advectados para fora do estuário, porém 28% dos flutuadores permaneceram no sistema oscilando entre alto e médio estuário durante 110 dias de simulação.

Os flutuadores lançados no médio estuário oscilaram em um primeiro momento entre o alto e o baixo estuário de acordo com a variação da maré. A maior parte dos flutuadores lançados na região do médio estuário foram transportados para o alto estuário. De todos os flutuadores lançados apenas 35% chegaram foram advectados para fora do estuário.

Dos flutuadores lançados no alto estuário, apenas 26% foram advectados para as demais regiões, em algum momento da série temporal. Do total de flutuadores apenas 7% atingiram a região do baixo estuário, e apenas 3% foram advectados para fora do estuário. Ao final da simulação o alto estuário ainda apresentava uma concentração de 90% dos flutuadores lançados.

Esse acúmulo e a oscilação dos flutuadores no alto e médio estuário mostra um caráter importador durante um cenário com vazões abaixo da média durante os meses em que não há vazão fluvial.

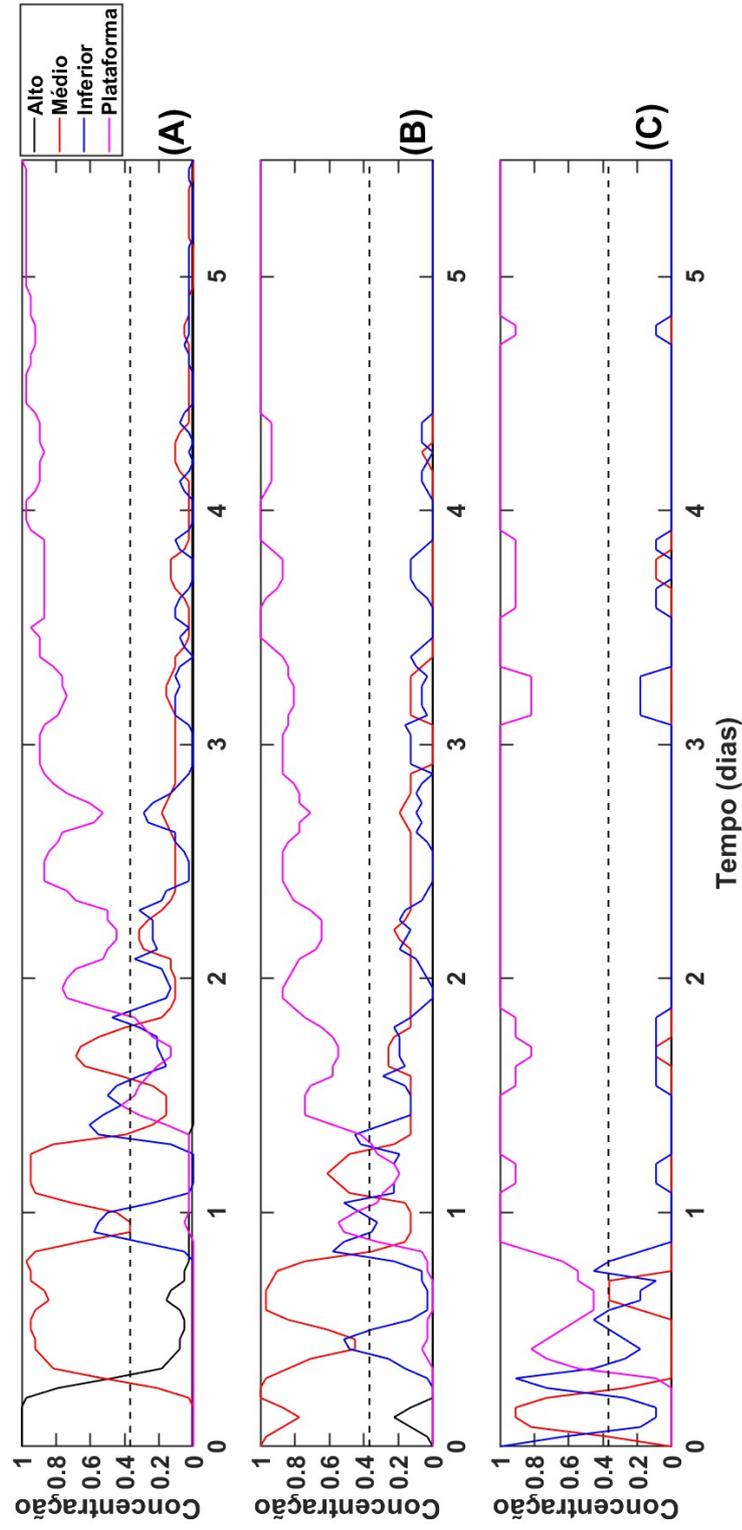
O T_e para o médio estuário e o baixo estuário foi de 15 e 0.1 dias, respectivamente, porém a região do alto estuário não teve 63% do seu volume renovado ou seja o seu T_e não foi atingido no período de simulações mostrando a baixa renovação que ocorre neste cenário.

Considerando todo o estuário do Rio Jaguaribe durante o mês de abril quase todas as partículas saíram da região estuarina após seis dias e T_e foi de 2 dias (Figura 39-B). Já no mês de novembro apenas 25% das partículas deixaram a região estuarina e não é atingido o T_e (Figura 39-A).

A variação temporal da concentração observada nos dois cenários (climatológico e seco), mostra a importância do aporte continental na renovação do volume de água da região estuarina no mês de abril. Já o mês de novembro possuiu duas componentes importantes, onde durante o cenário climatológico, além da importância da pequena drenagem continental, pode-se observar a importância da oscilação da maré na concentração de flutuadores dentro do sistema. Isso mostra que para essa simulação, embora haja pouca vazão fluvial, a dinâmica da plataforma também vai influenciar na troca de água do sistema. Durante o cenário seco, o mês de novembro não possuiu vazão fluvial, fazendo com que o principal mecanismo para renovação das águas estuarinas fosse a oscilação da maré e as águas costeiras (Figuras 36 e 39).

