



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR**  
**DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**FRANCISCO GUSTAVO VIANA LEITÃO**

**ESTUDO NUMÉRICO DA DISPERSÃO DA PLUMA SALINA DA PLANTA DE  
DESSALINIZAÇÃO DE FORTALEZA**

**FORTALEZA**

**2019**

FRANCISCO GUSTAVO VIANA LEITÃO

ESTUDO NUMÉRICO DA DISPERSÃO DA PLUMA SALINA DA PLANTA DE  
DESSALINIZAÇÃO DE FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira

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)

---

- L548e    Leitão, Francisco Gustavo Viana.  
          Estudo Numérico da Dispersão da Pluma Salina da Planta de Dessalinização de Fortaleza / Francisco Gustavo Viana Leitão. – 2019.  
          40 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2019.  
          Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
1. Modelagem Numérica. Dispersão. Delft3d. Fortaleza. I. Título.

CDD 551.46

---

FRANCISCO GUSTAVO VIANA LEITÃO

ESTUDO NUMÉRICO DA DISPERSÃO DA PLUMA SALINA DA PLANTA DE  
DESSALINIZAÇÃO DE FORTALEZA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Dr. Silvano Porto Pereira  
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

---

Msc. Barbara Pereira Paiva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira pela orientação durante a minha caminhada na graduação.

Ao Silvano Porto Pereira pela oportunidade de estágio na CAGECE no ano de 2019.

Ao CNPq pelas bolsas de iniciação científica entre 2016 e 2018.

A Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis-PRAE, pela Bolsa de Iniciação Acadêmica-BIA em 2015.

Aos membros do Laboratório de Oceanografia Física-LOF: Jonathan Monteiro, Rafael Xavier, João Mateus, Vitória Vasconcelos, Marina Sousa, Thayane Pires, Bárbara Paiva, Filipe Vieira, Airton Viana, Marcelo Nunes, Felipe Conrado, Caio Erick, Marina Aguiar, Ítele Eduardo, Tiffany Késsia, Ivo Orellana e Victor Cordeiro.

A galera da Satehut: Nathaniel Gomes, Gabriel Abreu (Painho), Jonathan Monteiro, Paulo Sávio Maciel (Savim), Washington Francisco, Mariana Batista (Mari), Antônio Derley (Vanderley), Marina Sousa, Gabriel Gomes, Lorena Sampaio e Victor Nascimento.

Aos amigos de outras turmas: Gabriel Costa, Kevin Samuel e Liane Sampaio (Pense numa galera massa!).

Ao projeto RECOFOR, em especial ao Professor Carlos Schettini e ao Felipe Frota pela disponibilização dos dados de corrente que foram coletados na costa de Fortaleza entre 2011 e 2012.

Ao amigo e também grande surfista Reginaldo com quem estou sempre trocando umas idéias.

Ao Professor Pedro Calixto por me motivar a fazer a prova da USP. A Ana Rodrigues e a todos os outros grandes amigos que conheci nos tempos de UECE.

“O passado é uma roupa que não nos serve mais.”

(Belchior)

## RESUMO

O presente trabalho foca no estudo da dispersão de água residual emitida pela futura planta de dessalinização de Fortaleza. Um estudo de modelagem foi desenvolvido para averiguar a dispersão da pluma de rejeito. Para a realização deste trabalho foi desenvolvida uma simulação hidrodinâmica tridimensional forçada por marés e vento utilizando o Delft3D. A qualidade dos dados modelados foi atestada comparando-se as saídas do modelo a dados coletados *in situ* na região. Nessa comparação, foram aplicados parâmetros qualitativos e quantitativos: erro médio quadrático (RMSE); erro médio absoluto associado (RMAE) e índice de concordância (skill). Duas condições foram testadas para averiguar o comportamento de dispersão da pluma salina: um cenário com alta intensidade dos ventos, sendo representado por uma data no segundo semestre, 13/08/2011, e outro com baixa intensidade dos ventos, sendo representado por uma data no primeiro semestre, 08/04/2012. Os resultados obtidos mostraram que houve diferença entre o padrão de dispersão da pluma nos dois momentos avaliados e, que com uma maior intensidade dos ventos, a pluma do emissário pode se espalhar por toda a costa de Fortaleza em superfície e fundo, com uma pequena diferença de salinidade de +0,1% em relação ao ambiente. Também foi observado que a pluma de sal atingiu a superfície no segundo semestre. Foi verificado também que a pluma do rio Cocó pode chegar em baixas concentrações na superfície da região onde serão instalados os equipamentos de captação de água.

**Palavras-chave:** Modelagem Numérica. Dispersão. Fortaleza. Delft3D.

## ABSTRACT

This work focus on the study of the wastewater dispersion issued by the future desalination plant of Fortaleza. A modeling study was developed to investigate the plume dispersion. To perform this work, a three-dimensional tidal and wind forced hydrodynamic simulation was developed using the Delft3D software. The quality of the modeled data was evaluated against the versions of the data model collected in situ in the region. In this comparison, qualitative and quantitative parameters were selected: mean square error (RMSE); associated absolute mean error (RMAE) and agreement index (skill). Two conditions were tested to determine the dispersion behavior of the saline plume: a scenario with high wind intensity, represented by one data in the second semestre, 13/08/2011, and another with low wind intensity, represented by one data in the first semestre, 08/04/2012. The results show that there was a difference between the dispersion plume pattern at both moments and, with a higher wind intensity, the wastewater plume can spread across the Fortaleza coast in surface and bottom, with a small difference in salinity +0.1 % relative to the environmental. It was also observed that the amount of salt reached the surface in the second semester. It was also reported that a Cocó river plume can arrive at low concentrations on the surface of the region where water catchment equipment will be installed.

**Keywords:** Numerical Modelling. Dispersion. Fortaleza. Delft3D

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de estudo com a localização do emissário, ponto de captação de água da planta de dessalinização , ADCP e área modelada. . . . .	18
Figura 2 – Grade utilizada nas simulações . . . . .	19
Figura 3 – Distribuição vertical das camadas utilizadas nas simulações . . . . .	20
Figura 4 – Batimetria da área de estudo. . . . .	21
Figura 5 – Série temporal da variação do nível do mar simulada e observada para um ponto próximo ao Porto do Mucuripe . . . . .	26
Figura 6 – Série temporal da média integrada da magnitude na coluna d'água (modelado x observado) . . . . .	28
Figura 7 – Série temporal da média integrada da direção resultante das correntes na coluna d'água (modelado x observado) . . . . .	28
Figura 8 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 06:00 durante a preamar (camada de fundo) . . . . .	30
Figura 9 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 06:00 durante a preamar (camada de superfície) . . . . .	30
Figura 10 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 12:00 durante a baixa mar (camada de fundo) . . . . .	31
Figura 11 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 12:00 durante a baixa mar (camada de superfície) . . . . .	31
Figura 12 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 06:00 durante a preamar (camada de fundo) . . . . .	32
Figura 13 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 06:00 durante a preamar (camada de superfície) . . . . .	33
Figura 14 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 12:00 durante a baixa mar (camada de fundo) . . . . .	33
Figura 15 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 12:00 durante a baixa mar (camada de superfície) . . . . .	34
Figura 16 – Dispersão da pluma do rio Cocó na área metropolitana de fortaleza no dia 13/08/2011 às 06:00h (camada de superfície) . . . . .	35
Figura 17 – Dispersão da pluma do rio Cocó na região da praia do Futuro no dia 13/08/2011 às 12:00h (camada de superfície) . . . . .	36

Figura 18 – Dispersão da pluma do rio Cocó na região da praia do Futuro no dia 08/04/2012 às 06:00h (camada de superfície) . . . . .	36
Figura 19 – Dispersão da pluma do rio Cocó na região da praia do Futuro no dia 08/04/2012 às 12:00h (camada de superfície) . . . . .	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais constantes harmônicas usadas como condição de contorno das simulações . . . . .	21
Tabela 2 – Parâmetros físicos . . . . .	23
Tabela 3 – Acurácia do ADCP utilizado na obtenção dos dados de corrente . . . . .	25
Tabela 4 – Intervalo de classificação para erros de parâmetro . . . . .	25
Tabela 5 – Comparação das Amplitudes Harmônicas modeladas para um ponto próximo ao Porto do Mucuripe. . . . .	27
Tabela 6 – Comparação das Fases modeladas e observadas para um ponto próximo ao Porto do Mucuripe. . . . .	27
Tabela 7 – Valores de RMSE, RMAE e skill da magnitude e direção das correntes . . .	29

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
BDMEP	Banco de Dados para o Ensino e Pesquisa
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
DESSAL	Planta de Dessalinização de Fortaleza
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
PCCE	Plataforma Continental do Ceará
RMAE	Erro Médio Absoluto Relativo
RMSE	Erro Médio Quadrático
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{x}_{obs}$	Média da variável observada
$\bar{x}_{mod}$	Média da variável modelada
$\langle \rangle$	Média temporal
$\varepsilon$	Erro de medição do equipamento

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
2	<b>OBJETIVOS</b>	16
2.1	Geral	16
2.2	Específicos	16
3	<b>METODOLOGIA</b>	17
3.1	Área de estudo	17
3.2	Descrição do modelo	18
3.3	Descrição da simulação	18
3.3.1	<i>Malha</i>	19
3.3.2	<i>Batimetria da área</i>	20
3.3.3	<i>Forçantes</i>	21
3.3.4	<i>Condições iniciais, contorno e parâmetros físicos</i>	22
3.3.5	<i>Vazão do emissário</i>	23
3.3.6	<i>Rio Cocó</i>	23
3.4	Validação	24
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	26
4.1	Validação da Maré	26
4.2	Validação das correntes	27
4.3	Dispersão das plumas da planta de dessalinização e do Rio Cocó	29
4.3.1	<i>Dispersão da pluma da planta de dessalinização no dia 13-08-2011</i>	29
4.3.2	<i>Dispersão da pluma da planta de dessalinização no dia 08-04-2012</i>	32
4.4	Variação sazonal do padrão de distribuição da pluma salina	34
4.4.1	<i>Dispersão da pluma do rio Cocó</i>	35
5	<b>CONCLUSÃO</b>	38
	<b>REFERÊNCIAS</b>	39

## 1 INTRODUÇÃO

As usinas de dessalinização vêm se tornando uma alternativa em muitos países que sofrem com problemas de insuficiência hídrica, como as nações situadas na península Arábica, Austrália e países que fazem parte da bacia do mediterrâneo: Espanha, Argélia e Israel.

