



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

MARINA AGUIAR SOUSA

**DISPERSÃO DAS LARVAS DO CORAL-SOL (*Tubastraea* spp.) NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA**

FORTALEZA

2021

MARINA AGUIAR SOUSA

DISPERSÃO DAS LARVAS DO CORAL-SOL (*Tubastraea* spp.) NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências
do Mar da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira.

FORTALEZA

2021

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)

S697d Sousa, Marina Aguiar.
DISPERSÃO DAS LARVAS DO CORAL-SOL (*Tubastraea* spp.) NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA / Marina Aguiar Sousa. – 2021.
58 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de
Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Modelagem Numérica. 2. Dispersão de Larvas. 3. Coral Sol. I. Título.

CDD 551.46

MARINA AGUIAR SOUSA

DISPERSÃO DAS LARVAS DO CORAL-SOL (*Tubastraea* spp.) NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DA MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências
do Mar da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira.

Aprovada em: 13/09/2021

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

A minha mãe e irmãos.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, que com seu apoio e exemplos de força e dedicação, ajudou a tornar possível todo o processo envolvido nesses anos de graduação.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, que me orientou em dois anos de bolsa e pesquisas, além de ter aceitado ser meu orientador para o trabalho de conclusão, sempre disposto a ajudar, oferecer sugestões e me direcionar aos melhores caminhos.

Ao Laboratório de Oceanografia Física (LOF), que foi um dos lugares que passei mais tempo desenvolvendo minhas atividades, ideias e pesquisas acadêmicas, além de ter me proporcionado conhecer pessoas como o Rafael Xavier, Gustavo Viana e a Bárbara Paiva, além dos outros integrantes do laboratório, que sempre estiveram dispostos a ajudar em qualquer dúvida que surgia nas atividades que desenvolvia no ambiente.

Ao Felipe, meu grande amigo da graduação, que ao ingressar no laboratório na mesma época que eu, me acompanhou em diversas tardes de estudo e foi de grande importância nos momentos em que necessitei de inspiração e motivação.

Aos meus amigos da turma de 2017.1, Camille, Thays, Ingra, Débora, Ruama, Caio, Ben Hur, Hélio, Monique, Luiza, Paola, entre outros que durante esses quatro anos e meio compartilhei experiências incríveis em sala de aula, aulas de campo, grupo de estudos e fora da vida acadêmica. Obrigada pelo suporte, pelas risadas e pelos rolês. A graduação teria sido cem vezes mais difícil sem o apoio de vocês.

À oportunidade de ter sido bolsista de iniciação científica e de iniciação à docência, de forma voluntária e remunerada, que contribuiu para meu crescimento individual e acadêmico, e me permitiu abrir a mente para diversos caminhos e ideias no âmbito da oceanografia.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares e Dra. Bárbara Pereira Paiva, pelo tempo e disponibilidade oferecidos para a avaliação deste trabalho.

Obrigada!

RESUMO

Oriundo do oceano pacífico, o Coral Sol (*Tubastraea* spp.) é considerado um organismo exótico e invasor no Oceano Atlântico e teve duas espécies relatadas na costa brasileira: *Tubastraea coccinea* e *Tubastraea tagusensis*. No estado do Ceará, a espécie foi inicialmente registrada em um naufrágio de um petroleiro no município de Acaraú, a aproximadamente 40 km da costa, no ano de 2016, posteriormente sendo documentada em um naufrágio no Pecém, no ano de 2020. O objetivo do presente trabalho é empregar a modelagem numérica para a simulação da dispersão de larvas do coral sol em parte da Plataforma Continental da Margem Equatorial Brasileira. O Delft3D foi o modelo utilizado para a realização das simulações, utilizando uma grade com uma resolução média de 700 m, e com uma resolução máxima de 250 m na região do porto do Mucuripe. Foram utilizados dados batimétricos in situ da PCCE, interpolados aos dados de profundidade do resto da grade, que foram obtidos do banco de dados do ETOPO 1. A forçante vento foi configurada com dados médios do período da simulação, obtidos do banco de dados do INMET. Quanto ao nível do mar, o mesmo foi configurado de acordo com dados dos harmônicos de maré (M2, S2, N2, O1 e K1) obtidos da FEMAR. O modelo hidrodinâmico foi implementado com um período de um ano, correspondente a Junho/2011 até Junho/2012. A validação da maré se deu através da comparação entre os dados de saída dos valores de maré, dos valores de magnitude e direção das correntes, com os mesmo valores observados. Por último, o módulo de partículas foi utilizado para a análise da dispersão das larvas do Coral Sol na área de domínio, através de experimentos realizados em dois pontos de lançamento (Naufrágio do Pecém e Naufrágio do Acaraú), contemplando cenários no primeiro e no segundo semestre do ano. Dessa forma, foi possível explorar a trajetória das partículas em diferentes intervalos de tempo, explorando todos os cenários configurados. Nos resultados obtidos, foi possível observar o domínio da influência da maré nas primeiras 24 horas de dispersão, resultando em uma dispersão mais ampla na sizígia e uma mais concentrada na quadratura. Constatou-se que a pluma é dispersa em direção a noroeste e ultrapassa a quebra da plataforma continental em todos os cenários simulados. Além da diferença sazonal que influenciou a dispersão da pluma, resultando em uma maior distância percorrida pelas partículas dispersadas no segundo semestre do ano devido a maior intensidade dos ventos.

Palavras-chave: Modelagem Numérica; Delft3D; Larvas.

ABSTRACT

Originating from the Pacific Ocean, the Sun Coral (*Tubastraea* spp.) is considered an exotic and invasive organism in the Atlantic Ocean and had two species reported off the Brazilian coast: *Tubastraea coccinea* and *Tubastraea tagusensis*. In the state of Ceará, the species was initially recorded on a shipwreck in Acaraú, approximately 40 km off the coast, in the year 2016, later being documented on a shipwreck in Pecém, in the year 2020. The objective of the present work is to employ numerical modeling for the simulation of the dispersion of sun coral larvae on part of the Continental Shelf of the Brazilian Equatorial Margin. Delft3D was the model used to perform the simulations, using a grid with an average resolution of 700 m, and with a maximum resolution of 250 m in the Mucuripe harbor region. In situ bathymetric data from PCCE were used, interpolated to the depth data from the rest of the grid, which were obtained from the ETOPO 1 database. The wind forcing was configured with average data for the simulation period, obtained from the INMET database. As for the sea level, it was configured according to data from the tidal harmonics (M2, S2, N2, O1 and K1) obtained from FEMAR. The hydrodynamic model was implemented by a period of one year, corresponding to June/2011 until June/2012. The tidal validation was done by comparing the harmonic constants output data of the simulations with the observed values. As for the validation of the current field, it was done by comparing the magnitude time series and direction of the modeled and observed data. Finally, the particle module was used for the analysis of the dispersion of the larvae of the Sun Coral in the domain area, through experiments conducted at two launching points (Pecém Shipwreck and Acaraú Shipwreck), contemplating scenarios in the first and second half of the year. Thus, it was possible to explore the trajectory of the particles in different time intervals, exploring all the configured scenarios. In the results obtained, it was possible to observe the dominance of the tidal influence in the first 24 hours of dispersion, resulting in a wider dispersion at spring tide and a more concentrated one at quadrature. It was found that the plume disperses towards the northwest and overtakes the continental shelf break in all simulated scenarios. Besides the seasonal difference that influenced the dispersion of the plume, resulting in a greater distance traveled by the dispersed particles in the second half of the year due to higher wind intensity.