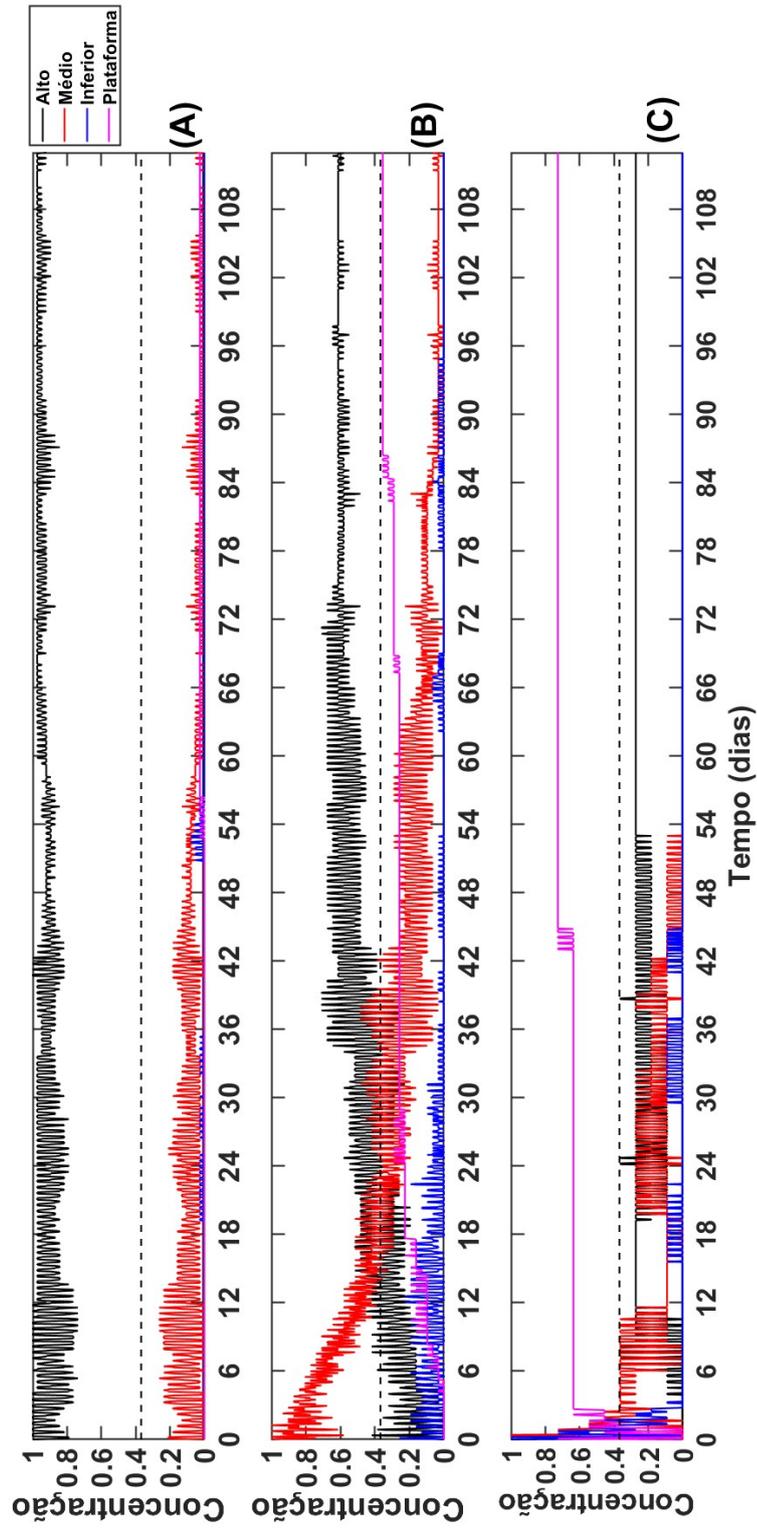
Comparando os dois cenários podemos observar que se houver uma vazão mínima o estuário vai se comportar com um caráter exportador, enquanto que se acontecer prolongados períodos de estiagem, o estuário adquire um caráter importador.

Figura 37 – Concentração de flutuadores no cenário seco para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de abril. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).



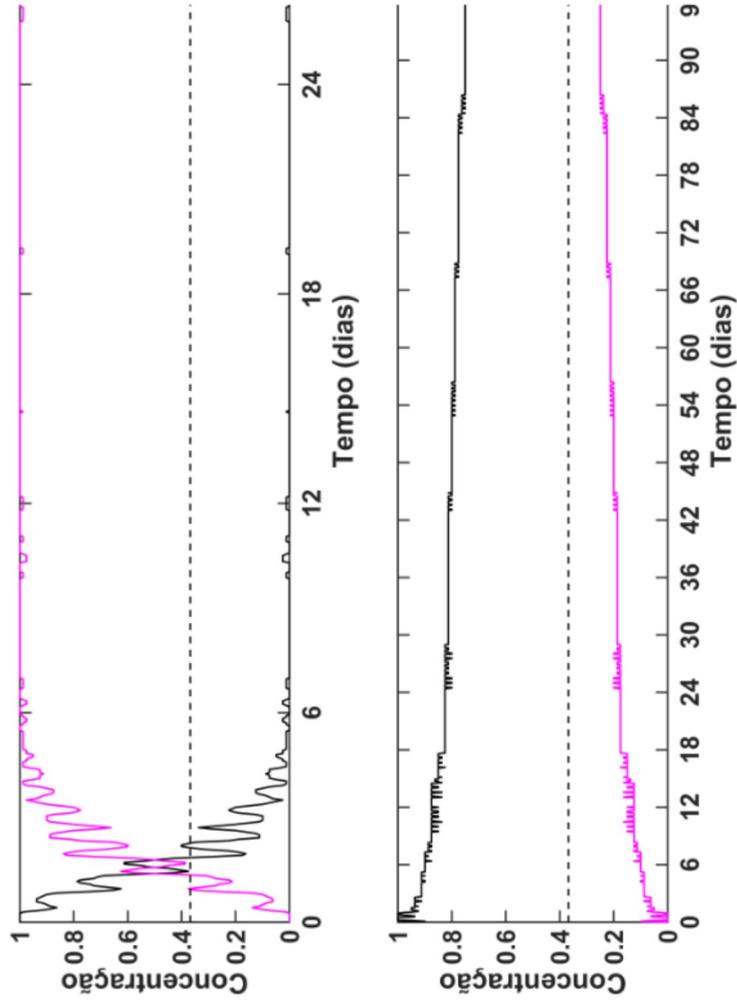
Fonte – O autor.

Figura 38 – Concentração de flutuadores no cenário seco para cada setor do estuário do rio Jaguaribe durante o mês de novembro. (A) Concentração de flutuadores liberados no Alto Jaguaribe; (B) Concentração de flutuadores liberados no Médio Jaguaribe; (C) Concentração de flutuadores liberados no Baixo Jaguaribe. As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).



Fonte – O autor.

Figura 39 – Concentração de flutuadores para todo estuário no cenário seco durante o mês de abril (A) e novembro (B). As linhas denotam a concentração normalizada de partículas liberadas em um dado setor nos demais setores ou fora do estuário (plataforma).



Fonte – O autor.