Buscando formas alternativas para fornecer água para a população cearense o governo do estado, por meio da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), vem estudando a implantação de uma usina de dessalinização no litoral de Fortaleza. Essa planta terá a capacidade de suprir até 12 % da demanda de água da região metropolitana durante os próximos 20 anos (Governo do Estado do Ceará, 2019). Segundo (CAGECE, 2017), a usina poderá produzir até  $86.400 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ , com uma taxa de conversão em torno em torno de 45% com um descarte efluente nominal de  $106.000 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ .

O principal rejeito do processo de dessalinização é uma solução com concentração salina (entre 44 e  $90 \text{ gKg}^{-1}$ ), além da presença de outros produtos químicos como: ácidos; hexametáfosfato; anti-incrustantes e anti-escalantes (TORQUEMADA *et al.*, 2005). No entanto o principal impacto ambiental deste tipo de empreendimento está associado ao descarte da solução hipersalina no meio marinho (TORQUEMADA *et al.*, 2009).

Segundo Alameddine e El-Fadel (2007), o lançamento desta solução hipersalina no oceano tem o potencial de alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas da região receptora. Para os autores o grau de degradação ambiental será altamente dependente do volume total liberado, além das características físicas do meio. Ainda segundo os autores, em caso de descarte direto na costa, mesmo em ambientes de alta mistura, há relatos de impacto direto em distâncias superiores a 300 m do ponto de liberação do efluente. Segundo Torquemada *et al.* (2009), a magnitude do impacto potencial vai depender das condições hidrodinâmicas, morfológicas e biológicas do meio.

Para melhor entender o comportamento da pluma de descarte da futura planta de dessalinização de Fortaleza, serão utilizadas simulações hidrodinâmicas tridimensionais. Estas simulações foram validadas com dados de direção e intensidade de correntes coletador por um ADCP fundeado na região entre 2011 e 2012. O uso da modelagem numérica fornecerá as informações necessárias sobre as correntes na costa do município, que são responsáveis pela dispersão do efluente.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

O objetivo geral deste trabalho é determinar os padrões de dispersão da pluma salina do emissário da planta de dessalinização de Fortaleza e sua área de influência.

### **2.2 Específicos**

- Implementar um modelo hidrodinâmico tridimensional de alta resolução no campo distante do emissário, englobando a região costeira das cidades de Fortaleza e Caucaia;
- Identificar o comportamento de dispersão da pluma do emissário;
- Identificar o comportamento de dispersão da pluma do rio Cocó no entorno da Praia do Futuro e nas proximidades do ponto de captação de água marinha da planta de dessalinização.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

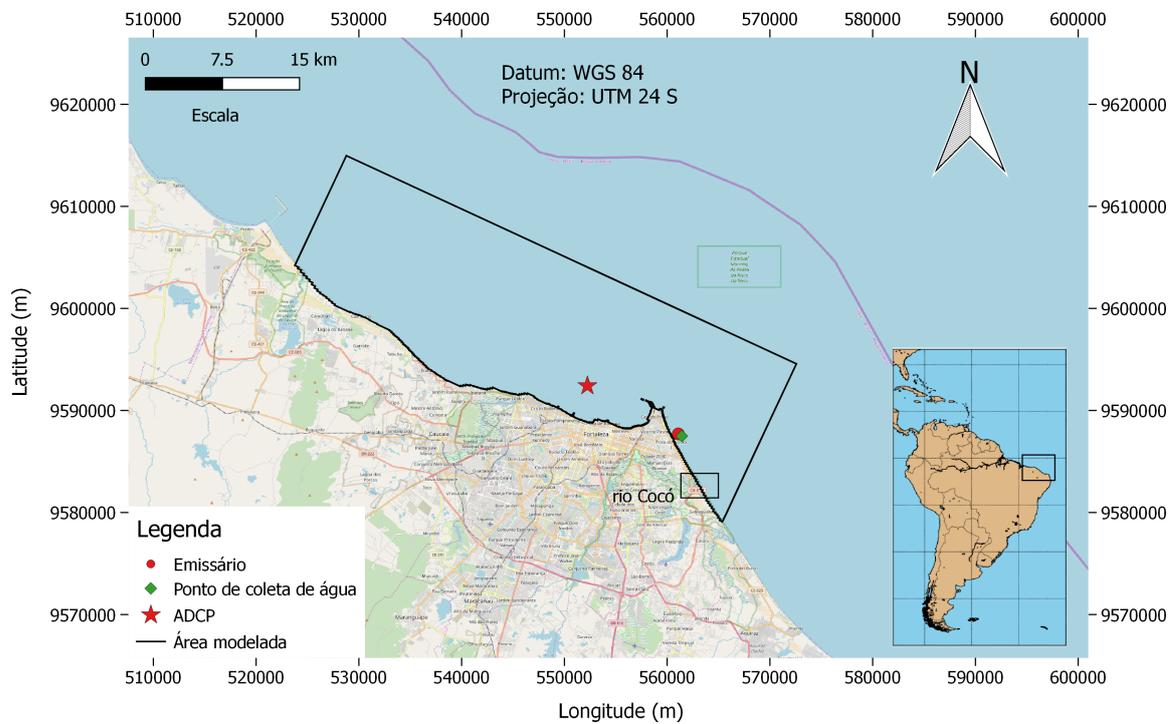
A cidade de Fortaleza está localizada nas coordenadas  $3^{\circ} 48' S$  e  $38^{\circ} 30' W$ , possui uma área de aproximadamente  $316 \text{ km}^2$  e uma população de 2.669.247 habitantes. O município de Caucaia possui uma população estimada de 325 mil habitantes e uma área de  $1234 \text{ km}^2$  (IBGE, 2019). Essas cidades fazem fronteira e suas regiões costeiras integram parte da Plataforma Continental do Ceará (PCCE).

A PCCE está situada na costa semi-árida do NE brasileiro, entre as longitudes  $37^{\circ}$  e  $41^{\circ} W$ , e as latitudes  $2^{\circ}$  e  $5^{\circ} S$ . Ela possui profundidades de até 70 m e uma declividade média em torno de  $2 \text{ mkm}^{-1}$  (DIAS, 2011). O regime de marés é classificado como semi-diurno, com amplitudes variando de 1,5 até 3,0 m, para quadratura e sizígia respectivamente (FREITAS *et al.*, 2016; FROTA, 2013).

As temperaturas mínimas e máximas do ar variam entre  $22,8$  e  $32^{\circ} C$ , os ventos predominantes são os alísios de sudeste com magnitudes média entre  $2,0$  e  $4,2 \text{ m.s}^{-1}$  (FREITAS *et al.*, 2016). O principal sistema atmosférico atuante na área de estudo é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) uma banda de nuvens que se forma pela confluência dos ventos alísios de NE e SE sobre os oceanos. O posicionamento da ZCIT sobre a região de estudo ocorre entre fevereiro e abril (FERREIRA; MELLO, 2005) marcando a temporada de chuvas.

Na figura 1 é apresentada a área de estudo com a localização do emissário submarino da planta de dessalinização, do ponto de coleta da usina de dessalinização, do local de fundeio do Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) e área modelada.

Figura 1 – Área de estudo com a localização do emissário, ponto de captação de água da planta de dessalinização , ADCP e área modelada.



Fonte: O autor.

### 3.2 Descrição do modelo

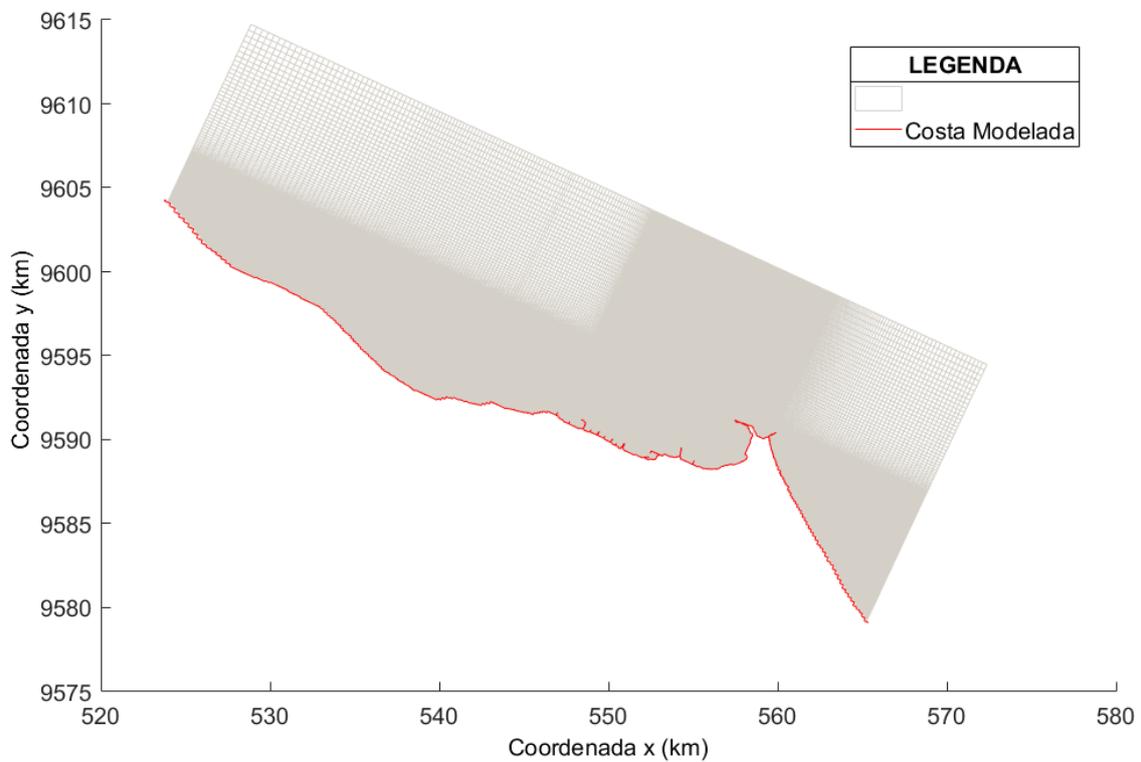
O Delft3D é um sistema de modelagem abrangente que inclui vários módulos e ferramentas, o seu módulo hidrodinâmico pode realizar simulações em 2D e 3D, calculando fenômenos de fluxo e transporte em grade curvilínea com coordenadas  $\sigma$  ou  $\theta$ . O modelo consegue resolver as equações de conservação de massa e energia pelo método das diferenças finitas (DELTARES, 2019).