Keywords: Numerical Modelling; Delft3D; Larvae.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Registro do <i>Tubastraea</i> em rochas costeiras no oceano Atlântico (Ilha de Búzios): (A) <i>T. tagusensis</i> dominando a comunidade bentônica de uma parede vertical de rochas, (B) Colônias de <i>T. tagusensis</i> com pólipos abertos, (C) Colônia de <i>T. Coccinea</i> (laranja) entre colônias de <i>T. tagusensis</i>	16
Figura 2	– Colônias de <i>Tubastraea tagusensis</i> (setas vermelhas) gravados a 10 m de profundidade em uma plataforma de óleo na costa do Ceará em 2015. A, B, C, D, E e F: <i>Tubastraea tagusensis</i> com a fauna associada, incluindo peixes e invertebrados bentônicos, como esponjas e briozoários.....	19
Figura 3	– Mapa da região de estudo.....	22
Figura 4	– Intensidade média da corrente superficial da PCCE de 8 anos de simulação 1º Semestre.....	24
Figura 5	– Intensidade média da corrente superficial da PCCE de 8 anos de simulação 2º Semestre.....	24
Figura 6	– Grade utilizada nas simulações.....	28
Figura 7	– Batimetria da área.....	29
Figura 8	– Mapas dos pontos configurados na simulação.....	32
Figura 9	– Equação para o cálculo da concentração mínima de partículas.....	32
Figura 10	– Equações representantes dos parâmetros estatísticos utilizados (RMSE RMAE e Skill)	34
Figura 11	– Equação representante do cálculo do erro percentual utilizado para validação do nível do mar.....	35
Figura 12	– Série temporal da média de magnitude da corrente integrada na coluna d'água (modelado x observado)	39
Figura 13	– Série temporal da média de direção resultante das correntes na coluna d'água (modelado x observado)	40

Figura 14 – Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no primeiro semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	41
Figura 15 – Dispersão da pluma das larvas 3 dias após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no primeiro semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	42
Figura 16 – Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o lançamento no naufrágio do Pecém no primeiro semestre. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	42
Figura 17 – Dispersão da pluma de larvas 2 dias e meio após o lançamento no naufrágio do Pecém no primeiro semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	43
Figura 18 – Gráfico de concentração de partículas nas quatro plataformas de óleo e gás do Paracuru nos primeiros dias de simulação. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	44
Figura 19 – Dispersão da pluma de larvas 6 dias após o lançamento nos dois pontos de liberação no primeiro semestre do ano e no cenário de maré de sizígia.....	45
Figura 20 – Dispersão da pluma de larvas 12 dias após o lançamento nos dois pontos de liberação no primeiro semestre do ano e no cenário de maré de sizígia.....	45
Figura 21 – Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no segundo semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	46
Figura 22 – Dispersão da pluma das larvas 3 dias após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no segundo semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	47
Figura 23 – Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o lançamento no naufrágio do Pecém no segundo semestre. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.....	47
Figura 24 – Dispersão da pluma de larvas 2 dias após o lançamento no naufrágio do Pecém no segundo semestre. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na	48

maré de quadratura.....	
Figura 25 – Gráfico de concentração de partículas nas quatro plataformas de óleo e gás do Paracuru nos dois primeiros dias de simulação no cenário de maré de quadratura.....	49
Figura 26 – Gráfico de concentração de partículas nas quatro plataformas de óleo e gás do Paracuru após o lançamento das partículas na maré de quadratura, no segundo semestre do ano.....	49
Figura 27 – Dispersão da pluma de larvas 4 dias após o lançamento nos dois pontos de liberação no segundo semestre do ano e no cenário de maré de sizígia.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Datas e períodos de liberação das partículas para cada ponto de lançamento.....	31
Tabela 2 – Intervalo de classificação para erros de parâmetro.....	35
Tabela 3 – Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar da estação maregráfica do porto do Mucuripe.....	36
Tabela 4 – Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar da estação maregráfica de Acaraú.....	36
Tabela 5 – Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar da estação maregráfica do porto de Camocim.....	37
Tabela 6 – Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar da estação maregráfica de Luis Correia.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivos gerais	21
2.2	Objetivos específicos	21
3	METODOLOGIA	21
3.1	Área de Estudo	21
3.2	O modelo Delft3D	25
3.2.1	Delft3D-Flow	25
3.2.2	D-waq Part	26
3.2.3	RGFGRID, QUICKIN e QUICKPLOT	26
3.2.4	Delft Dashboard	27
3.3	Grade	27
3.3.1	Batimetria da área	28
3.4	Forçantes	29
3.4.1	Maré	29
3.4.2	Vento	30
3.5	Condições iniciais, contorno e parâmetros físicos	30
3.6	Módulo de Partículas	30
3.7	Implementação do modelo	33
3.8	Validação	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Validação	35

4.1.1 Maré	35
4.1.2 Correntes	38
4.2 Experimentos	40
4.2.1 Primeiro semestre	40
4.2.2 Segundo semestre	45
4.3 Conclusões	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

1 INTRODUÇÃO

Uma comunidade é normalmente constituída por espécies denominadas nativas, caso sua distribuição inclua outros locais, ou endêmica, caso compreenda regiões restritas, além de espécies recém-chegadas, por dispersão ou introdução (CARLTON, 1987).

Espécies que chegam a uma nova região, diferente da sua de origem, por ação natural ou antrópica, são denominadas exóticas ou não nativas, e estão presentes em todos os ambientes, embora sua presença seja frequentemente despercebida pelo público (ZALBA; ZILLER, 2007). O processo de invasão de espécies exóticas caracteriza-se por esses novos indivíduos cuja inserção e dispersão representam impactos negativos na economia, sociedade e nos ecossistemas, assumindo atualmente, a segunda maior ameaça à perda de biodiversidade (CONABIO, 2009).

Segundo Carlton (1987), existem dois tipos de invasão biológica, a que a dispersão se dá por mecanismos naturais, e as introduções, que são consequências de atividades humanas. Apesar de que nos últimos séculos surgiram inúmeros mecanismos antrópicos para o movimento de milhares de espécies por todo o mundo, em relação a invasão biológica marinha, as embarcações oceânicas foram uma das principais causas para aumento da introdução de espécies exóticas em diferentes ambientes; navios de madeira com cascos deteriorados oferecem um habitat complexo para diversas espécies, tais como cracas, anêmonas, briozoários, corais, crustáceos e etc por meio da bioincrustação, permitindo que esses organismos incrustados se desloquem para diferentes regiões do mundo e ataquem na costa (CARLTON, 1989; MACHADO; OLIVEIRA; ARAÚJO JUNIOR, 2019).

Carlton (1985, tradução nossa) também cita a água de lastro como causa importante na disseminação de espécies exóticas:

A água de lastro é bombeada para uma embarcação para ajustar o revestimento e estabilidade de um navio vazio ou parcialmente carregado. Essa água contém diferentes espécies de plâncton que passam todas as fases da vida na coluna d'água e, dependendo da duração e das condições de temperatura da viagem, muitos desses organismos podem chegar vivos e serem bombeados para um novo estuário ou porto.

Atividades ligadas a indústria petrolífera, movimentação de espécies pesqueiras importantes para o comércio, libertação de animais utilizados para a pesquisa científica e construções de canais interoceânicos e interprovinciais também têm sido mecanismos

adicionais em relação a dispersão e introdução de um vasto número de espécies (CARLTON, 1987).

Entretanto, para que uma espécie exótica obtenha sucesso em uma nova área, a mesma precisa completar três processos: (1) o transporte de seu ambiente de origem para uma nova região, (2) a introdução, sobrevivência e liberação no ambiente novo e (3) o estabelecimento e reprodução para o desenvolvimento de uma população viável (CARLTON, 1996). Essas espécies precisam enfrentar novas pressões seletivas, bem como novas situações de estresse, e irão depender de condições climáticas, ecológicas e genéticas para obterem êxito na adaptação relacionada ao novo estabelecimento (LEE, 2002).

Além disso, regiões já colonizadas por espécies invasoras podem atuar como fontes de propágulos para novas áreas e, por conta de correntes de maré e costeiras, os estágios planctônicos dessas espécies exóticas podem se dispersar rapidamente, intensificando a bioinvasão (IBAMA, 2020). A partir do momento em que a espécie exótica estabelecida persiste e é apta a competir em sua nova área geográfica, identifica-se, então, o estágio de impactos (ANDERSEN *et. al.*, 2004).