4.2.3 Salinidade

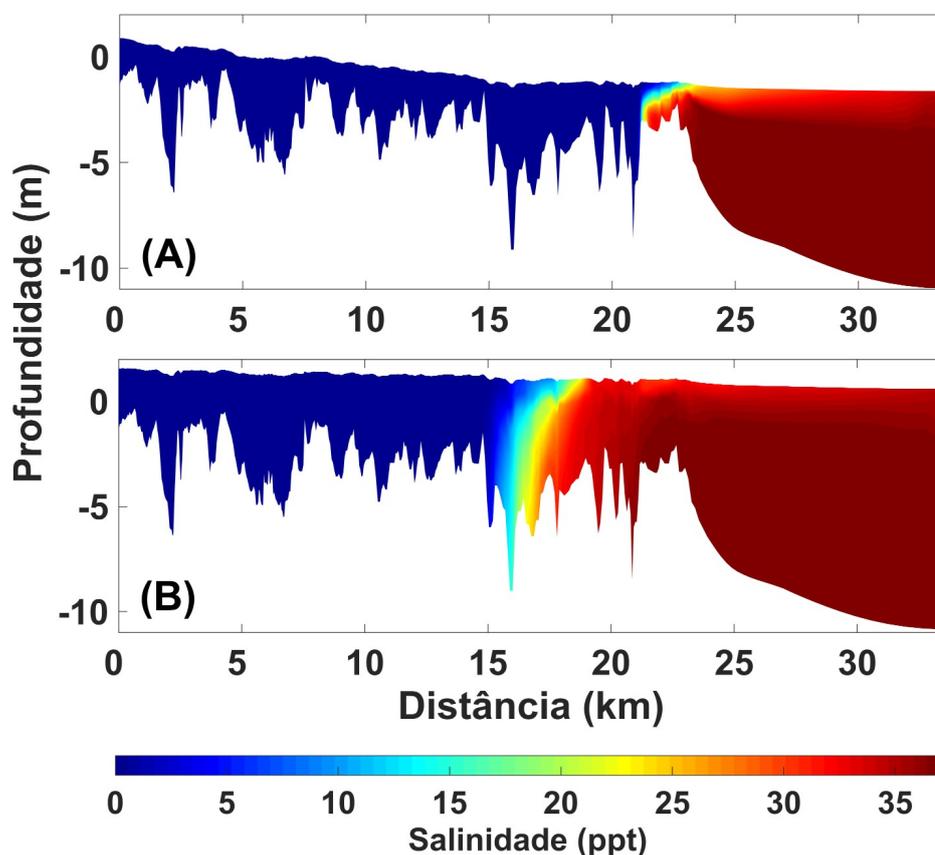
A variação espacial da salinidade foi avaliada nos meses de abril e novembro nos cenários com com vazões climatológicas e com vazões de um ano seco. Em ambos os meses foi escolhido o dia de maior altura de maré de sizígia e comparados a variação espacial da salinidade na preamar e na baixa-mar. Em todas as figuras longitudinais de salinidade a foz do estuário está localizada a 20 km do ponto inicial.

No cenário com vazões climatológicas, o mês de abril apresentou características de um estuário parcialmente misturado. A penetração de sal ocorreu apenas no baixo estuário, durante as marés de enchente. A zona de mistura variou entre o baixo estuário e a plataforma, chegando a aproximadamente 5 km estuário adentro e 3 km na plataforma (Figura 40). A pluma estuarina pôde ser observada, perpendicularmente a linha de costa, a mais de 10 km da foz do estuário, durante a baixa-mar. Foram observado salinidades próximas a zero a montante, com um aumento da salinidade na interface ME/BE durante a preamar. Durante a baixa-mar a zona de mistura foi advectada para fora dos limites do estuário. Durante a vazante foram observadas salinidades maiores que $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ apenas nos 500 m iniciais da região estuarina. A estrutura vertical de salinidade média mostrou que não houve transporte de sal para a interface AE/ME (Figura 41-A), na interface ME/BE a salinidade apresentou uma variação em superfície entre 0 e $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, e no fundo entre 0 e $29.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Figura 41-B).

Em novembro durante o período seco, com base na variação vertical de salinidade o estuário mostrou-se bem misturado. Nesse mês a diminuição das vazões e conseqüentemente a diminuição da sua dominância sobre a hidrodinâmica local, como discutido na seção 4.2.1, causa um maior entranhamento da salinidade na região estuarina, podendo ser sentida a aproximadamente 13 km estuário adentro. Devido a baixa vazão deste período a pluma estuarina ficou retida próxima a costa, apresentando um padrão oblíquo nos 3 km iniciais e não chegando a 5 km de extensão, durante a baixa-mar (Figura

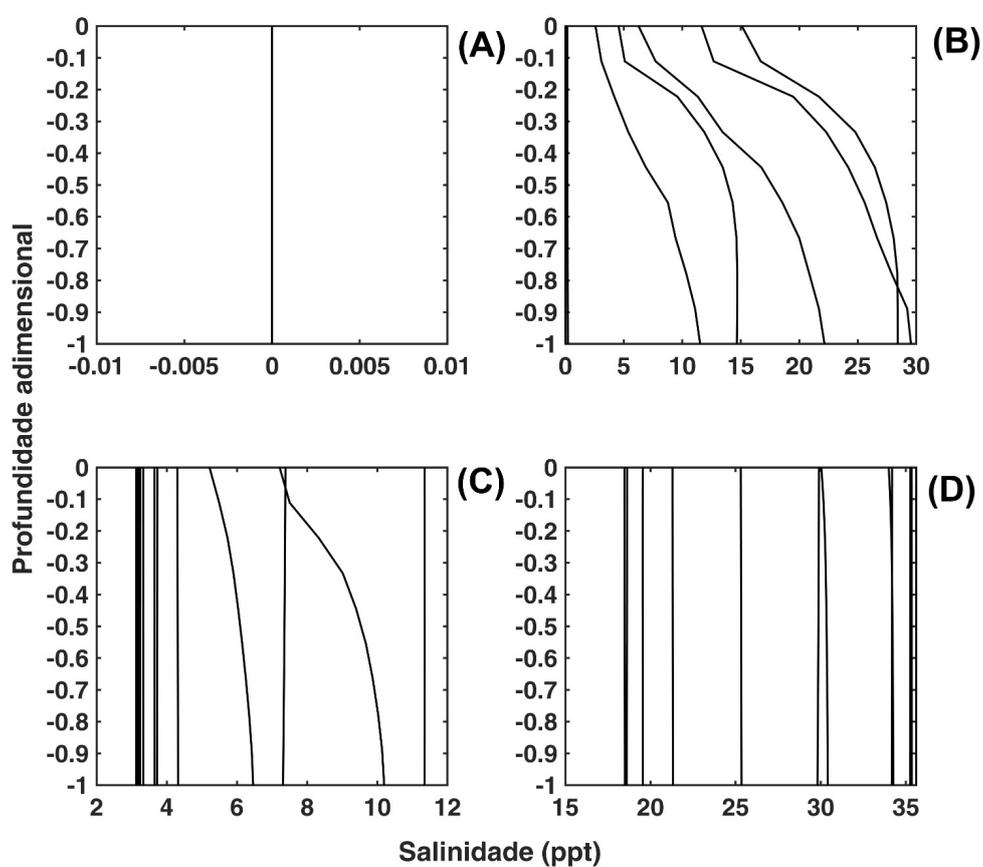
42). A zona de mistura ocorreu entre 15 e 22 km a jusante do ponto de descarga durante a baixa-mar e entre 8 e 13 km durante a preamar. Ao contrario do período chuvoso, no período seco pôde-se observar na interface AE/ME uma variação da salinidade entre 3,1 e 11,3 $g \cdot kg^{-1}$, com um padrão verticalmente homogêneo (Figura 41-C). Na interface ME/BE a salinidade também apresentou um padrão verticalmente homogêneo, com a salinidade variando entre 18,5 e 35,4 $g \cdot kg^{-1}$ (Figura 41-D).

Figura 40 – Variação longitudinal da salinidade durante a baixa-mar (A) e preamar (B) de sizígia do mês de abril para o cenário com vazões climatológicas.