### 3.3 Descrição da simulação

### 3.3.1 Malha

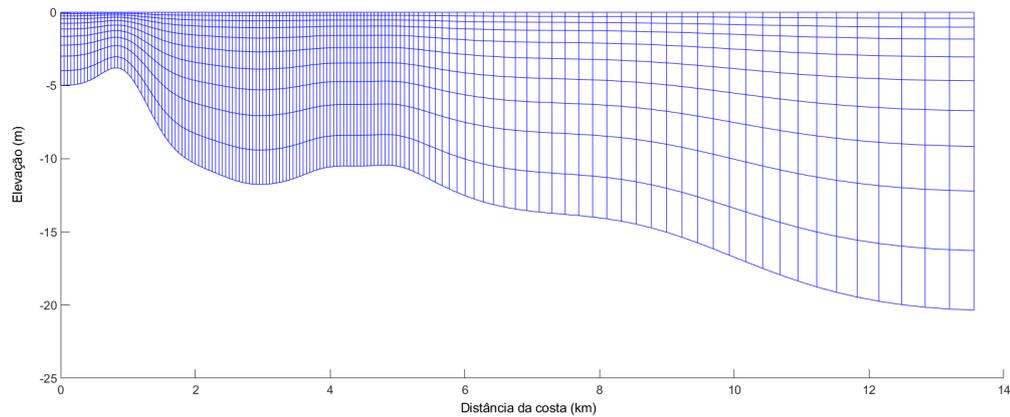
A malha utilizada no trabalho está georreferenciada em coordenadas UTM, possui 415 x 211 elementos na horizontal e está configurada verticalmente com 10 níveis em coordenadas  $\sigma$ . (Figs 2 e 3), paralelamente a costa, ela cobre uma distância de aproximadamente 40 km e estende-se 14 km no sentido *offshore*. Em média a malha possui uma resolução espacial de 100 m, sendo a resolução máxima de 50 m na região próxima aos espigões e uma mínima de 300 m na região do limite norte.

Figura 2 – Grade utilizada nas simulações



Fonte: O autor.

Figura 3 – Distribuição vertical das camadas utilizadas nas simulações

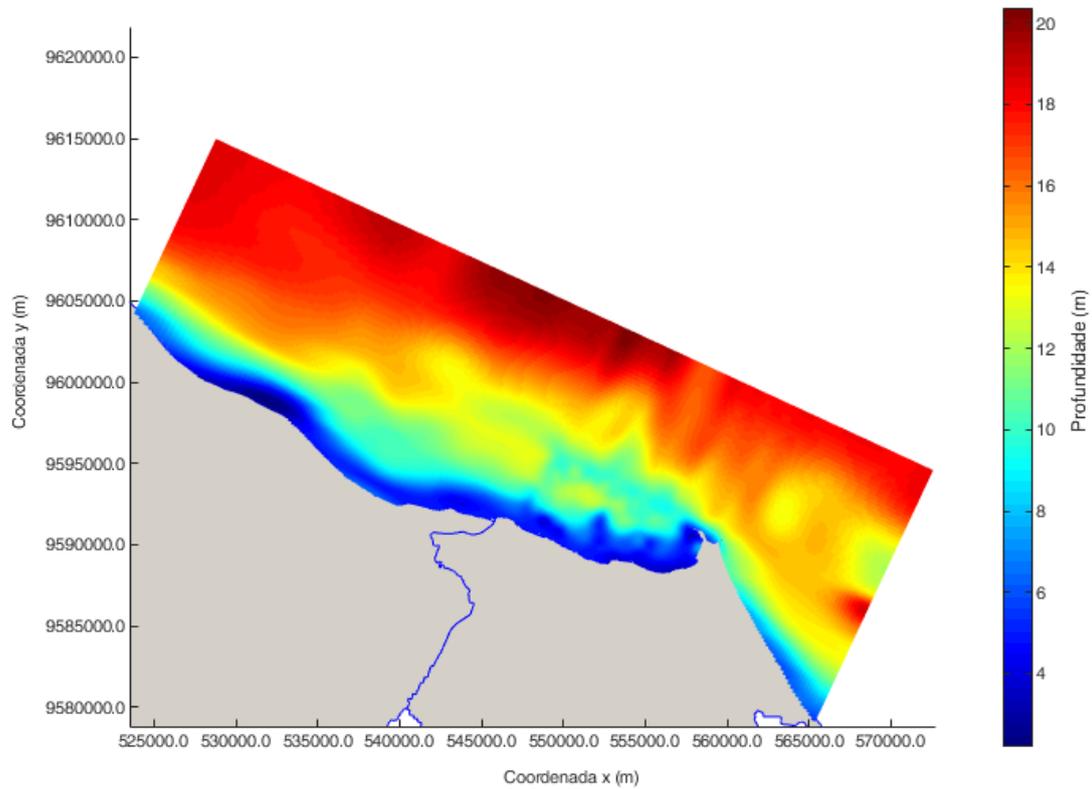


Fonte: O autor.

### 3.3.2 Batimetria da área

Os dados de batimetria utilizados no trabalho têm como fonte as cartas náuticas 710, 701, coletas locais e a base de dados ETOPO-1. Ambas as cartas possuem uma resolução espacial da ordem de 300 m, enquanto os dados do satélite possuem resolução de aproximadamente 1/60 de grau. A Fig.4 apresenta o mapa batimétrico da área de estudo.

Figura 4 – Batimetria da área de estudo.



Fonte: O autor.

### 3.3.3 Forçantes

O tempo simulado foi de 12 meses entre 01/06/2011 e 01/06/2012. Este período foi escolhido por coincidir com a maior série de dados disponível para a validação dos resultados. As forçantes de todas as simulações são maré, vento e vazão do Rio Cocó. Para representar as variações devido as marés na região, foram inseridas como condição de contorno os valores de amplitude e fase das 5 principais constituintes harmônicas de maré calculadas com base no marégrafo do Porto do Mucuripe. Esses valores são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais constantes harmônicas usadas como condição de contorno das simulações

componente	amplitude (cm)	fase (°)
M2	96,2	132
S2	31,0	151
N2	19,5	115
O1	7,3	186
K1	7,7	211

Fonte: Adaptado de FEMAR

O vento foi forçado de forma espacialmente uniforme em todo o domínio e com variação temporal de 12 horas. Os dados de vento utilizados no trabalho foram obtidos por meio do site do Banco de Dados para o Ensino e Pesquisa (BDMEP), eles foram coletados por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada nas coordenadas 3,81° S e 38,53° O. Devido a estação estar a cerca de 11 km da costa, foram aplicadas correções na altura e magnitude do vento (Eqs. 3.1 e 3.2) com base nos trabalhos de Viana Filho (2019) e Pereira (2012).

$$U_{10} = U_z \left( \frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.1)$$

$$R_t = -0,34 \ln(U_l) + 1,95 \quad (3.2)$$

Onde  $U_{10}$  é a magnitude do vento a uma altura de 10 m, enquanto que  $U_z$  é a magnitude na qual o vento foi medido,  $U_l$  é magnitude do vento sobre o oceano,  $R_t$  é um fator de relação entre o vento medido em terra e o medido sobre a superfície do mar e,  $z$  é a altura na qual o vento foi medido em terra (PEREIRA, 2012; Viana Filho, 2019).

### **3.3.4 Condições iniciais, contorno e parâmetros físicos**

As condições iniciais da simulação são: temperatura da água 28° C, salinidade 36,5; nível do mar 0 m. Como condições de contorno, o limite norte da simulação é um contorno do tipo astronômico usando os harmônicos apresentados na seção anterior e os limites laterais são do tipo Neumann. Para todos os contornos a salinidade foi fixada em 36,5 e a temperatura em 28,5 ° C. Foi utilizado um traçador passivo junto a descarga do Rio Cocó para estudar a dispersão da pluma deste rio. A concentração inicial do traçador do rio Cocó na área modelada é 0, de forma que qualquer concentração tem origem no rio. Os parâmetros físicos utilizados na simulação são apresentados na tabela 2.

Parâmetro	Valor
gravidade	$9,8 \text{ m.s}^{-2}$
temperatura da água	$28,5 \text{ }^\circ\text{C}$
formula da rugosidade (Chezy)	60
difusividade horizontal	$10 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
difusividade vertical	$1 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

Tabela 2 – Parâmetros físicos

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.5 Vazão do emissário

Foi simulado a dispersão de rejeito da Planta de Dessalinização de Fortaleza (DES-SAL) a ser instalada no litoral leste de Fortaleza, dentro da simulação foi fixada uma vazão constante para o emissário na ordem de  $1,2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , a uma profundidade de aproximadamente 14 m durante todo o período modelado. A salinidade do efluente foi configurada para  $72 \text{ kg.m}^{-3}$ . A escolha desse valor foi baseada nas condições de salinidade local e no fator de conversão do processo de osmose reversa.

### 3.3.6 Rio Cocó

O Rio Cocó localiza-se no litoral leste de Fortaleza, ele possui aproximadamente 45 km de extensão, na qual 75% da sua área está inserida em zona urbana, e a sua foz localiza-se a aproximadamente 5 km de distância do ponto de captação de água da planta de dessalinização.

Para o Rio Cocó foi fixada uma vazão contínua de  $3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  durante o segundo semestre de 2011 e de  $6 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  no primeiro semestre de 2012, esses valores são baseados em um trabalho de modelagem hidrológica desenvolvido por Molisani *et al.* (2006). Para que se possa traçar a trajetória de sua pluma sobre a área modelada, foi inserido um traçador passivo em seu efluente. A concentração inicial desse traçador na descarga do rio foi configurada em  $1 \text{ kg.m}^{-3}$ . A partir da concentração do traçador inserido na vazão do Cocó, foi possível calcular a concentração (%) da sua pluma na área modelada, de acordo com a Eq.3.3.

$$C(\%) = 100 \left( \frac{C}{1 \text{ kg.m}^{-3}} \right) \quad (3.3)$$

onde C é a concentração do traçador na área modelada, dada em  $\text{kg.m}^{-3}$ , C(%) é a fração restante do traçador na área modelada na forma de fração percentual, e  $1 \text{ kg.m}^{-3}$  é a concentração do traçador inserida na vazão do rio.