Apesar de estudos quantitativos sobre os impactos ecológicos da invasão de espécies exóticas de diversos grupos taxonômicos serem raros devido à escassez de dados, os qualitativos têm sido documentados em todo o mundo. Os efeitos mais significativos e mensuráveis estão em lugares que esses organismos se tornam numéricos ou dominantes em uma comunidade. Esses efeitos diretos podem ter ação indireta em algumas características de um ecossistema, começando da estrutura da teia alimentar, até a dinâmica de nutrientes e índice de sedimentação, além dos impactos econômicos e os sérios riscos para a saúde. As invasões podem implicar negativamente na biodiversidade em diferentes níveis. Os efeitos podem levar a extinção de espécies nativas e a diminuição da abundância de espécies remanescentes, além do efeito global de redução da diversidade beta e alteração da variedade genética tanto no interior como entre populações (RUIZ. *et. al.*, 1997, MACDEONALD *et. al.*, 1989; DRAKE, 1991).

No Brasil, a bioinvasão marinha passou a ter maior repercussão com a introdução do mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*) por água de lastro, que, advindo do sudeste asiático, gerou inúmeros impactos sociais, ambientais e econômicos (BRASIL, 2003). Atualmente, no que diz respeito à bioinvasão por bioincrustação no país, destaca-se a introdução do gênero *Tubastraea*, popularmente conhecido como Coral Sol.

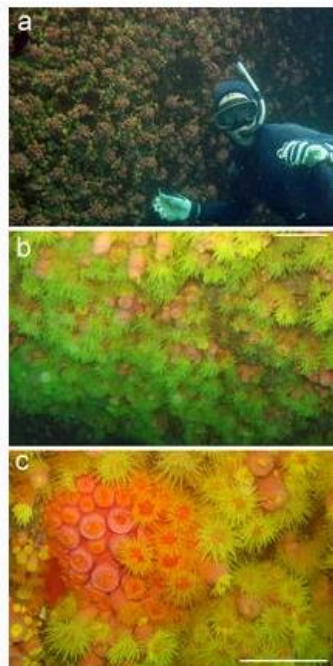
Corais do gênero *Tubastraea* (Cnidaria, Anthozoa, Scleractinia, Dendrophylliidae) são organismos proveniente dos oceanos Pacífico e Índico, que, hoje, com algumas espécies

consideradas cosmopolitas, encontram-se distribuídos por todo o globo devido ao processo de bioinvasão. São considerados corais pétreos (produzem esqueleto calcário), ahermatípicos (não construtores de recifes) e azooxantelados (não dependem de algas simbiontes para a nutrição) (PAULA; CREED, 2004; CAIRNS, 2000). Duas espécies do gênero *Tubastraea* são consideradas invasoras: *Tubastraea coccinea* e *Tubastraea tagusensis* (CREED; OLIVEIRA; DE PAULA, 2008).

O primeiro registro do gênero como bioinvasor no Atlântico ocorreu em 1943 quando foi documentada a presença de *T. coccinea* em cascos de navios no Caribe, onde a espécie pode aumentar sua expansão e abundância para, posteriormente, ser reportada em várias regiões do Golfo do México, em substratos naturais e artificiais, principalmente aos associados à indústria petrolífera (CAIRNS, 2000; FENNER, 2001).

Em águas brasileiras, o Coral Sol foi primeiramente documentado no final da década de 80 em uma plataforma petrolífera offshore na bacia de Campos e em costões rochosos na baía de Ilha Grande, no Rio de Janeiro; entretanto, apenas em 2004 teve as duas espécies invasoras identificadas: *T. coccinea* e *T. tagusensis* (CASTRO; PIRES, 2001; PAULA; CREED, 2004).

Figura 1: Registro do *Tubastraea* em rochas costeiras no oceano Atlântico (Ilha de Búzios): (A) *T. tagusensis* dominando a comunidade bentônica de uma parede vertical de rochas, (B) Colônias de *T. tagusensis* com pólipos abertos, (C) Colônia de *T. coccinea* (laranja) entre colônias de *T. tagusensis*.



Fonte: Mantelatto et. al. (2011).

Embora toda a gama de variabilidade morfológica desses corais no Brasil ainda seja pouco conhecida, Paula e Creed (2004) distinguiram as duas espécies documentadas no país pela coloração do cenossarco (tecido que une os pólipos), sendo amarelo em *T. tagusensis* e vermelho-alaranjado em *T. coccinea*, permitindo assim, uma identificação dos organismos a olho nu. Ainda segundo esses autores, em relação às diferenças morfológicas, foi identificado que *T. tagusensis* possuem coralitos (esqueleto de cada pólipos composto por um tubo com placas verticais que irradiam do centro) mais espaçados e projetados do que em *T. coccinea*, também possuem uma base mais estreita comparada a grande base de *T. coccinea*, que é fixa no substrato, além da diferenciação no número de septos.

Algumas características biológicas desses corais invasores podem potencializar seu sucesso como bioinvasor, visto que, ambos *Tubastraea* spp. introduzidos, demonstraram crescimento acelerado, competição com diversos organismos nativos, tais como esponjas, ascídias, algas calcárias e corais nativos, além da capacidade de expandir rapidamente seu alcance ao longo da costa sudoeste do Brasil (DE PAULA et. al., 2014).

Dentre essas características que aceleram a bioinvasão, destacam-se estratégias de reprodução e sobrevivência típicas de espécies oportunistas, que possuem alta produção de larvas ao longo do ciclo de vida, podem se reproduzir de forma sexuada ou assexuada, possuem idade reprodutiva precoce, rápido assentamento, além de uma alta taxa de crescimento (AYRE; RESING, 1986; DE PAULA, 2007; GLYNN et al., 2008).

Diferentes experimentos constataram que, após a liberação, as larvas plânulas permaneceram nadando, viáveis por até 14 dias (DE PAULA, 2007), ou até 18 dias (DE PAULA, et al. 2014), em aquários sem fornecimento de substratos naturais, embora outros estudos testemunhem que, onde encontra-se substratos naturais, a metamorfose possa ocorrer rapidamente após 1-3 dias (GLYNN et.al, 2008). A maioria das pesquisas foram capazes de indicar uma fase planctônica curta, assentamento rápido e em colônias próximas (PAULA; CREED, 2005; CREED; DE PAULA, 2007; MIRANDA, 2014).

No Brasil, estudos constataram que esses corais possuem grande tolerância ecológica para resistirem a altas temperaturas, são mais abundantes em ambientes rasos, além de serem organismos capazes de assentarem em diversos tipos de substratos, apesar de já existirem pesquisas que registraram *T. tagusensis* em maior abundância em substratos artificiais, incluindo boias, naufrágios, recifes artificiais, plataformas de petróleo, e etc (PAULA; CREED, 2005; CREED; DE PAULA, 2007; CREED; MANGELLI, 2012; CAIRNS, 2000).

No geral, os grandes impactos de espécies exóticas sobre espécies nativas, além da alteração de habitat, estão relacionados com a predação, o deslocamento de espécies nativas, a

alteração da cadeia trófica, parasitismo, ciclagem de nutrientes e o aumento da capacidade de sobrevivência de novas espécies invasoras (CROOKS, 2002).

Dispondo de estratégias de defesa química, os corais invasores do gênero *Tubastraea* utilizam esses mecanismos para obterem sucesso como bioinvasores e se tornarem grandes competidores na nova região habitada. São capazes de produzir substâncias anti-incrustantes e anti-predação, além de substâncias que causam necrose em outras espécies (LAGES et al., 2012; DE PAULA, 2007). Estudos relataram diversas situações onde esses invasores apresentaram vantagens competitivas frente a importantes organismos nativos, como espécies de corais brasileiros do gênero *Siderastea stellata*, e uma menor abundância das espécies *Madracis decactis* e *Mussismilia hispida* relatadas em regiões invadidas por *T. tagusensis* (MIRANDA et al., 2016). Além disso, o gênero já foi registrado competindo por espaço com outros organismos, principalmente mexilhões, moluscos, peixes, esponjas, etc (MANTELLATO; CREED, 2014; GUIMARÃES, 2016; MIZRAHI et al., 2016; CASTELLO-BRANCO et al., 2014).