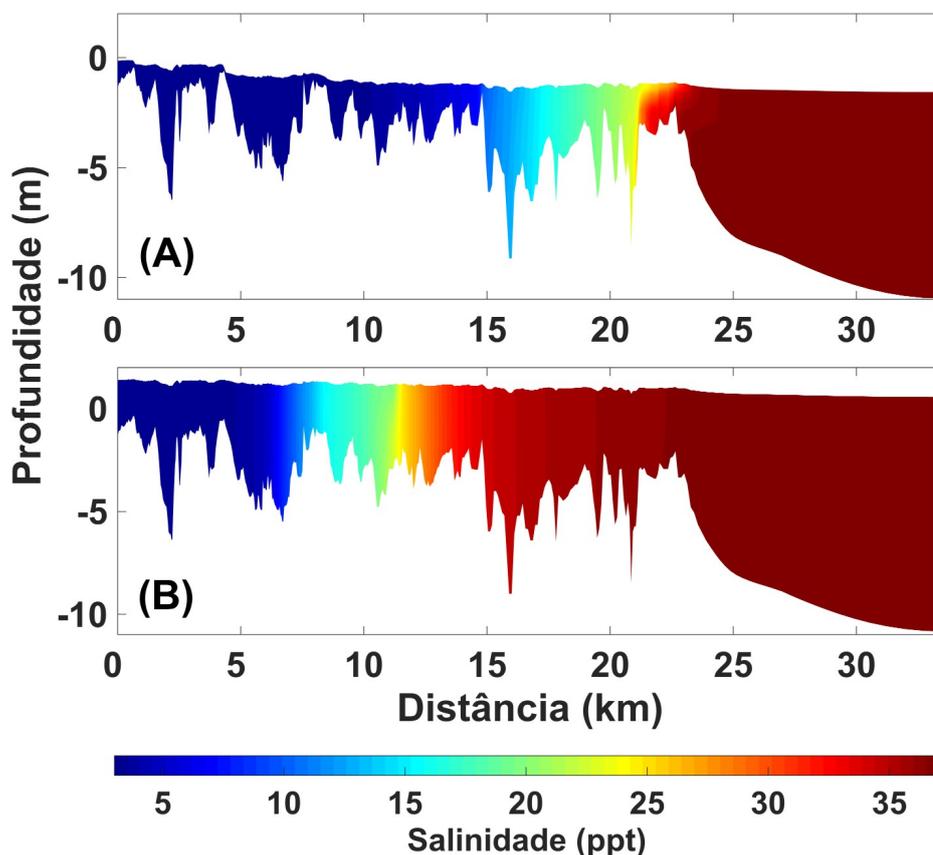
Fonte – O autor.

Figura 41 – Estratificação vertical da média de salinidade para o mês de abril (A e B, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) e o mês de novembro (C e D, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) para o cenário climatológico.



Fonte – O autor.

Figura 42 – Variação longitudinal da salinidade durante a baixa-mar (A) e a preamar (B) de sizígia do mês de novembro para o cenário com vazões climatológicas.



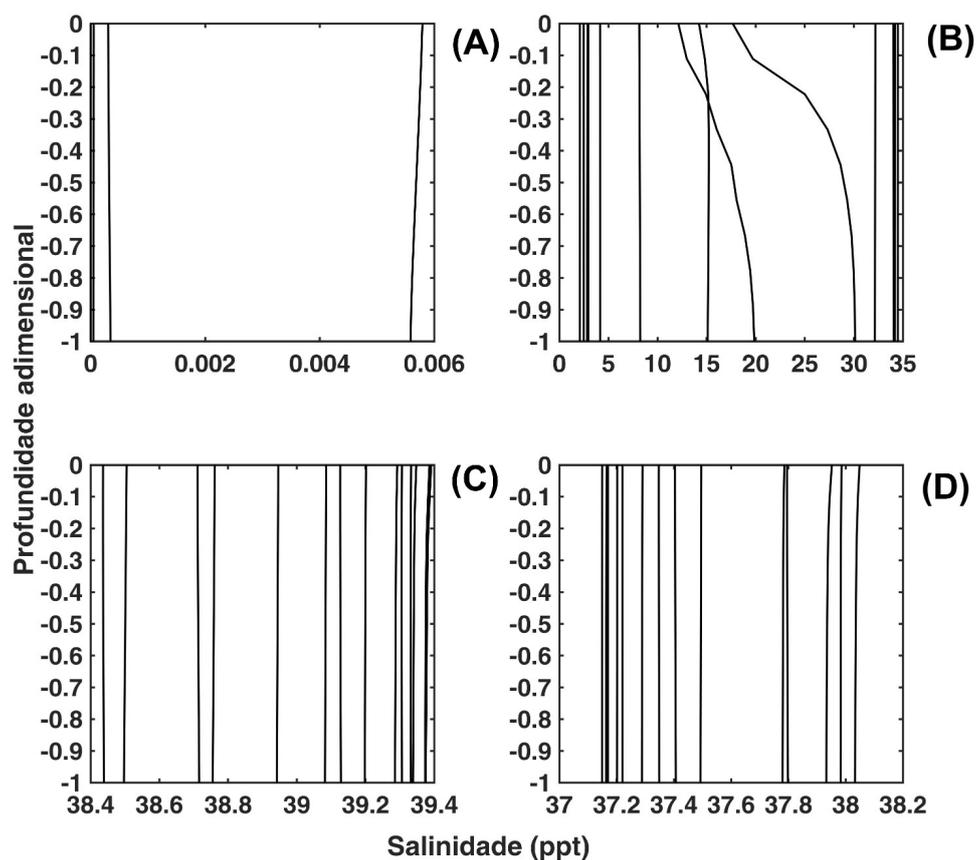
Fonte – O autor.

Comparando os meses de abril e novembro do cenário climatológico, podemos observar que o estuário possui um caráter clássico ou positivo, com menores salinidades a montante e maiores salinidades a jusante, ao longo do ano. A variação na intensidade das vazões alterou classificação do estuário, que variou de parcialmente misturado para bem misturado nos meses de abril e novembro, respectivamente.

No cenário seco, o mês de abril apresentou um padrão vertical de salinidade do tipo bem misturado. A intrusão salina foi observada até parte da região do médio