### 3.4 Validação

O processo de validação de um modelo hidrodinâmico consiste em avaliar sua capacidade de simular de forma satisfatória um determinado fenômeno. Para testar sua eficiência são usados parâmetros estatísticos que possibilitam avaliar o seu desempenho. Nesta etapa é bastante comum o uso do Erro Médio Quadrático (RMSE), e Erro Médio Absoluto Relativo (RMAE) e skill definido pelas Eq. 3.4, Eq. 3.5 e Eq. 3.6, respectivamente (WILLMOTT, 1981; RIJN. *et al.*, 2003; WILLIAMS; ESTEVES, 2017).

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \cdot \sum (x_{mod} - x_{obs})^2} \quad (3.4)$$

$$skill = 1 - \frac{\sum (x_{mod} - x_{obs})^2}{\sum (|x_{mod} - \bar{x}_{obs}| + |x_{obs} - \bar{x}_{obs}|)^2} \quad (3.5)$$

$$RMAE = \frac{\langle (|x_{mod} - x_{obs}| - \epsilon) \rangle}{|x_{obs}|} \quad (3.6)$$

Onde  $x_{mod}$  é o valor modelado,  $x_{obs}$  é o valor observado,  $\bar{x}_{obs}$  é a média do observado,  $\langle \dots \rangle$  é a média temporal de uma variável, e  $\varepsilon$  é o erro de medição do equipamento utilizado na coleta do dado (RIJN. *et al.*, 2003). O RMSE e o RMAE variam entre 0 e  $+\infty$ , o Skill varia entre 0 e 1. Os valores de RMSE, RMAE e skill para uma combinação perfeita entre dados modelados e dados observados são: RMSE e RMAE igual a 0, e Skill igual a 1 (RIJN. *et al.*, 2003). As informações sobre a acurácia do equipamento utilizado na coleta dos dados está na tabela 3, enquanto uma classificação de intervalos de erros de parâmetros é apresentada na tabela 4.

Tabela 3 – Acurácia do ADCP utilizado na obtenção dos dados de corrente

propriedade	acurácia
magnitude da corrente	$\pm 0,05 \text{ m.s}^{-1}$
direção da corrente	$\pm 2^\circ$

Fonte: <https://www.sontek.com/adp-acoustic-doppler-profiler>

Tabela 4 – Intervalo de classificação para erros de parâmetro

classificação	skill	RMAE
excelente	$> 0,8$	$< 0,1$
bom	$0,6 - 0,8$	$0,1 - 0,3$
razoável	$0,3 - 0,6$	$0,3 - 0,5$
pobre	$0 - 0,3$	$0,5 - 0,7$
ruim	—	$> 0,7$

Fonte: Adaptado de Rijn. *et al.* (2003).

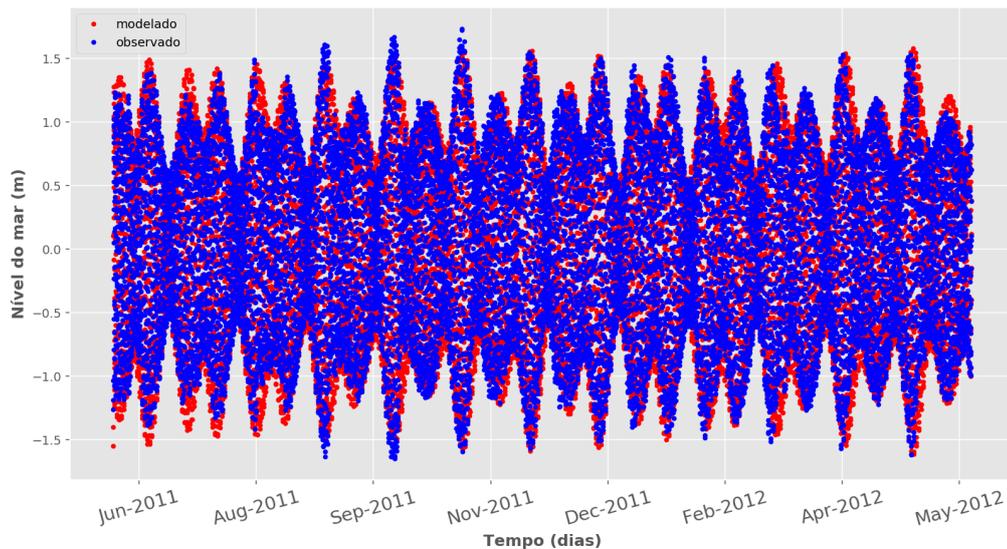
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Validação da Maré

Comparando as séries temporais de nível do mar simuladas e observadas (Fig.5), observa-se uma boa similaridade entre os dados. No entanto nota-se que o modelo subestimou o nível do mar em algumas situações. Esta diferença foi em média de 1,8 cm, o que corresponde a menos de 1% da variação do nível do mar local.

Nas tabelas 5 e 6 são mostrados os valores de amplitude e fase dos cinco principais constituintes harmônicos de maré no Porto do Mucuripe e os da simulação. Comparando os valores modelados e os observados foi verificado que exceto a componente N2, todas as outras apresentaram diferença de amplitude inferior a 10%, sendo que para as constituintes M2 e S2, que representam a maior parte da variabilidade local das marés, o erro foi menor que 3%. Para a fase apenas a componente K1 apresentou uma diferença superior a 10%. Com base na literatura (Viana Filho, 2019; FREITAS, 2015), esses resultados são bastante satisfatórios. O valores Skill calculados para amplitude e fase da maré foram 0,99 e 0,98, respectivamente. Segundo (RIJN. *et al.*, 2003) valores de skill  $> 0,8$  são classificados como "excelentes".

Figura 5 – Série temporal da variação do nível do mar simulada e observada para um ponto próximo ao Porto do Mucuripe



Fonte: O autor

Tabela 5 – Comparação das Amplitudes Harmônicas modeladas para um ponto próximo ao Porto do Mucuripe.

componente	amplitude modelado (cm)	amplitude observado (cm)	amplitude diferença (cm)	amplitude diferença (%)
M2	97.1	94.7	2,4	2,5
S2	31.6	31.8	0,2	0,6
N2	19.7	17.7	2,0	10,1
O1	7.2	6.8	0,4	5,8
K1	7.7	8.1	0,4	5,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Comparação das Fases modeladas e observadas para um ponto próximo ao Porto do Mucuripe.

Componente	Fase modelo (°)	Fase observado(°)	Diferença((°)	Diferença(%)
M2	136	132	4	3
S2	155	159	4	2
N2	119	126	7	5,5
O1	187	182	5	2
K1	213	228	15	10,8

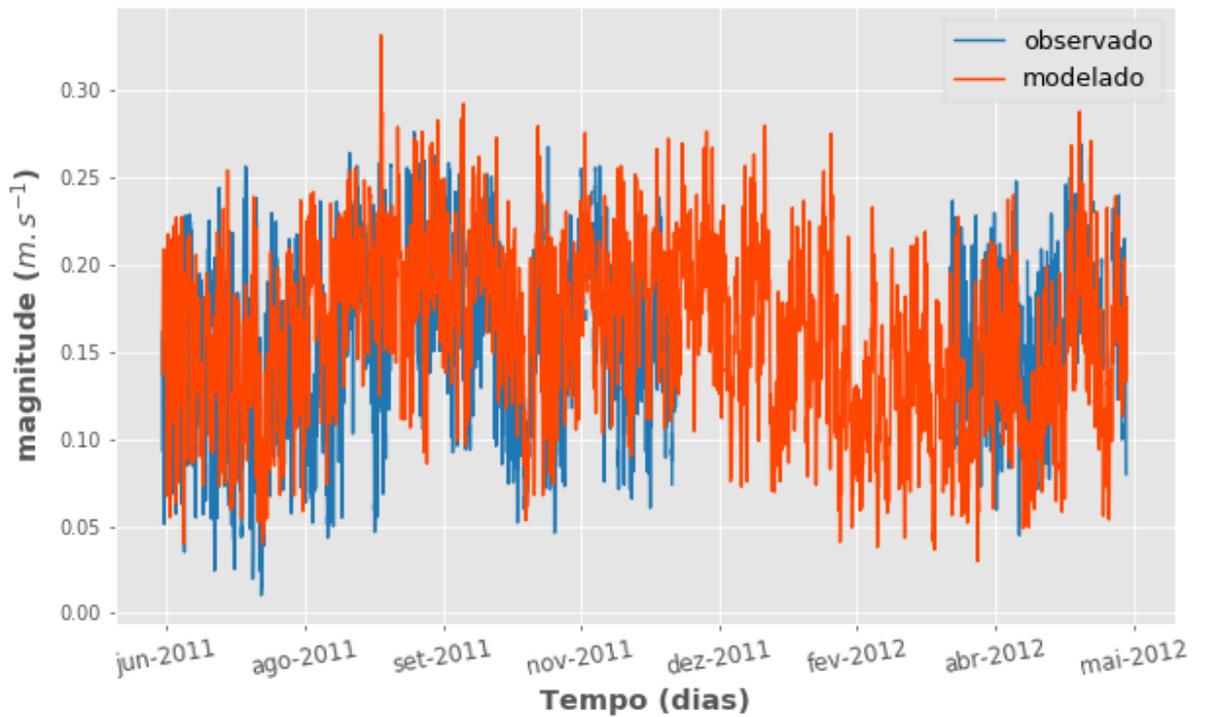
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Validação das correntes

As séries temporais da magnitude da corrente integrada na coluna de água observada e modeladas são apresentadas na Fig.6. Observando as duas curvas verifica-se que o modelo conseguiu reproduzir o padrão das correntes no ponto de fundeio do ADCP indicado na Fig.1. Observa-se que entre agosto e setembro a magnitude das correntes foi superestimada, enquanto que entre abril e maio a magnitude das correntes foi subestimada. Esse resultado é bastante semelhante ao que foi encontrado por Viana Filho (2019) em seu trabalho sobre dispersão de sedimentos na região do emissário de esgotos da CAGECE.

A série temporal da direção das correntes integrada na coluna d'água é apresentada na Fig.7. Observa-se que o modelo reproduziu bem as variações de direção durante o período simulado. No entanto o modelo superestimou a direção das correntes entre os meses de abril e maio de 2012. Em média o modelo superestimou em  $7,3^\circ$  a direção das correntes observadas. Na Tab.7 são apresentados os valores de RMSE, RMAE e skill obtidos para a corrente modelada.