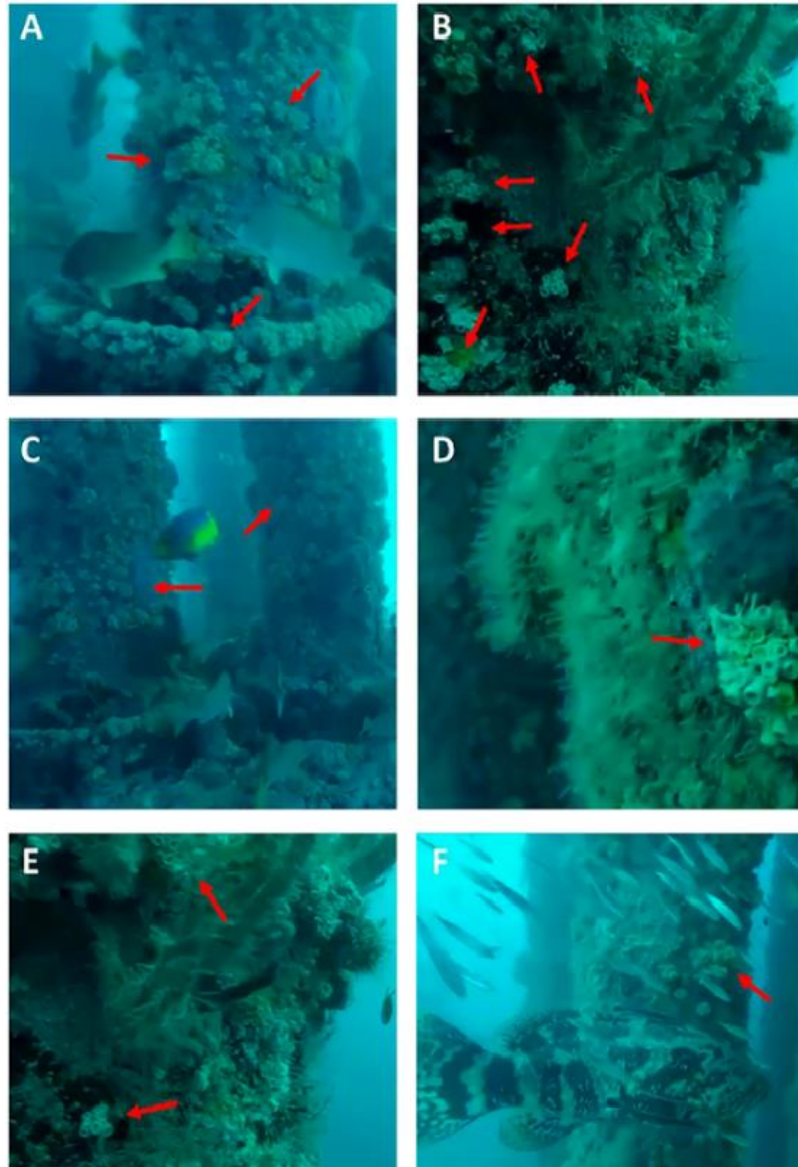
Após os primeiros registros de *T. tagusensis* e *T. coccinea* no litoral do Rio de Janeiro na década de 80, os estudos sobre a distribuição dessas espécies no litoral brasileiro ganharam força, e hoje, o Coral sol já é relatado amplamente distribuído na costa brasileira, tanto em substratos naturais (recife de corais e costões rochosos) como em substratos artificiais (navalhos e plataformas de petróleo), mesmo que essas ocorrências não se deem na mesma intensidade, ou seja, que ocorram em diferentes estágios de invasão e estratégias de adaptação (CREED et al., 2016).

Atualmente, há ocorrências das espécies invasoras de *Tubastraea* nos seguintes estados do Brasil: Rio de Janeiro, Paraná, Santa Catarina, São Paulo, Espírito Santo, Bahia, Sergipe, Pernambuco e Ceará (DE PAULA; CREED, 2004; FERREIRA, 2003; FERREIRA et al., 2004; APEL, 2012; MANTELATTO, 2012; MANTELATTO et al., 2011; CAPEL et al., 2014; MIZRAHI et al., 2014; COSTA et al., 2014; SAMPAIO et al., 2012; MIRANDA et al., 2016; SOARES et al., 2018; SOARES et al., 2020).

No Ceará, o Coral Sol foi primeiramente documentado no naufrágio *SS Eugene V.R Thayer*, popularmente conhecido como petroleiro do Acaraú, localizado a cerca de 40 km da costa do município de Acaraú, no ano de 2016, através do registro de *T. tagusensis* na região (SOARES et al., 2018). Já no ano de 2020, 200 km a leste do naufrágio de Acaraú, um segundo registro das espécies invasoras no Ceará foi documentado no naufrágio do Pecém (*SS Baron Dechmont*), a cerca de 60 km da costa, em que, através de imagens e vídeos de um programa de monitoramento realizado por mergulhadores, foi possível observar e identificar

características morfológicas que indicaram a presença de *T. tagusensis* (SOARES *et. al.*, 2020). Recentemente, também já foi detectado a presença de *T. coccinea* no petroleiro do Acaraú e no naufrágio do Pecém (SOARES *et. al.*, 2020).

Figura 2: Colônias de *Tubastraea tagusensis* (setas vermelhas) gravados a 10 m de profundidade em uma plataforma de óleo na costa do Ceará em 2015. A, B, C, D, E e F: *Tubastraea tagusensis* com a fauna associada, incluindo peixes e invertebrados bentônicos, como esponjas e briozoários.



Fonte: Braga *et. al.* (2021)

Além disso, o primeiro registro da presença do coral invasor em plataformas de óleo e gás do Ceará ocorreu em 2021, também através de imagens e vídeos de alta resolução publicados em 2015 (Figura 2), em que foi possível observar a ocorrência de *T. tagusensis* no campo de Xeréu, localizado em um conjunto de nove plataformas de petróleo e 32 poços de

exploração, que compreende quatro campos (Xeréu, Atum, Espada e Curimã), a cerca de 30 km da costa do município de Paracuru (BRAGA *et al.*, 2021).

Soares *et al.* (2018) ainda ressaltam que anteriormente ao primeiro registro da espécie no estado, a ocorrência mais próxima de *Tubastraea* da região norte de corais brasileiros havia sido documentada no estado de Sergipe, em plataformas de petróleo, confirmado em um documento oficial publicado pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis) em 2013. A sugestão é que *T. tagusensis* foi introduzido no estado do Ceará por meio da bioincrustação em navios de perfuração e/ou em plataformas de óleo e gás, e o ponto de introdução pode estar provavelmente ligado a movimentação de navios nos portos vizinhos localizados nos municípios de Paracuru e Pecém (SOARES *et al.*, 2018).

Visto que o *Tubastraea* spp. consegue assentar, recrutar e sobreviver em diferentes substratos artificiais, alguns tipos de lixo marinho como plásticos e madeiras que flutuam por longos períodos podem ser colonizados por essas espécies, e assim, correntes e ventos podem espalhar o animal invasor para diferentes locais e em diferentes escalas espaciais (MANTELATTO *et al.*, 2020). Soares *et al.* (2020) salienta que o coral invasor registrado na PCCE possui alto potencial para invadir o grande sistema de recifes de corais da Amazônia, e para ser naturalmente ou artificialmente transportado através de detritos marinhos.

Dessa forma, de acordo com os impactos causados pela presença do coral-sol como organismo invasor e sabendo que o animal representa ameaça ao funcionamento de um ecossistema a partir que se estabelece, expande para novas áreas, alteram o habitat e modificam a quantidade de recursos para outras espécies (IBAMA, 2020), é importante entender amplamente como o *Tubastraea* spp. se dispersa no ambiente marinho e coloniza novas áreas, para que assim, medidas de prevenção, controle e monitoramento sejam adotadas em todas as áreas invadidas, considerando a redução dos impactos sobre espécies nativas.