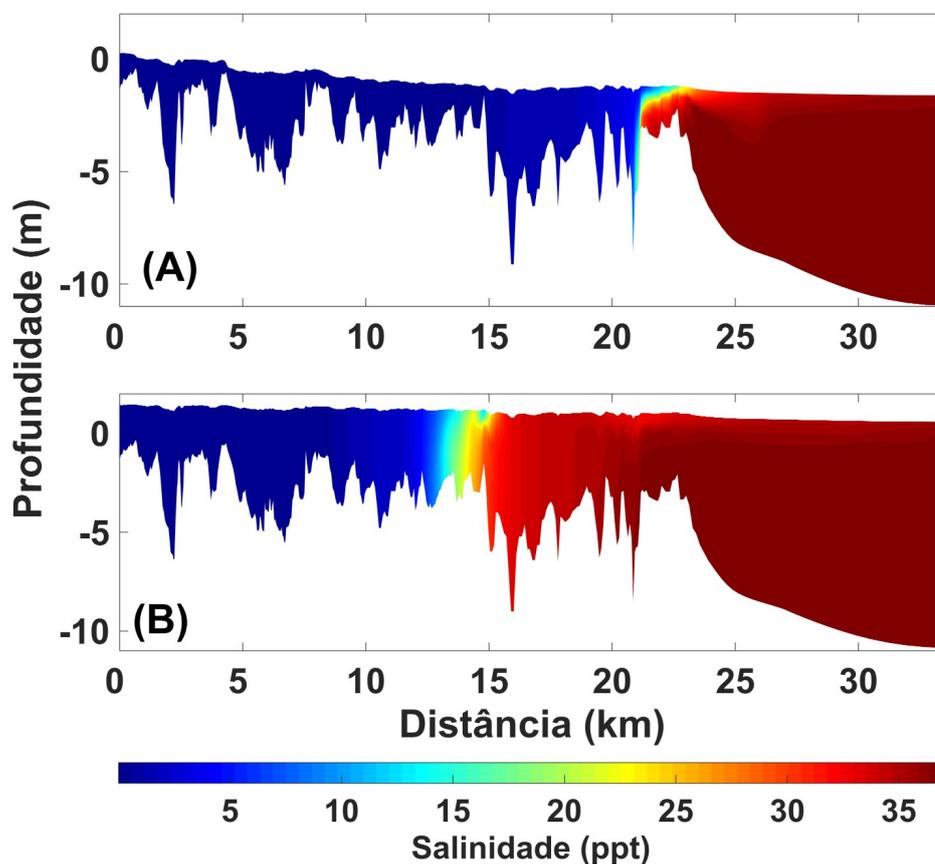
estuário, aproximadamente 10 *km* adentro, durante a preamar. O estuário apresentou menores salinidades a montante e maiores salinidades a jusante (Figura 44). Neste cenário pôde-se observar, embora muito baixa, a presença da intrusão salina na interface AE/ME, com valores de salinidade chegando a 0,006 durante a preamar (Figura 43-A). Na interface ME/BE a salinidade apresentou uma variação entre 2 e 35 $g \cdot kg^{-1}$, apresentando um caráter homogêneo verticalmente (Figura 43-B).

Figura 43 – Estratificação vertical da média de salinidade para o mês de abril (A e B, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) e o mês de novembro (C e D, interfaces AE/ME e ME/BE respectivamente.) para o cenário seco.



Fonte – O autor.

Figura 44 – Variação longitudinal da salinidade durante a preamar (A) e a baixa-mar (B) de sizígia do mês de abril com vazões para o cenário seco.

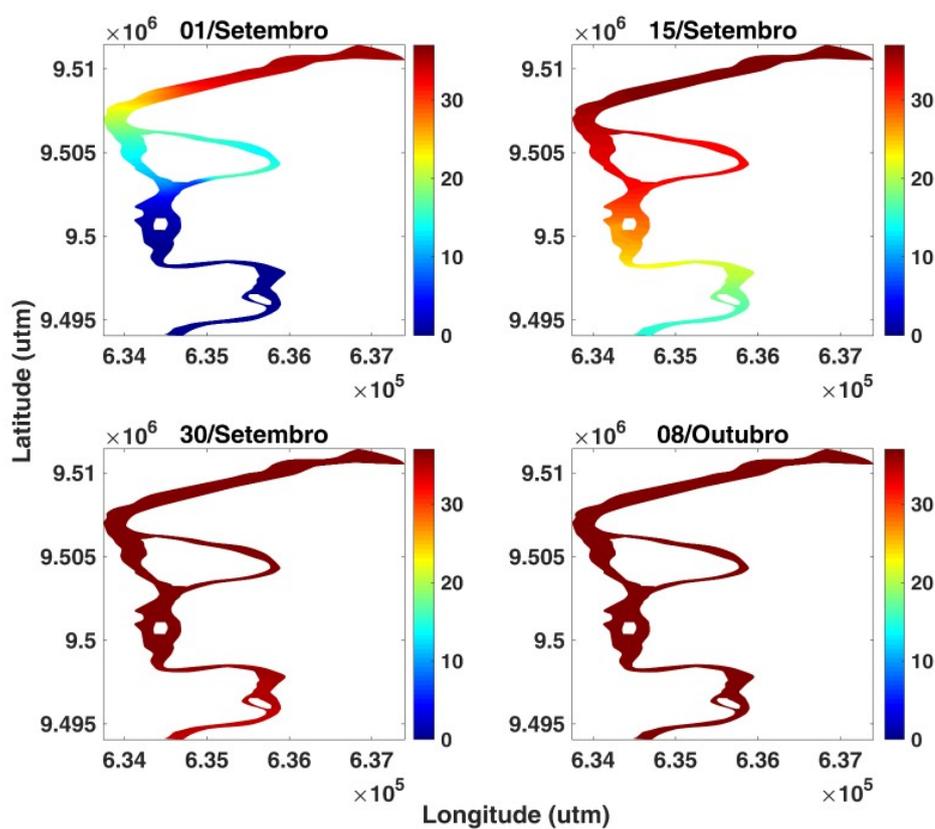


Fonte – O autor.

Durante o mês de novembro a variação vertical da salinidade caracterizou o estuário como bem misturado. Durante esse cenário o período seco apresentou uma hipersalinização, fazendo com que o estuário seja classificado como um estuário hipersalino ou negativo, com maiores valores de salinidade a montante que decaem em direção a foz (Figura 46). O estuário demorou 38 dias para ficar hipersalino, após as vazões cessarem por completo (Figura 45). A salinidade variou entre 41 e 39,5 $g \cdot kg^{-1}$, 39,5 e 38,5 $g \cdot kg^{-1}$, e 38,5 e 37, no alto estuário, médio estuário e baixo estuário respectivamente.

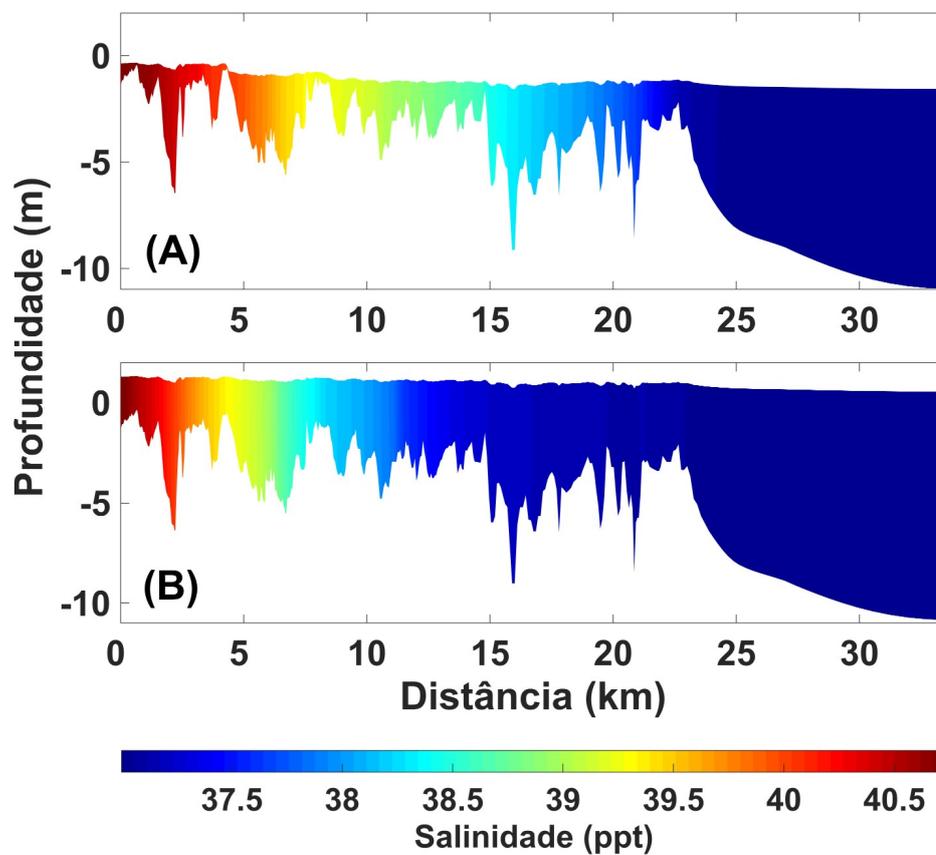
Durante a baixa-mar a salinidade apresentou um caráter uniforme ao longo do estuário, com a zona de mistura localizada na região do médio estuário. Durante a preamar a zona de mistura ocorreu até aproximadamente 10 km em direção a foz. A interface AE/ME apresentou valores mais altos de salinidade, quando comparada com a interface ME/BE, com valores oscilando ao longo de um ciclo de maré entre 38,4 e 39,4 $g \cdot kg^{-1}$ e 37,1 e 38,1 $g \cdot kg^{-1}$, respectivamente (Figura 43-C e 43-D).