Figura 6 – Série temporal da média integrada da magnitude na coluna d'água (modelado x observado)



Fonte: O autor

Figura 7 – Série temporal da média integrada da direção resultante das correntes na coluna d'água (modelado x observado)



Fonte: O autor

Tabela 7 – Valores de RMSE, RMAE e skill da magnitude e direção das correntes

Propriedade	RMSE	RMAE	Skill
magnitude	0,04 m/s	0,23	0,62
direção	7°	0,024	0,8

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma geral as simulações foram capazes de reproduzir as variações do nível do mar e a circulação média da coluna de água da região. Com base nestes resultados partimos para a análise da dispersão da plumas da planta de dessalinização e do rio Cocó.

### 4.3 Dispersão das plumas da planta de dessalinização e do Rio Cocó

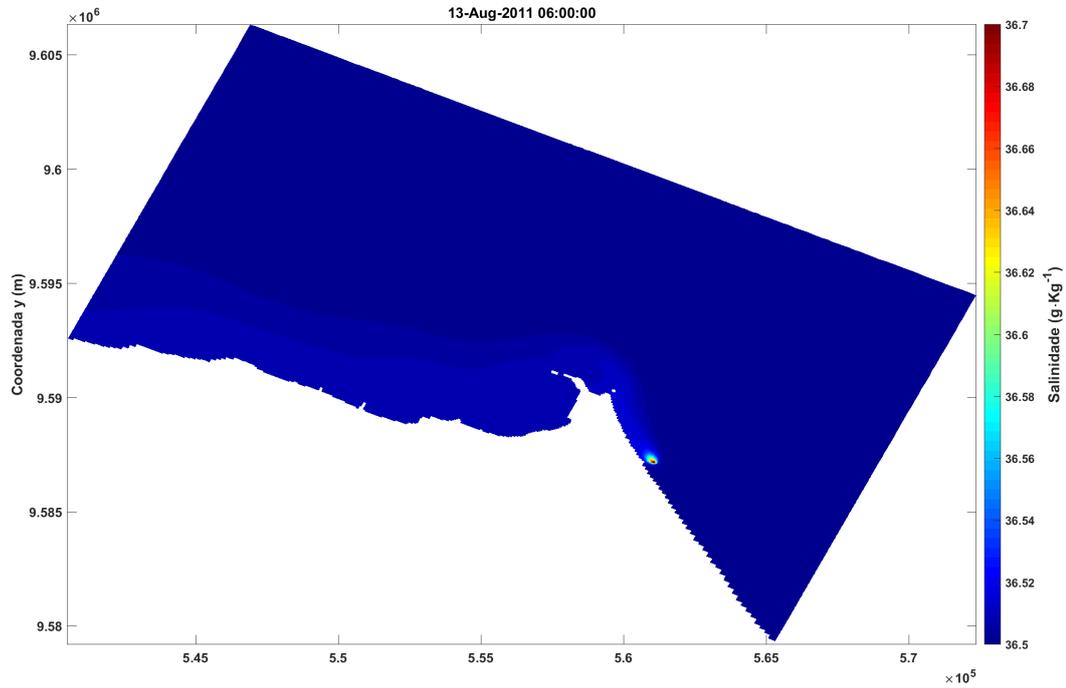
Para avaliar a dispersão das plumas da planta de dessalinização foram escolhidas duas datas em semestres distintos. Uma data (13-08-2011) durante o segundo semestre de 2011 para representar o período seco e com ventos mais intensos , e outra data (08-04-2012) para representar o período chuvoso e com ventos fracos. Em ambas as datas foram investigadas uma situação em preamar e em baixa mar.

#### 4.3.1 Dispersão da pluma da planta de dessalinização no dia 13-08-2011

A primeira preamar do dia 13-08-2011 ocorreu às 06:00h e foi escolhida para fazermos a análise da dispersão da pluma salina. Observa-se que a pluma espalhou-se por toda a costa leste de Fortaleza, no entanto o aumento da salinidade na área onde a pluma desloca-se é apenas  $0,04g.kg^{-1}$  (Figs 8 e 9).

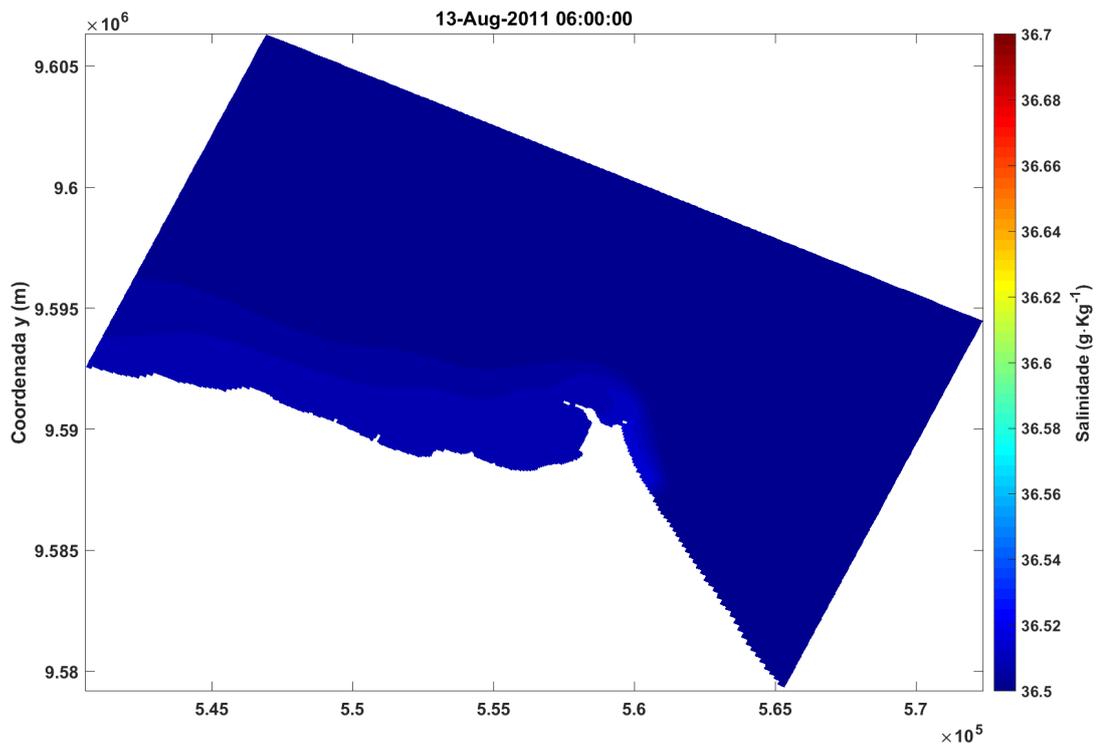
O mesmo padrão de dispersão observado durante a preamar também foi observado durante o episódio de baixa mar às 12:00, no entanto, quando comparamos os dois momentos, observamos que a pluma salina na baixa mar está deslocada mais ao norte em comparação ao que foi visto durante a preamar (Figs10 e 11).

Figura 8 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 06:00 durante a preamar (camada de fundo)



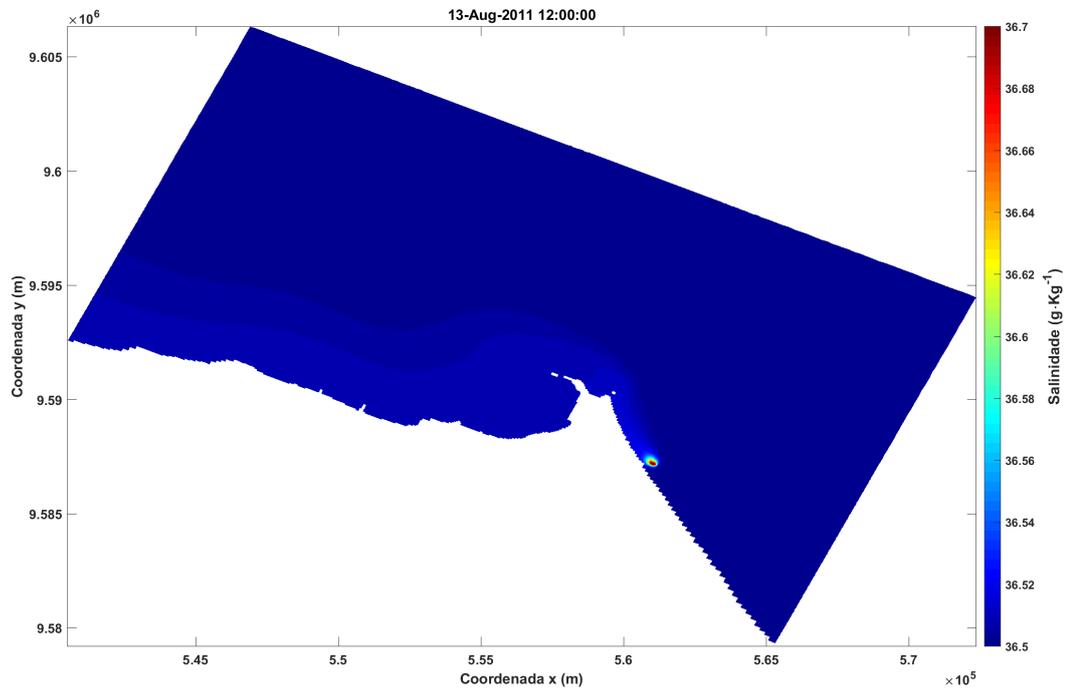
Fonte: O autor

Figura 9 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 06:00 durante a preamar (camada de superfície)