Diante disso, a modelagem numérica é uma ferramenta capaz de simular condições ambientais e suas respostas à uma dada perturbação ou fenômeno, de determinar a circulação hidrodinâmica do sistema, permitindo a análise do transporte de efluentes, contaminantes e animais, e como consequência, representa um importante instrumento para apoio à tomada de decisões no gerenciamento de um corpo hídrico (GUIDONI, 2010; SANTANA, 2017).

Coolen *et al.* (2020) dispôs da modelagem numérica para a análise da dispersão de uma espécie de mexilhão (*Mytilus edulis*), que por meio de substratos artificiais, expandiu sua distribuição para áreas não acessíveis para a população costeira desta espécie. Para o estudo, o autor usou o método do rastreamento de partículas, utilizando dois módulos do modelo Delft3D, o Flow e D-WAQ Part (DELTARES, 2020a; DELTARES, 2020c).

No presente estudo, também será utilizado o modelo Delft3D, que devido sua eficiência em simular rastreamento de partículas baseado em forçantes hidrodinâmicas, se mostrou adequado para o objetivo desse trabalho, que compreende em utilizar forçantes como vento e maré para verificar a influência dessas variáveis na dispersão de larvas do Coral Sol (*Tubastraea* spp.) na Plataforma Continental da Margem Equatorial Brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- O objetivo geral deste estudo é compreender como ocorre a dispersão das larvas de *Tubastraea* spp. na Plataforma Continental da Margem Equatorial Brasileira através do rastreamento de partículas do modelo Delft3D.

2.2 Objetivos Específicos

- Implementar e validar um modelo hidrodinâmico para a PCCE.
- Avaliar a influência das forçantes (vento e maré) na dispersão de partículas.
- Determinar o padrão sazonal de dispersão das partículas e avaliar o padrão de assentamento das larvas em função do tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

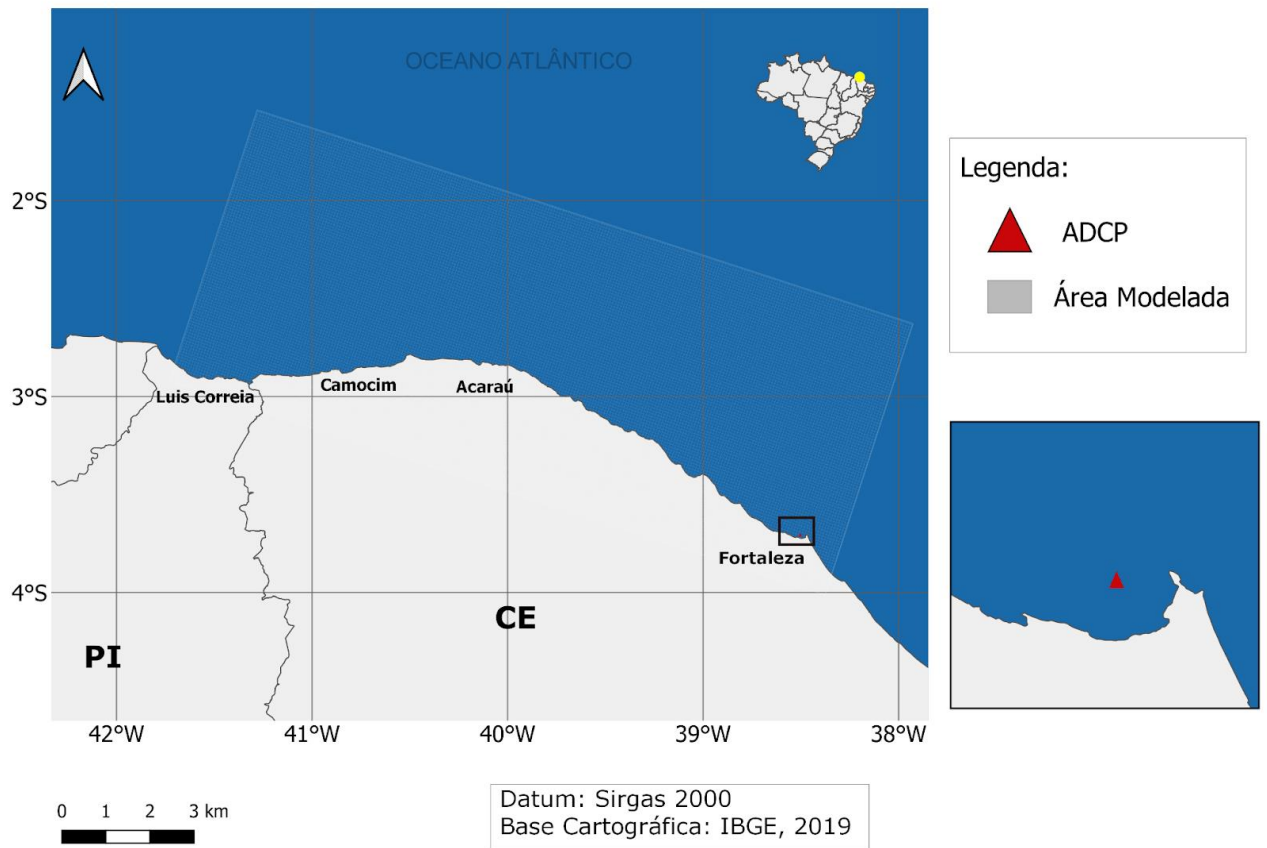
3.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho compreende uma porção da Margem Equatorial Brasileira, mais especificamente a parte oeste da Plataforma Continental do Estado do Ceará e adjacências. Com cerca de 500 km de costa, limita-se nas longitudes de 42°O a 38°O, e nas latitudes de 1°S a 4°S, como está representado na Figura 3.

A PCCE apresenta uma largura média de 60 km, e atinge um valor máximo de 100 km, próximo a região de Camocim. Possui declividade média de 2m/km, com o relevo relativamente plano, alternado com ondulações e feições irregulares de recifes de algas (DIAS, 2011). As profundidades são, geralmente, inferiores a 50 m, atingindo 70 m na borda e alcançando rapidamente 2000 m na base do talude continental (SILVA; ALVARENGA,

1994). A temperatura da superfície do mar da região permanece entre 26.5-30°C com pequena variação intra e interanual (TEIXEIRA; MACHADO, 2013).

Figura 3: Mapa da região de estudo.



Fonte: O autor (2021).

O clima semi-árido característico da região é marcado por uma intensa sazonalidade dos fatores climáticos, influenciando o regime de chuvas e seca que, dominados pelos ventos alísios, determinam dois períodos bem definidos: um chuvoso, que compreende o intervalo dos meses de dezembro a maio, com maior média pluviométrica em março, e o seco, que varia entre os meses de junho a novembro, com a menor média pluviométrica no mês de setembro (DIAS, 2011).

Silva (2003) explica que as alterações sazonais na velocidade e direção dos ventos alísios presentes na região são devido a mudanças na circulação geral da atmosfera ao longo do ano, de forma que nos meses de fevereiro e março, devido a maior aproximação da Zona de Convergência Intertropical, a intensidade dos ventos diminui, e nos outros meses, com o retorno da ZCIT para latitudes equatoriais, os maiores gradientes de pressão atmosférica

contribuem para uma intensificação maior dos mesmos. Dessa forma, a ZCIT controla a marcha sazonal do regime de chuvas, apresentando ventos alísios de NE no primeiro semestre do ano, que trazem massas de ar ocasionando chuvas no Nordeste, e para o resto do ano, com o enfraquecimento da ZCIT e a transição para ventos de SE, ocorre o período de estiagem (FUNCEME, 2010).