Figura 45 – Tempo de hiper-salinização do estuário para o cenário seco, após cessadas as vazões.



Fonte – O autor.

Figura 46 – Variação longitudinal da salinidade durante a preamar (A) e a baixa-mar (B) de sizígia do mês de novembro com vazões para o cenário seco.



Fonte – O autor.

Marins *et al.* (2003) discorrem sobre a influência dos barramentos, ao longo das bacias do rio Jaguaribe, sobre o sistema estuarino. Os autores apresentam que para o mês de novembro de 2001, um ano extremamente seco na região, o estuário apresentou uma hiper-salinização até a barragem de Itaiçaba. Os resultados do modelo mostraram que para o limite superior do domínio modelado, localizado próximo a cidade de Aracati, o estuário apresentou um caráter hipersalino, com salinidades médias oscilando entre 39,5 e 40 $g \cdot kg^{-1}$. Esses valores de salinidade são corroborados por Marins *et al.* (2003) que apresenta valores de salinidade, coletados próximos a cidade de Aracati, de aproximadamente 39,1 $g \cdot kg^{-1}$.

A presença de um balanço hídrico negativo não é, necessariamente, a condição predominante para que haja hipersalinidade. Para que ocorra a hiper-salinização, é necessário que todo o excesso de água doce proveniente do período chuvoso deixe a região da bacia. Após não haver mais água doce da drenagem continental, o estuário retenha água por tempo suficiente para que o balanço hídrico negativo, aumente a salinidade (LARGIER, 2010).

Para o cenário climatológico e para o mês de abril do cenário seco o estuário do rio Jaguaribe é exportador e apresentou uma circulação clássica. Durante o mês de abril dos dois cenários o estuário apresentou uma estratificação de salinidade do tipo parcialmente misturado (MIRANDA, 2002), com mesmos resultados sendo apontados por Dias *et al.* (2016a) para o ano de 2009.

Os perfis verticais médios de salinidade durante o mês de novembro apresentaram um padrão uniforme ao longo da coluna d'água e fluxos médios unidirecionais ao longo da profundidade, o que segundo Valle-Levinson (2010), caracteriza o estuário como bem misturado durante essa época do ano. Em estuários rasos e estreitos pode ocorrer um maior cisalhamento das correntes de maré, esse aumento no cisalhamento acaba por produzir uma maior turbulência, cujo fluxo ao longo do estuário pode vir erodir a haloclina.

O mês de novembro do cenário com vazões de um ano seco, apresentou uma hipersalinidade característica de estuários hipersalinos, associado ao padrão de circulação observado para este mesmo período podemos classificar o estuário como inversos.

Embora as velocidades residuais para o cenário seco durante este período apresentadas na seção 4.2.1, tenham mostrado um caráter exportador, a sua velocidade é quase nula, fazendo com que não consiga remover acúmulo de sal gerado. Isto também é corroborado pelo resultados sobre o tempo de exposição do estuário durante o cenário seco.

Valentim (2016) modelou cenários de hipersalinidade para o estuário do rio Coreaú e mostrou que a hipersalinidade encontrada pode ter se desenvolvido devido ao processo de difusão turbulenta gerado pela oscilação da maré associada ao balanço hídrico negativo da região.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta em estudo sobre a variação sazonal da hidrodinâmica e suas interações com o Tr, Te e a intrusão salina, através de simulações numéricas forçadas com a climatologia de variáveis meteoceanográficas do NEB, usando o modelo Delft3D.

Pela primeira vez um modelo hidrodinâmico foi implementado para a região estuarina do Rio Jaguaribe. Este modelo foi capaz de reproduzir o regime de maré, velocidade e salinidade do estuário quando comparado com dados coletados durante o ano de 2009. Com base nas simulações realizadas observa-se a necessidade da inclusão da vazão de canais secundários em simulações futuras, de forma a reproduzir a circulação residual durante eventos de grande vazão.

A variabilidade hidrodinâmica do estuário é fortemente influenciada pelas taxas de vazão, precipitação e evaporação. Os cenários climatológicos mostraram que a região estuarina varia entre parcialmente misturado a bem misturado ao longo do ano, possuindo um comportamento clássico e tendo como principal forçante de estratificação a intensidade das vazões.

O estuário apresentou padrões de corrente bidirecionais durante todo o ano, no cenário climatológico e no seco. A circulação estuarina residual apresentou valores positivos, ocorrendo um caráter típico de circulação inversa quando o estuário torna-se hipersalino.

A diminuição das vazões não irá necessariamente causar uma hipersalinidade na região estuarina. Para que o estuário fique hipersalino é necessário que haja um período prolongado de estiagem, fazendo com que a descarga controlada pelos barramentos cesse. Após cessada essa descarga o estuário apresentou uma hipersalinização em aproximadamente um mês.

Existem diferenças sazonais na conectividade entre as regiões estuarinas,

sendo a presença de vazões um fator limitante para esta conectividade. Mesmo um período com vazões mínimas apresentaram uma baixa conectividade do baixo para o alto estuário. Após longos períodos de estiagem, que tendem a cessar as vazões, a conectividade entre todas as regiões passa a ocorrer.

O tempo de exposição e residência tendem a aumentar com a diminuição da vazão, sendo que não ocorre renovação suficiente para o tempo de exposição no período seco do cenário seco. O setor do alto estuário precisa de vazões para que haja renovação de seu volume, enquanto na região do baixo estuário esta renovação é feita pelas correntes de maré.