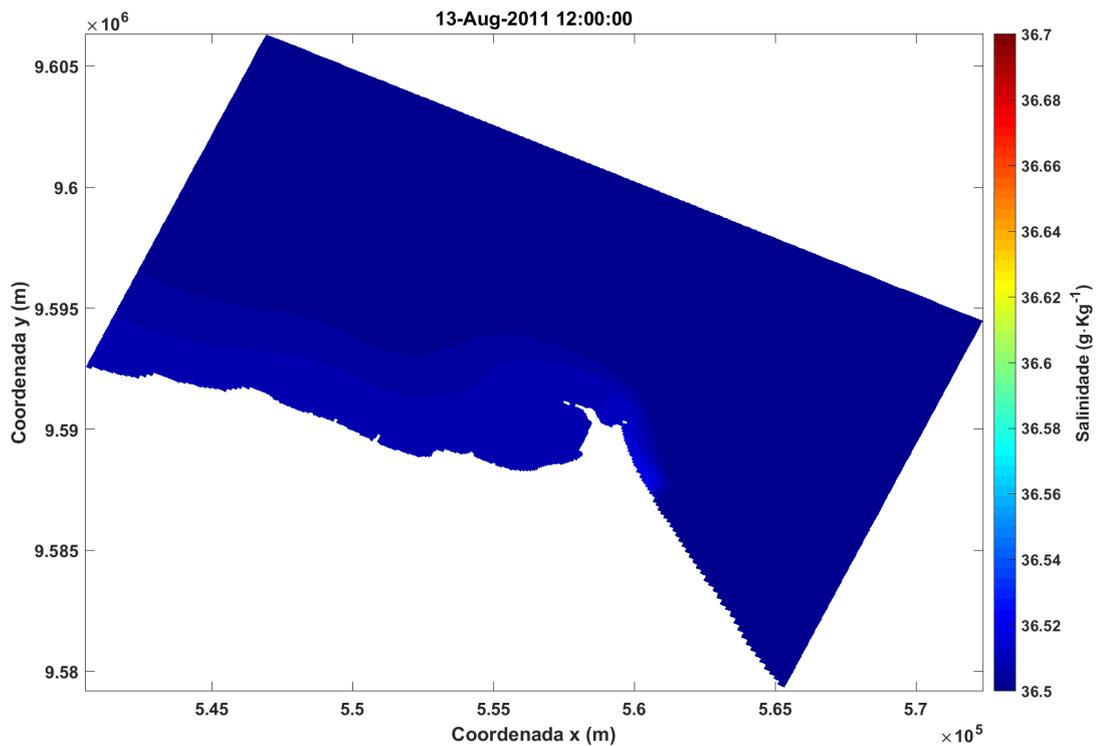
Fonte: O autor

Figura 10 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 12:00 durante a baixa mar (camada de fundo)



Fonte: O autor

Figura 11 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 13-08-2011 às 12:00 durante a baixa mar (camada de superfície)

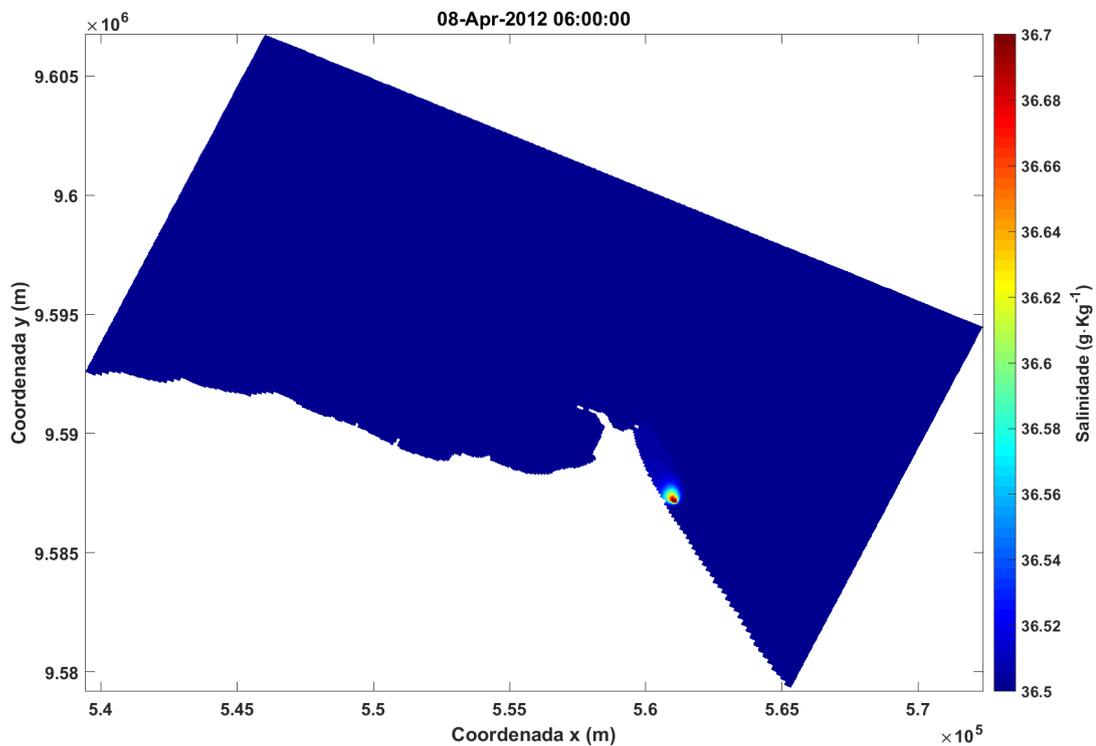


Fonte: O autor

### 4.3.2 Dispersão da pluma da planta de dessalinização no dia 08-04-2012

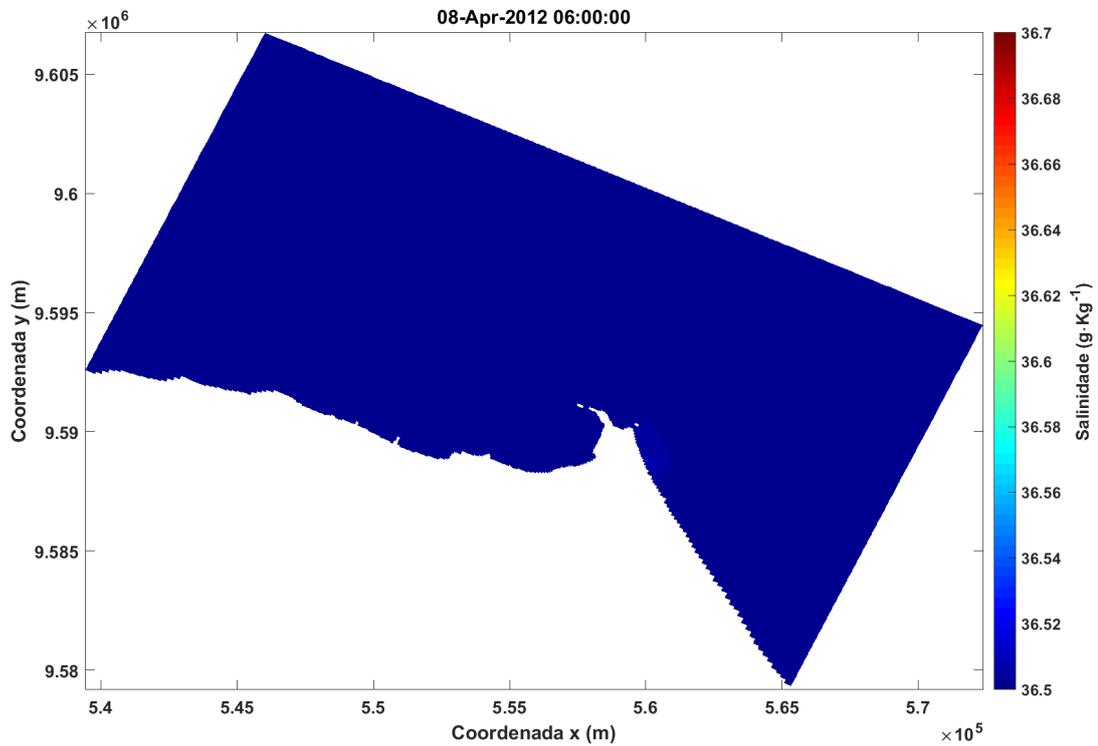
Nas figuras a seguir serão apresentados os cenários de preamar e de baixa mar do dia 08-04-2012 que ocorreram às 06:00h (Figs 12 e 13) e, 12:00h (Figs 14 e 15), respectivamente. Nesses episódios observados em abril, a pluma salina não emergiu totalmente a superfície. Foi verificado que a pluma permaneceu mais confinada a região do entorno emissário submarino da DESSAL, com concentrações levemente maiores aquelas que foram observadas em agosto. Uma comparação entre os 2 semestres será feita na próxima seção.

Figura 12 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 06:00 durante a preamar (camada de fundo)



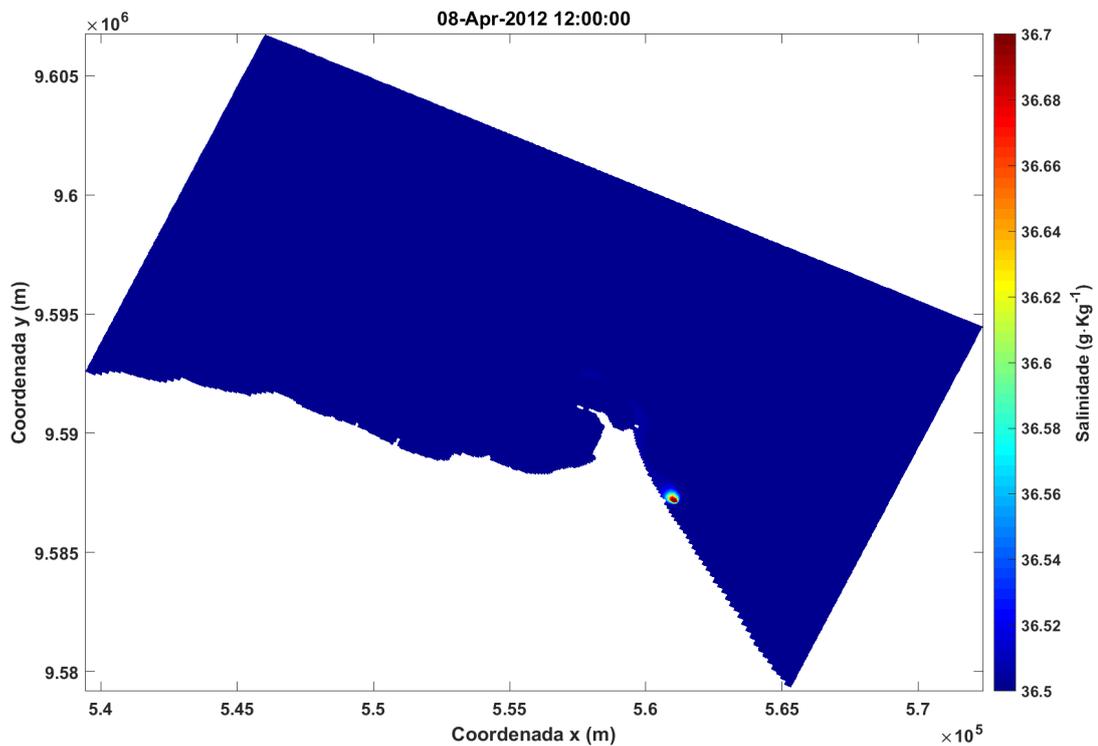
Fonte: O autor

Figura 13 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 06:00 durante a preamar (camada de superfície)