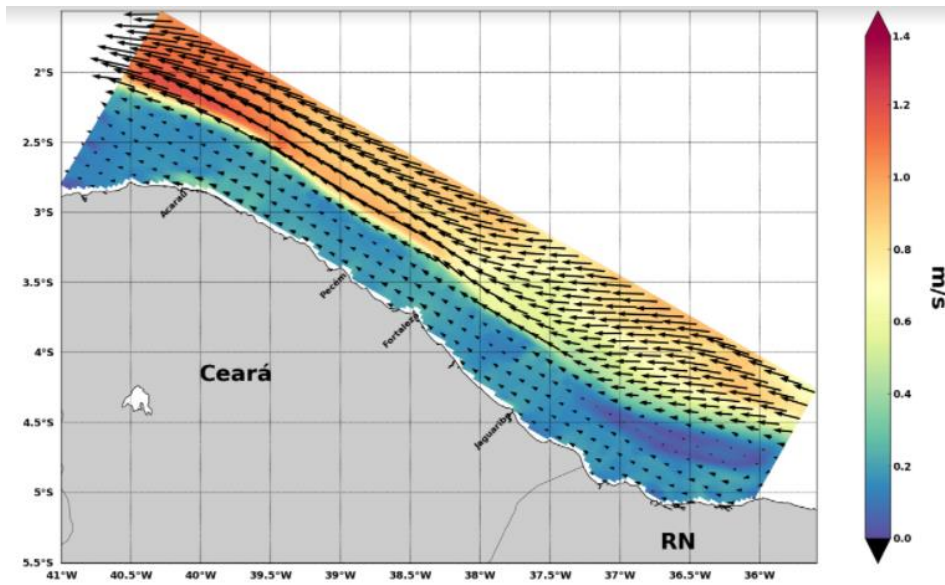
A região da PCCE possui um regime de marés caracterizado como mesomaré, de periodicidade semi-diurna, contabilizando, em um dia lunar, duas preamares e duas baixamares (MAIA, 1998).

Em relação às correntes, as que atuam sobre a plataforma continental são resultados de manifestações da resposta das águas a diferentes forçantes. Em geral, essas forçantes atuam diretamente na plataforma, como ventos e campos de densidade, ou se comunicam desde o talude, tais como marés e gradientes de pressão (DIAS, 2011).

De acordo com Freitas (2015), a circulação residual de maré na PCCE apresenta direções bem definidas de enchente e vazante, maiores velocidades máximas na sizígia com 0,02 m/s e menores na quadratura com 0,012 m/s, ainda possuindo menor velocidade integrada na coluna d'água no primeiro semestre, e um maior campo de velocidade no segundo semestre em decorrência da maior intensidade dos ventos. No entanto, mesmo com as intensidades distintas, ambos os cenários demonstram fluxos em direção a noroeste (FREITAS, 2015).

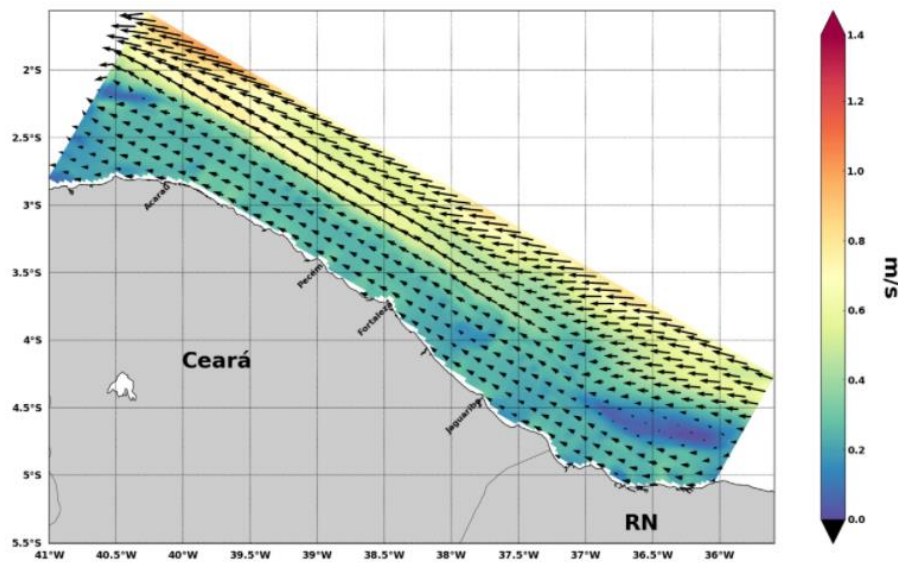
As figuras 4 e 5 representam um modelo implementado por Freitas (2015), e mostram a intensidade média da corrente superficial da PCCE de 8 anos de simulação, do primeiro e do segundo semestre do ano, respectivamente.

Figura 4: Intensidade média da corrente superficial da PCCE de 8 anos de simulação - 1º Semestre.



Fonte: Freitas (2015).

Figura 5: Intensidade média da corrente superficial da PCCE de 8 anos de simulação - 2º Semestre.



Fonte: Freitas (2015).

Em larga escala, a circulação que circunda a Plataforma Continental do Nordeste Brasileiro (PCNB) é caracterizada pela presença da Corrente Norte do Brasil (CNB), que constitui uma forte corrente de fronteira oeste, segue seu fluxo sobre o talude e possui papel fundamental na dinâmica da região quebra da plataforma (SILVEIRA, 1990; NOGUEIRA, 2013).

3.2 O MODELO DELFT3D

Desenvolvido pela empresa holandesa Deltares, o Delft3D é um modelo integrado que é utilizado em abordagens para zonas costeiras, lacustres, fluviais e estuarinas. O modelo é composto por vários módulos agrupados em uma interface mútua, podendo realizar simulações numéricas de fluxos, ondas, transporte sedimentar, qualidade da água, desenvolvimentos morfológicos e ecologia (DELTARES, 2021a).

Deltares (2021a) afirma que, os módulos que compõem o Delft3D integram diversos domínios de interesse, sem limitar-se aos mesmos, tais como: vazão, advecção e dispersão de efluentes, fluxos devido à maré, propagação de ondas, fenômenos de qualidade da água e rastreio de partículas, incluindo o derramamento de petróleo. São capazes de interagir dinamicamente entre si, permitindo a troca de dados e resultados (DELTARES, 2021a)

No presente trabalho, os módulos empregados para reproduzir as simulações foram: o Delft3D-FLOW e o D-waq PART, os utilitários, RGFGRID, QUICKIN e QUICKPLOT, além do Delft Dashboard, interface acoplada ao Delft3D.

3.2.1 Delft3d-FLOW

O módulo hidrodinâmico Delft3D-FLOW é caracterizado por um programa capaz de operar simulações multidimensionais (2D ou 3D), que calcula fluxos não estáveis e fenômenos de transporte resultantes da ação das marés, de forçantes meteorológicas e de efeitos de gradientes de densidade, sobre uma grade retilínea ou curvilínea, com limites ajustados, utilizando um sistema de coordenadas cartesianas ou esféricas (DELTARES, 2021b).

Segundo Deltares (2021b), o módulo Delft3D-FLOW fornece a base hidrodinâmica dos outros módulos do Delft3D, realizando a simulação dos fluxos através da resolução de diferentes equações, que dependerão da área de aplicação. Em simulações bidimensionais, as acelerações verticais são dispensadas, o que irá resultar no cálculo da equação da pressão hidrostática. Em simulações tridimensionais, a equação da continuidade é usada para o cálculo das velocidades verticais. Já nos exemplos costeiros, que incluem estuários, fluxos de rios e regiões que transportam substâncias dissolvidas, os fluxos são modelados a partir da equação de advecção-difusão.

Dessa maneira, o conjunto das equações diferenciais parciais, combinadas com as apropriadas condições iniciais e de contorno, resolvidos em uma grade, vão fornecer dados de fluxos que poderão ser usados e modificados nos outros módulos do Delft3D.

3.2.2 D-waq PART

O módulo de partículas disponível na interface do Delft3D é responsável por simular o transporte e processos simples de qualidade da água através do método de rastreamento de partículas, utilizando os dados de fluxos previamente simulados no módulo hidrodinâmico, com rastros seguidos em três dimensões no tempo, e buscando uma distribuição dinâmica através do cálculo da massa das partículas nas células da grade do modelo (DELTARES, 2021c).

Além disso, Deltares (2021c) ainda afirma que o módulo descreve um padrão detalhado de qualidade da água, sendo assim adequado para liberações instantâneas e contínuas de partículas, simulação de pluma (por exemplo, derramamento de óleo), e modelagem do transporte de substâncias tais como sal, bactérias, e outras substâncias químicas não conservadoras ou em decomposição.