Podemos concluir que o ambiente estuarino do rio Jaguaribe, devido a presença de uma série de barramentos ao longo do canal do rio e a variabilidade climática do NEB, é um ambiente altamente dinâmico. Dada estas características, para se ter uma melhor representação dos padrões hidrodinâmicos da região estuarina é necessário a coleta de mais dados físicos em diferentes períodos do ano e em diferentes regimes hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- ANDUTTA, F.; MIRANDA, L.; CASTRO, B.; FONTES, R.; SILVA, C. Numerical simulation of the hydrodynamic in the curimataú estuary, rn brazil. p. 545–558, 01 2008.
- AZEVEDO, P. d.; SILVA, B. d.; RODRIGUES, M. Previsão estatística das chuvas de outono no estado do ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 1, p. 19–30, 1998.
- BENSI, M. Aplicação Do Correntômetro E Estuarinos Do Ceará E Paraíba - Nordeste Do Brasil E Estuarinos Do Ceará E Paraíba - Nordeste Do Brasil. **Dissertação de mestrado em Ciências marinhas tropicais**, p. 128, 2006.
- BEZERRA, L. J. C.; DIAS, F. J. S.; GODOY, M. D. P.; LACERDA, L. D.; MAIA, L. P. Levantamento Hidrográfico Da Região Estuarina Do Rio Jaguaribe (Ne-Brasil) Entre Os Anos De 2004 E 2009 . 2011.
- CAMERON, W. M.; PRITCHARD., D. W. Estuaries. **In M. N. Hill (editor): The Sea.**, John Wiley and Sons, New York, v. 2, p. 306–324, 01 1963.
- CAMPOS, J. N.; STUDART, T. de C.; FRANCO, S.; LUNA, R. Hydrological transformations in jaguaribe river basin during 20th century. 10 2000.
- CAVALCANTE, A. Distribuição temporal de descargas e alterações morfológicas em rios semiáridos: O rio jaguaribe no ceará, brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 35, p. 28–36, jul. 2018. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/133598>>.
- COGERH. Anuário de Monitoramento dos Açudes Gerenciados pela Cogerh. 2009.
- DAS, P. **Modelling of Ocean Tides**. Dissertação (DOUTORADO) — School of Philosophy, University Of New South Wales, Sydney, 1998.
- DELTARES. **Delft3D-FLOW User Manual**. [s.n.], 2014. Disponível em: <https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf>.
- DIAS; RV; MAIA. Hydrology of a well-mixed estuary at the semi-arid Northeastern Brazilian coast. **Acta Limnol. Bras**, v. 21, n. 4, p. 377–385, 2009.
- DIAS, F.; MARINS, R.; MAIA, L. Descargas de material particulado em suspensão para o estuário do rio Jaguarbe (CE). 2008.
- DIAS, F. J. d. S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D.; MIRANDA, L. B.; MARINS, R. V. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern

Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, Elsevier Ltd, v. 180, p. 258–274, 2016. ISSN 02727714. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2016.08.006>>.

DIAS, F. J. da S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D.; MIRANDA, L. B.; MARINS, R. V. Physical characteristics and discharges of suspended particulate matter at the continent-ocean interface in an estuary located in a semiarid region in northeastern Brazil. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 180, p. 258 – 274, 2016. ISSN 0272-7714. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771416302608>>.

DIAS, F. J. S. **Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE)**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2007.

DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P.; FARIAS, E. G. G. Dependência do tempo de residência da água no estuário do rio Jaguaribe (NE, Brasil), em relação a entrada de águas marinhas e descarga de água doce. **X congresso brasileiro de geoquímica (X CBGQ)**, 2005.

ESCHIRIQUE, S. A.; MARINS, R. V. Hidrogeoquímica do fósforo no estuário do Jaguaribe - CE/Brasil. **III Simpósio Brasileiro de Oceanografia**, 2007.

FERREIRA, A. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. ', p. 15 – 28, 12 2005.

FROTA, F. F.; PAIVA, B. P.; SCHETTINI, C. A. F. Intra-tidal variation of stratification in a semi-arid estuary under the impact of flow regulation. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 61, n. 1, p. 23–33, 2013.

GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**. [S.l.]: São Paulo: Cengage Learning, 2010. Tradução da 4ª ed norte-americana.

GREGORIO, H. P. **Modelagem numérica da dispersão da pluma do emissário submarino de Santos**. Dissertação (mestrado) — Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GUSEV, A. A.; MARTIN, I. M.; MELLO, M. G.; PANKOV, V.; PUGACHEVA, G.; SCHUCH, N. G.; SPJELDVIK, W. N. Bidecadal cycles in liquid precipitations in Brazil. **Advances in Space Research**, v. 34, n. 2, p. 370–375, 2004. ISSN 02731177.

HILL, G. E. Grid telescoping in numerical weather prediction. **Journal Appl. Meteorol**, v. 7, p. 29–38, 1968.

- HU, K.; DING, P.; WANG, Z.; YANG, S. A 2d/3d hydrodynamic and sediment transport model for the yangtze estuary, china. **Journal of Marine Systems**, v. 77, n. 1, p. 114 – 136, 2009. ISSN 0924-7963. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924796308003321>>.
- JIANG, Y.; KIRKMAN, H.; HUA, A. Megacity development: managing impacts on marine environments. **Ocean and Coastal Management**, v. 44, n. 5, p. 293 – 318, 2001. ISSN 0964-5691. Third Millennium Special Issue on Megacities. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569101000527>>.
- LACERDA, L.; MARINS, R. River damming and changes in mangrove distribution. v. 2, p. 1–4, 01 2002.
- LACERDA, L. D.; DIAS, F. J.; MARINS, R. V.; SOARES, T. M.; GODOY, J. M. O.; GODOY, D. P. L. Pluriannual watershed discharges of Hg into a tropical semi-arid estuary of the Jaguaribe River, NE Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 24, n. 11, p. 1719–1731, 2013. ISSN 01035053.
- LACERDA, L. D.; MARINS, R. V.; DIAS, F. J.; SOARES, T. M. O Paradoxo Ártico: Impacto das Mudanças Climáticas Sobre Rios Árticos e do Semiárido Aumentam a Exportação de Mercúrio para o Oceano. **Revista Virtual de Química**, 2012. ISSN 19846835.
- LARGIER, J. L. Low-inflow estuaries: hypersaline, inverse and thermal scenarios. **In: Contemporary Issues in Estuarine Physics**, A. Valle-Levinson(editor), Cambridge University Press, Cambridge., 2010.
- LEE, J.; WEBB, B. M.; DZWONKOWSKI, B.; PARK, K.; VALLE-LEVINSON, A. Bathymetric influences on tidal currents at the entrance to a highly stratified, shallow estuary. **Continental Shelf Research**, v. 58, p. 1–11, 2013. ISSN 02784343.
- LESSER, G.; ROELVINK, D. J.; KESTER, J. van; STELLING, G. Development and validation of a three-dimensional morphological model. **Coastal Engineering**, v. 51, p. 883–915, 10 2004.
- LUO, J.; LI, M.; SUN, Z.; O’CONNOR, B. A. Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide-dominated coastal-to-estuarine region. **Marine Geology**, v. 342, p. 14 – 27, 2013. ISSN 0025-3227. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322713001163>>.
- MAIA, L. P.; LACERDA, L. D.; MONTEIRO, L. H. U.; SOUZA, G. M. E. **Atlas dos Manguezais do Nordeste. Avaliação das Áreas de Manguezal dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco**. [S.l.]: JSuperintendência Estadual do Meio Ambiente, 2006.