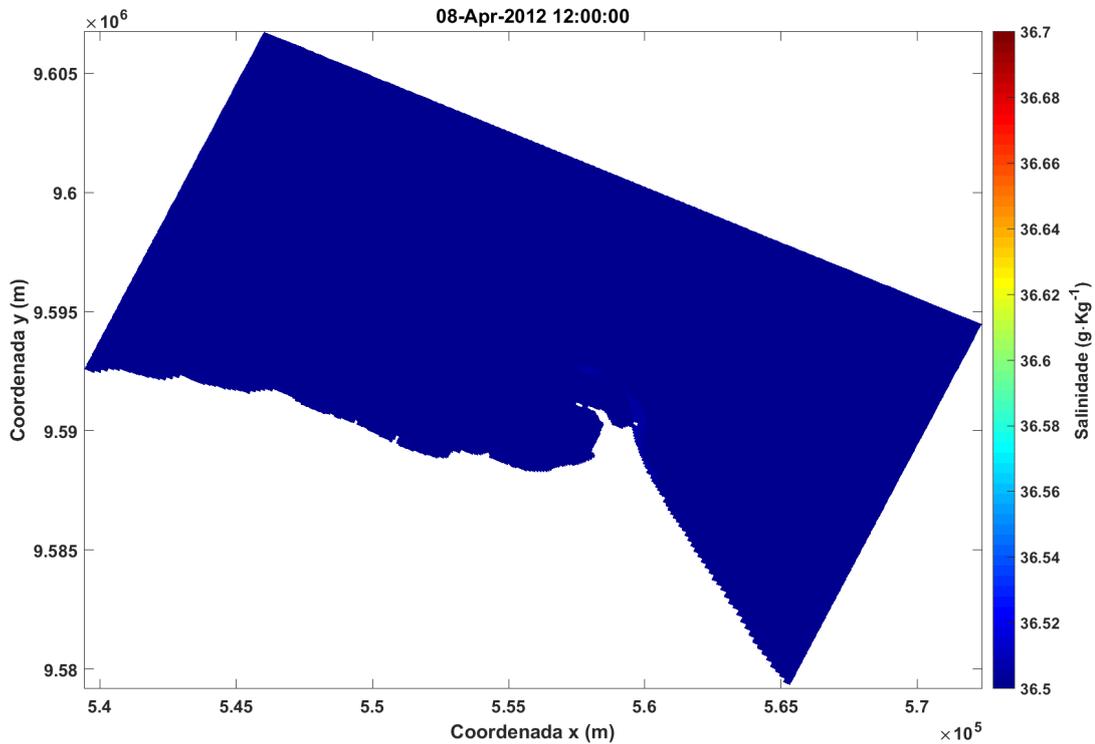
Fonte: O autor

Figura 14 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 12:00 durante a baixa mar (camada de fundo)



Fonte: O autor

Figura 15 – Distribuição da pluma salina na região litorânea de Fortaleza no dia 08-04-2012 às 12:00 durante a baixa mar ( camada de superfície)



Fonte: O autor

#### 4.4 Variação sazonal do padrão de distribuição da pluma salina

Comparando os dois períodos analisados, 13-08-2011 e 08-04-2012, foi verificado que no segundo semestre há mais mistura vertical entre as camadas superficiais e de fundo, essa maior mistura observada pode ser atribuída ao papel do vento que no período seco do segundo semestre costuma ser mais intenso que no período chuvoso no primeiro semestre.

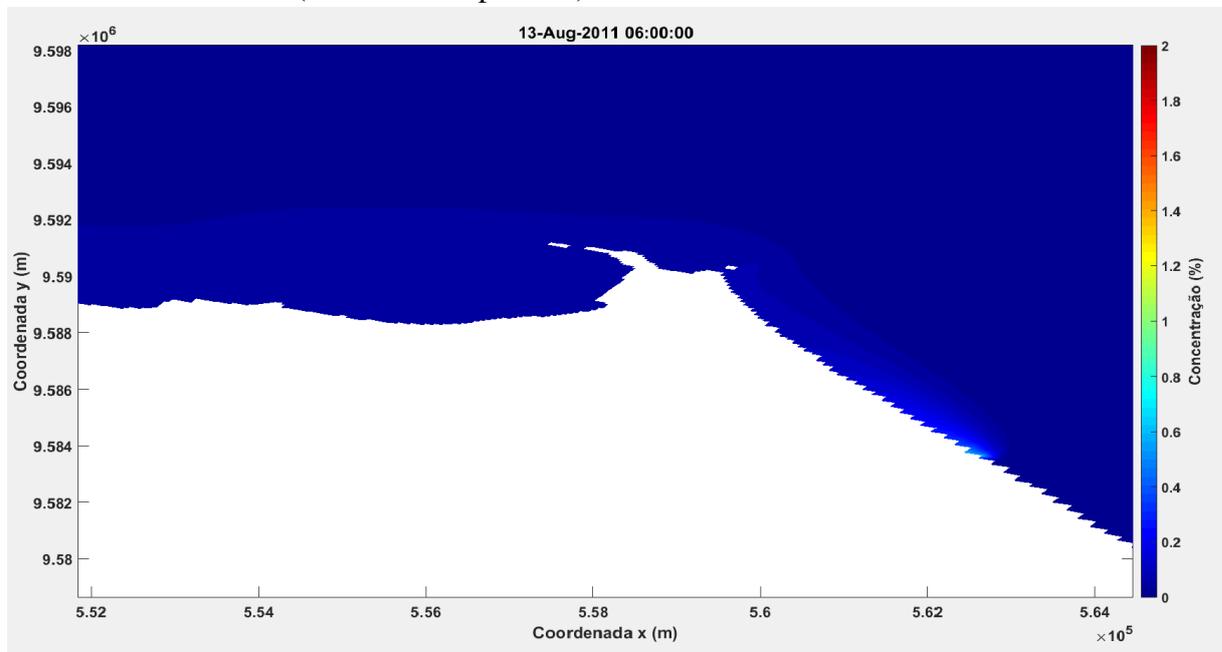
De acordo com Pereira (2012), em seu trabalho sobre modelagem da qualidade de águas na região costeira de Fortaleza, quando comparado os meses de março e outubro de 2009, foram observadas variações sazonais nos padrões de diluição da pluma do emissário de esgoto da CAGECE. O autor apontou as variações na magnitude do campo de correntes como uma das principais causas dessa diferença. Outro autor que também identificou variações sazonais desse tipo foi Viana Filho (2019); esse autor modelou a dispersão de sedimentos e contaminantes na região do emissário de esgotos da CAGECE e observou que durante o segundo semestre a ressuspensão dos sedimentos e traçadores foi maior do que foi observado no primeiro semestre.

#### 4.4.1 Dispersão da pluma do rio Cocó

A extensão da pluma do rio Cocó apresenta ser variável ao longo do ano. No mês de abril foi observada uma maior concentração do traçador do Rio Cocó na costa de Fortaleza quando comparado ao mês de agosto de 2011.

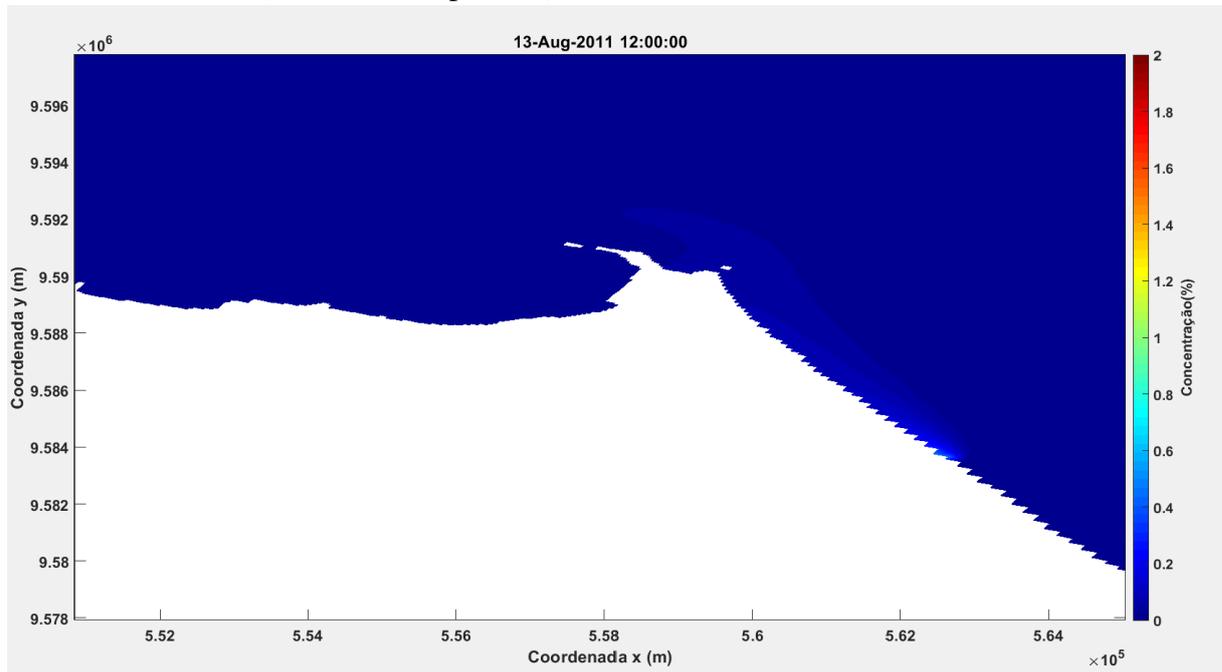
Também foi verificado, em todos os cenários, que a concentração do traçador não ultrapassou a concentração de 2% fora da foz do rio (Figs 16,17, 19 e 18); no entanto, devido a carência de dados de vazão no período simulado, segue que alguns dos resultados obtidos aqui, principalmente referentes a dispersão de sua pluma, podem estar subestimados.