3.2.3 RGFGRID, QUICKIN e QUICKPLOT

O módulo RGFGRID, descrito por Deltares (2021d), tem o propósito de criar, modificar e visualizar grades ortogonais e curvilíneas para serem posteriormente utilizadas nos outros módulos do Delft3D.

O QUICKIN também é um módulo base, que tem como objetivo a criação, modificação e visualização de modelos de batimetria, com capacidade de interpolar dados de profundidade de diferentes fontes, datas e resoluções, de forma a gerar uma batimetria mais realista (DELTARES, 2021e).

Já o QUICKPLOT, de acordo com Deltares (2021f), pode ser utilizado para a visualização e animação de resultados gerados pelos módulos do Delft3D e outros programas de maneira prática, permitindo a comparação de dados da saída do modelo com os dados coletados.

3.2.4 Delft Dashboard

O Delft Dashboard foi desenvolvido no intuito da rápida criação de modelos numéricos hidrodinâmicos e estuarinos, além de modelos morfológicos básicos (NEDERHOFF; DONGEREN; ORMONDT, 2016).

Dessa forma, o DDB tem a capacidade de definir um domínio e uma grade em um mapa global, definir os parâmetros numéricos e processos, além da importação de dados de condições iniciais e de contorno (batimetria, topografia, ondas, marés, vento) a partir de fontes disponíveis na internet (NEDERHOFF; DONGEREN; ORMONDT, 2016).

3.3 GRADE

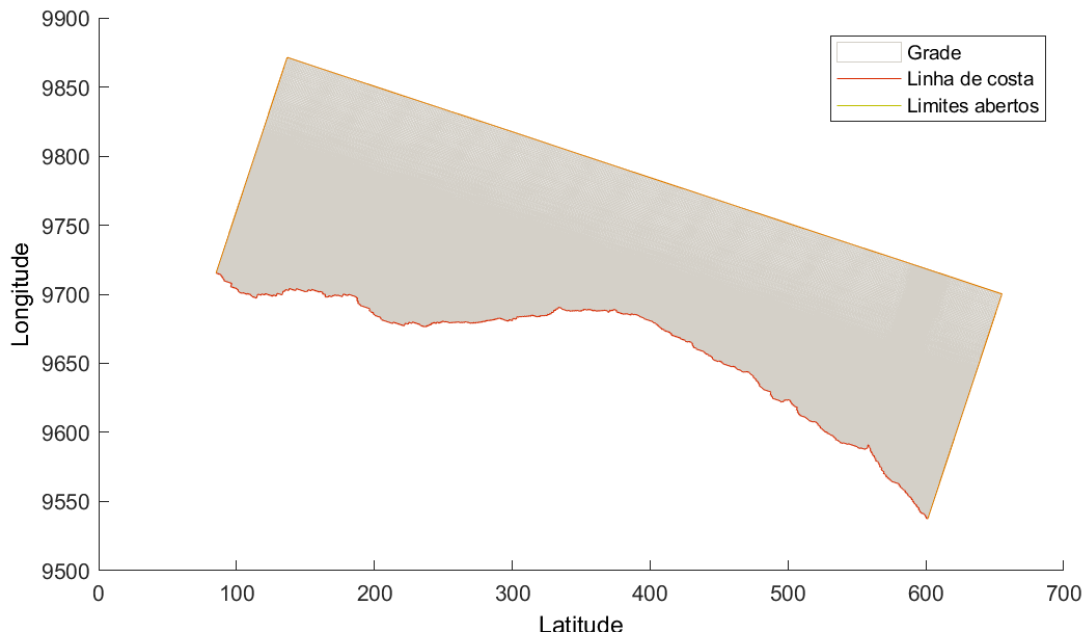
O primeiro passo para a implementação de um modelo hidrodinâmico é a definição da grade de domínio, pois é onde as equações que regem o movimento dos oceanos são resolvidas em um computador (NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 2018).

Neste trabalho, foi gerada uma grade retangular ortogonal (Figura 6) no programa DDB, em coordenadas UTM, sendo a área a ser modelada o litoral oeste do estado do Ceará e adjacências, precisamente de Fortaleza até Luís Correia, abrangendo a plataforma continental oeste do estado, com 500 km de extensão ao longo da linha de costa, e em média 100 km de largura.

Os dados gerados no programa foram posteriormente encaminhados ao RGFGRID, onde parâmetros como resolução, ortogonalidade e suavidade foram ajustados.

A maior parte da grade possui uma resolução média de 700 m, sendo a resolução máxima de 250 m na região do Porto do Mucuripe, que, consistindo em uma área de interesse, precisou atingir uma resolução alta o suficiente para a obtenção de resultados mais precisos necessários para a comparação dos dados de corrente no processo de validação.

Figura 6: Grade utilizada nas simulações.

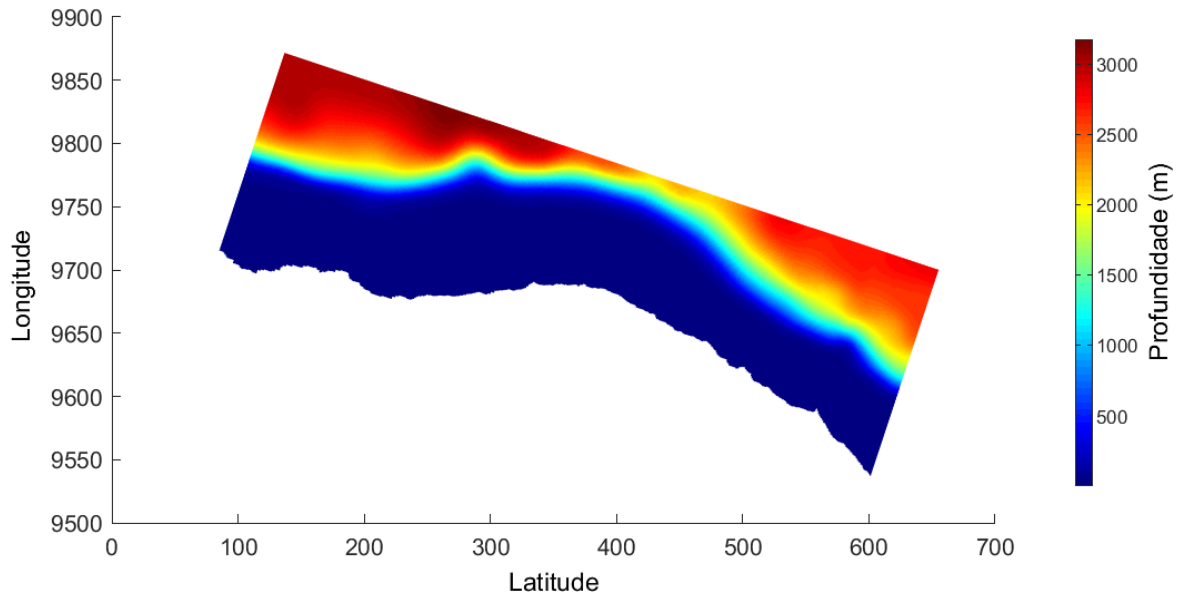


Fonte: O autor (2021).

3.3.1 Batimetria da área

A batimetria da área foi coletada no programa DDB, por meio do acesso ao banco de dados do ETOPO 1, que possui uma resolução de aproximadamente 1/60 de grau. Para mais, dados batimétricos in situ da PCCE foram acrescentados. Esses dados coletados in situ foram interpolados aos do ETOPO1, no módulo QUICKIN, utilizando o método de interpolação triangular, considerando assim, que, o resultado final da batimetria gerada, alcançasse o mais próximo da realidade. A figura 5 representa o mapa batimétrico da área de estudo.

Figura 7: Batimetria da área.



Fonte: O autor (2021).

3.4 FORÇANTES

No módulo FLOW, o modelo hidrodinâmico foi configurado em sua variante barotrópica (2D), forçado por maré e ventos.