MALHADAS, M. S.; SILVA, A.; LEITÃO, P. C. Effect of the Bathymetric Changes on the Hydrodynamic and Residence Time in Óbidos Lagoon (Portugal). **Journal of Coastal Research** **Journal of Coastal Research SI Journal of Coastal Research SI**, v. 56, n. 56, p. 549–553, 2009. ISSN 0749-0258. Disponível em: <ftp://ftp.mohid.com/MohidPapers/JournalofCoastalResearch/549.553{_}M.S.Malhadas{_}ICS20>.

MANN, K. H. **Ecology of coastal waters**. [S.l.]: John Wiley and Sons, Ltd. New York, 2000. v. 2nd ed.

MARENGO, J. A.; ALVES L. M., E. A. B.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. [S.l.: s.n.], 2015. cap. 13.

MARINS, R. V.; LACERDA, L. D.; IM, A.; DIAS, F. J. S. Efeitos da açudagem no rio jaguaribe. 04 2003.

MIRANDA, L. B. de. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários Vol. 42**. [S.l.]: EdUSP, 2002.

MOBERG, F.; RÖNNBÄCK, P. Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration. **Ocean and Coastal Management**, v. 46, n. 1, p. 27 – 46, 2003. ISSN 0964-5691. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569102001199>>.

MORAIS, J. O.; GRANHERO, C. M. M.; SILVA, E. V. D.; SOUZA, M. J. N. Diagnóstico geoambiental da bacia do jaguaribe. Relatório da PROJUR/SEMACE, p. 143, 2002.

OLIVEIRA, J. C.; AGUIAR, W.; CIRANO, M.; GENZ, F.; AMORIM, F. N. de. A climatology of the annual cycle of river discharges into the brazilian continental shelves: from seasonal to interannual variability. **Environmental Earth Sciences**, Springer, v. 77, n. 5, p. 192, 2018.

PAULA FILHO, F. J. **Distribuição e partição geoquímica de fósforo em sedimentos estuarinos do Rio Jaguaribe/Ce**. Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2004.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using t tide. **Computers and Geosciences**, v. 28, n. 8, p. 929–937, 2002.

PHILLIPS, N. A. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting. **Journal of Meteorolog**, p. 184–185, 1957.

PINHEIRO, L. d. S.; MORAIS, J. A. O. d. Interferências de barramentos no regime hidrológico do estuário do rio catú-ceará-nordeste do brasil. **Sociedade e Natureza**,

scielo, v. 22, p. 237 – 250, 08 2010. ISSN 1982-4513. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1982-45132010000200002&nrm=iso>.

POTTER, I. C.; CHUWEN, B. M.; HOEKSEMA, S. D.; ELLIOTT, M. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 87, n. 3, p. 497 – 500, 2010. ISSN 0272-7714. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272771410000363>>.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. d.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na américa do sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, scielo, v. 25, p. 185 – 204, 06 2010. ISSN 0102-7786. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862010000200004&nrm=iso>.

SCHETTINI, C.; BEZERRA, L.; TRUCCOLO, E. Distribuição longitudinal da salinidade em estuários de baixo influxo no ceará. **XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE**, p. 9, 2014.

SCHETTINI, C. B.; L.J.C.; TRUCCOLO, E. Xii simpósio de recursos hídricos do nordeste distribuição longitudinal da salinidade em estuários de baixo influxo no ceará. p. 1–9, 2014.

SILVA, A. B.; ARAGÃO, M. R. S.; CORREIA, M. F.; SILVA, P. K. O. Caracterização da variabilidade do vento no aeroporto internacional de fortaleza, ceará. parte 1: Análise da direção. **Meteorologia – SBMET, Congresso Brasileiro d Meteorologia – CBMET**, 2010. Disponível em: <http://www.sbmec.org.br/cbmet2010/artigos/341_32072.pdf>.

SILVA, V. de Paulo Rodrigues da. On climate variability in northeast of brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 58, n. 4, p. 575 – 596, 2004. ISSN 0140-1963. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196303001794>>.

TOBON, C. P. Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: Aplicación a la bahía meldorf en la costa del mar del norte alemán (phd thesis). 06 2002.

TRUCOLLO, E. C.; PAIVA, B. P.; FROTA, F. F.; FILHO, J. C. O.; LACERDA, L. D.; SCHETTINI, C. A. S. X I I SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE ASPECTOS HIDRODIN Â MICOS DO ESTU Á RIO DO RIO JAGUARIBE (CE). n. 81, p. 1–7, 2014.

VALENTIM, S. S. **Importância do balanço hídrico na circulação de um estuário do semiárido: o estuário do rio Coreaú (NW/Ceará/Brasil)**. Dissertação (DOUTORADO) — Programa de pós-graduação em ciências marinhas tropicais,

Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC)., 2016.

Valle-Levinson, A. **Contemporary Issues in Estuarine Physics**. [S.l.]: Published in the United States of America by Cambridge University Press, New York., 2010.

WARNER, J. C.; GEYER, W. R.; LERCZAK, J. A. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 110, n. C5, 2005. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JC002691>>.

ÁGUAS, A. N. D. **Atlas Nordeste – Abastecimento urbano de água: Alternativas de oferta de água para as sedes municipais da região nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais**. Superintendencia de planejamento e recursos hidricos., 2006. cap. 13. 82 p. Disponível em: <<http://www.integracao.gov.br/documents/10157/3678963/Atlas+Norrdeste+-+Abastecimento+Urbano+de+\%C3\%81gua.pdf/81e3a0c7-2b28-4d3e-9dd7-cd9a9ba3e50e>>.

ANEXO A – TABELA FEMAR

Dados da estação maregráfica da FEMAR localizada na margem direita do Rio Jaguaribe, próximo a pedra do chapéu.

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

Nome da Estação : BARRA DO RIO JAGUARIBE – CE					
Localização : Na margem direita, próximo à Pedra do Chapéu					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 04° 30,0' S		Longitude : 37° 46,0' W			
Período Analisado : 09/10/64 a 10/11/64			Nº de Componentes : 36		
Análise Harmônica : Método Tidal Liverpool Institute.					
Classificação : Maré Semidiurna.					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		V H 19 min	Nível Médio (Zo):		122 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sizígia (MHWS) :		235 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		181 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sizígia (MLWS) :		10 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		64 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	3,7	308
Ssa	-	-	N ₂	2,8	177
Mm	6,2	149	NU ₂	0,5	177
Mf	-	-	M ₂	85,5	137
MTM	-	-	L ₂	2,8	129
Msf	13,7	227	T ₂	1,6	158
Q ₁	3,0	167	S ₂	26,8	158
O ₁	5,7	193	K ₂	7,3	158
M ₁	1,3	238	MO ₃	1,7	243
P ₁	2,4	230	M ₃	2,0	162
K ₁	7,2	230	MK ₃	1,4	234
J ₁	2,9	343	MN ₄	0,7	197
OO ₁	2,0	011	M ₄	2,5	210
MNS ₂	-	-	SN ₄	0,7	193
2N ₂	0,4	218	MS ₄	0,8	219
Referências de Nível: RN instalada na Pedra do Chapéu.					
Obs: Não há referências a outros períodos.					

Código BNDO: 30350