Figura 16 – Dispersão da pluma do rio Cocó na área metropolitana de fortaleza no dia 13/08/2011 às 06:00h (camada de superfície)



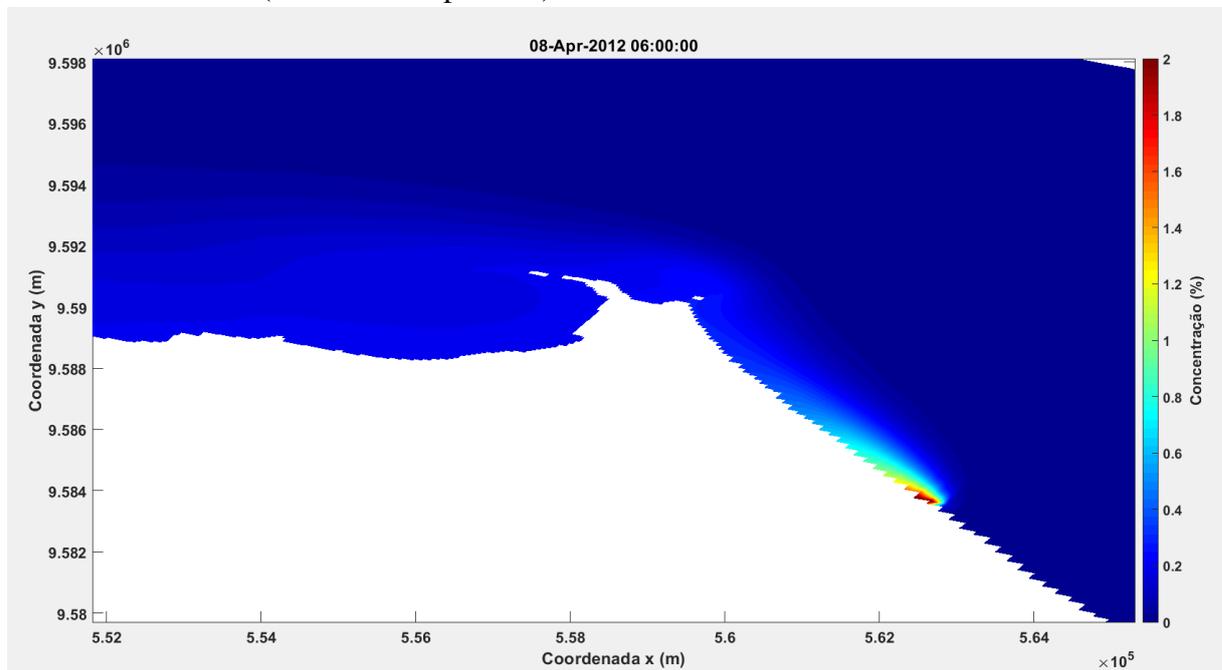
Fonte: O autor

Figura 17 – Dispersão da pluma do rio Cocó na região da praia do Futuro no dia 13/08/2011 às 12:00h (camada de superfície)



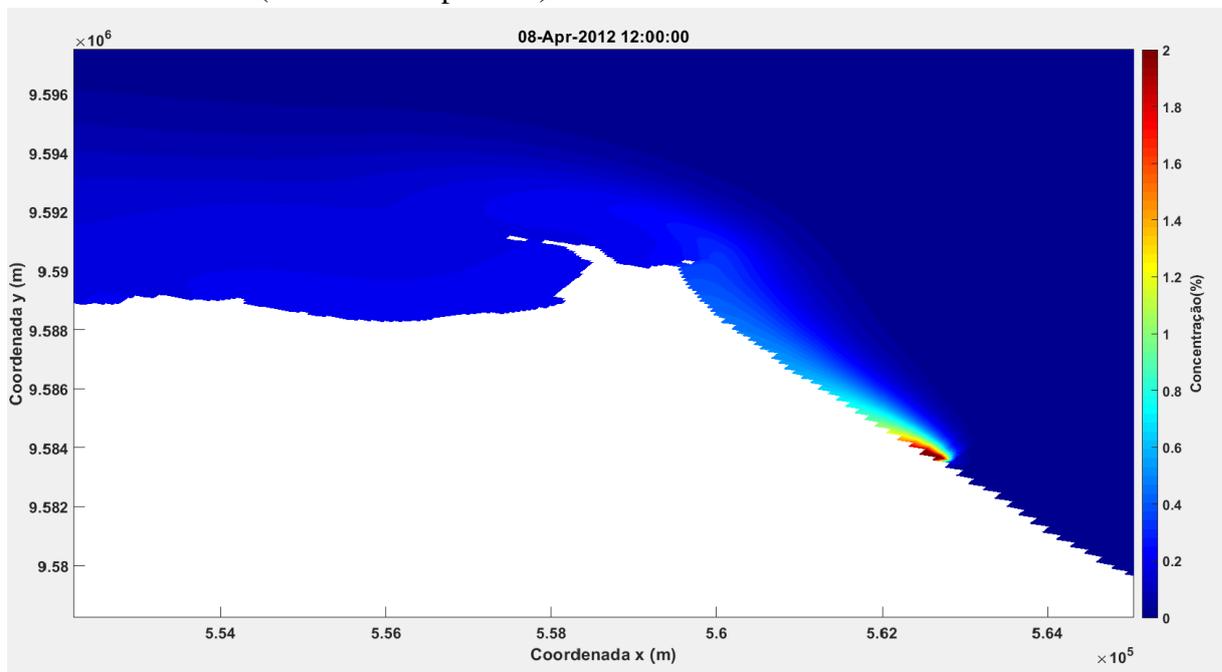
Fonte: O autor

Figura 18 – Dispersão da pluma do rio Cocó na região da praia do Futuro no dia 08/04/2012 às 06:00h (camada de superfície)



Fonte: O autor

Figura 19 – Dispersão da pluma do rio Cocó na região da praia do Futuro no dia 08/04/2012 às 12:00h (camada de superfície)



Fonte: O autor

## 5 CONCLUSÃO

A implementação do modelo hidrodinâmico na região costeira de Fortaleza e Caucaia foi realizada com sucesso. Como demonstrado previamente, o modelo conseguiu reproduzir os padrões de correntes e maré da área de estudo.

O presente trabalho apontou que a pluma de rejeito salino da DESSAL apresentou um padrão de dispersão com variação sazonal, mostrando diferenças entre o primeiro e o segundo semestre do ano. Foi observado que a pluma salina pode emergir em baixas concentrações até a superfície em períodos com ventos mais intensos que propiciam maiores misturas verticais.

Foi observado que contaminantes oriundos do rio Cocó podem atingir a área de captação da planta de dessalinização de Fortaleza, principalmente durante o primeiro semestre do ano, quando o rio tem maior potencial de atingir picos de vazão.

Para finalizar, este trabalho pode auxiliar a comunidade acadêmica e os gestores do poder público, atuando como mais uma ferramenta para auxiliar a gestão ambiental na região costeira de Fortaleza e Caucaia, podendo ser utilizado também em outros estudos aplicados.

## REFERÊNCIAS

- ALAMEDDINE, I.; EL-FADEL, M. Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design. **Desalination**, v. 214, p. 241–260, 08 2007.
- CAGECE. **Edital de chamamento público: Procedimento de manifestação de interesse N° 01/2017/CAGECE**. 2017.
- DELTARES. **Delft3D User manual**. [S.l.], 2019. Disponível em: <[https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW\\_User\\_Manual.pdf](https://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf)>.
- DIAS, F. J. d. S. **Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações**. São Paulo-Br: [s.n.], 2011. 284f.
- FERREIRA, A.; MELLO, N. G. d. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, p. 13, 12 2005.
- FREITAS, P. P.; MENEZES, M.; SCHETTINI, C. A. Hydrodynamics and particulate suspended matter transport in a shallow and highly urbanized estuary: The Cocó estuary, Fortaleza, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 33, n. 4, 2016. Disponível em: <<https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/754>>.
- FREITAS, P. P. d. **Modelagem Hidrodinâmica Da circulação Sobre A Plataforma Continental do Ceará**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-CE, 2015. 97f.
- FROTA, F. F. **Análise Do Nível da Água Na Plataforma Continental Setentrional Do Nordeste do Brasil**. 2013. Monografia (Bacharelado em Oceanografia), Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza, Ceará, 2013.
- Governo do Estado do Ceará. **Edital de dessalinização: prazo para consulta pública termina hoje**. 2019. Disponível em: <<https://www.ceara.gov.br/2019/03/11/edital-de-dessalinizacao-prazo-para-consulta-publica-termina-hoje/>>. Acesso em: 06.04.2019.
- IBGE. **Cidades**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>>.
- MOLISANI, M. M.; CRUZ, A. L. V.; MAIA, L. P. Estimativas de descargas fluviais para os estuários do estado do Ceará, Brasil. **Arquivo de Ciências do Mar**, v. 39, p. 53–60, 2006.
- PEREIRA, S. P. **Modelagem da qualidade bacteriológica das águas costeiras de Fortaleza (Nordeste do Brasil)**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-Ce, 2012. 174f.
- RIJN, L. V.; WALSTRA, D.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S.; SIERRA, J. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. **Coastal Engineering**, v. 47, n. 3, p. 295 – 327, 2003. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383902001205>>.
- TORQUEMADA, Y.; LIZASO, J. S.; GONZÁLEZ-CORREA, J. Preliminary results of the monitoring of the brine discharge produced by the SWRO desalination plant of Alicante (Spain). **Desalination**, v. 182, 11 2005.

TORQUEMADA, Y. F.; CORREA, J. M. G.; LOYA, A.; FERRERO, L. M.; DÍAZ-VALDÉS, M.; SÁNCHEZ-LIZASO, J. L. Dispersion of brine discharge from seawater reverse osmosis desalination plants. **Desalination and Water Treatment**, Taylor and Francis, v. 5, n. 1-3, p. 137–145, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.5004/dwt.2009.576>>.

Viana Filho, J. A. B. **Modelagem do transporte de sedimentos e contaminantes do emissário submarino de Fortaleza, CE**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará-UFC, Fortaleza-Ce, 2019. 69f.

WILLIAMS, J. J.; ESTEVES, L. S. Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries. **Advances in Civil Engineering**, v. 2017, p. 25, 2017. Disponível em: <[10.1155/2017/5251902](https://doi.org/10.1155/2017/5251902)>.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>>.