3.4.1 Maré

Para representar as variações de elevação e correntes de maré, foram inseridos dados das cinco principais constituintes harmônicas: M2, S2, N2, O1 e K1, para quatro regiões da grade: Fortaleza, Acaraú, Camocim e Luis Correia. Os valores foram adquiridos a partir do banco de dados da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) e fazem parte do catálogo de estações maregráficas brasileiras.

A maré foi introduzida no modelo através das condições de contorno disponíveis no módulo FLOW. Os resultados reproduzidos pelo modelo foram comparados com os dados da Femar para fins de validação.

3.4.2 Vento

A forçante vento foi configurada de forma espacial e uniforme em toda a grade, com variação temporal de 12 horas. Os dados do período de junho/2011 a junho/2012 foram coletados por uma estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e obtidos por meio do site do Banco de Dados para o Ensino e Pesquisa (BDMEP).

Devido à distância de 11 km da estação para a costa, correções na altura e magnitude dos dados de vento foram aplicadas por Leitão (2019), com base nos trabalhos de Viana Filho (2019) e Pereira (2012).

3.5 Condições iniciais, contorno e parâmetros físicos

As condições iniciais irão especificar os valores com que o modelo iniciará, podendo ser simples, tais como um valor uniforme para toda a área, ou mais complexas como valores variando no espaço ou retirados de simulações anteriores (DELTARES, 2021b). Em relação às condições de contorno, os limites abertos foram identificados pelos pontos cardeais: Norte, Leste e Oeste. As condições nessas regiões devem ser especificadas por variações de nível d'água, descargas, velocidade de correntes, etc (LESSER, 2004).

Neste trabalho, as condições iniciais da simulação restringiram-se por: nível do mar 0 m para todo o domínio.

O limite norte foi dividido em quatro regiões: Fortaleza, Acaraú, Camocim e Luis Correia. Foi configurado o contorno do tipo astronômico, e utilizou-se dados de harmônicos de maré, adquiridos do banco de dados da Femar, para cada região subdividida. Os dados foram implementados para serem posteriormente interpolados pelo modelo. Quanto aos limites leste e oeste, foram utilizados contornos do tipo Neumann.

Os parâmetros físicos utilizados foram as constantes sugeridas pelo modelo: gravidade $9,8 \text{ m/s}^2$; densidade da água 1025 kg/m^3 ; densidade do ar 1 kg/m^3 .

3.6 Módulo de partículas

O módulo PART trabalha com o transporte advectivo de partículas e pode ser usado para o rastreamento de dois tipos de substâncias, óleo e traçador (DELTARES, 2020). Para este trabalho, foi definido o foco em traçadores, que segundo Deltares (2020c), podem ser substâncias conservativas, bactérias ou substâncias degradáveis e/ou sedimentáveis. As larvas

do Coral Sol serão representadas pelas partículas do modelo, entretanto, o modelo é incapaz de simular as características morfológicas das larvas.

Neste estudo, foram utilizados traçadores para simular a dispersão de larvas do Coral Sol na PCCE, em dois pontos estratégicos de lançamento (Figura 5): (1) Naufrágio do Acaraú (Eugene V.R Thayer), localizado nas coordenadas de 02°36'S - 39°43'O e (2) Naufrágio do Pecém (Baron Dechmont), posicionado nas coordenadas de 03°17'S - 38°43'O.

Para a avaliação do padrão de dispersão, foram realizadas duas simulações, uma no primeiro semestre e outra no segundo semestre do ano. Para cada período, foram definidas datas e realizado dois lançamentos de partículas para cada ponto, um lançamento em um ciclo de maré de sizígia e outro em um ciclo de quadratura (Tabela 1). Os lançamentos ocorreram de forma contínua durante 24 horas para cada ponto. As datas e o intervalo de lançamentos foram determinados de acordo com os objetivos referentes à análise da influência das diferentes forçantes sobre a dispersão.

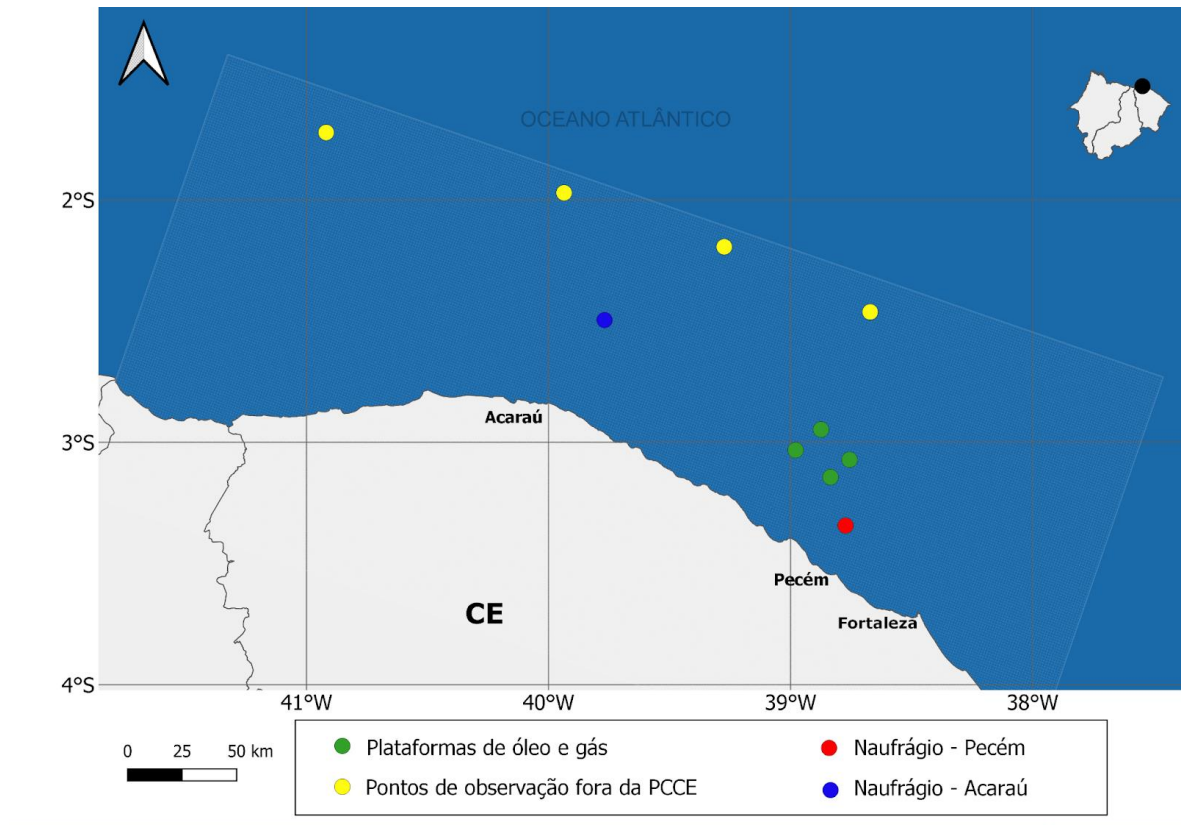
Tabela 1: Datas e períodos de liberação das partículas para cada ponto de lançamento.

Pontos de Lançamento	Primeiro Semestre	Segundo Semestre
Naufrágio do Pecém	Sizígia: 09/03/2012 Quadratura: 30/03/2012	Sizígia: 31/08/2011 Quadratura: 21/09/2011
Naufrágio do Acaraú	Sizígia: 09/03/2012 Quadratura: 30/03/2012	Sizígia: 31/08/2011 Quadratura: 21/09/2011

Fonte: O autor (2021).

Para a avaliação da trajetória das partículas ao longo da grade, foram acrescentados 8 pontos de observação, em que, 4 deles representaram as plataformas de óleo e gás localizadas a cerca de 60 km da costa do município de Paracuru (Xeréu, Atum, Curimã e Espada), e 4 foram distribuídos fora da plataforma continental, como está representado na Figura 6.

Figura 8: Mapa dos pontos configurados na simulação.



Fonte: O autor (2021).

Cada liberação de partículas ocorreu de forma contínua, com todas inseridas no modelo dentro um período de 24 horas. Para cada lançamento, a taxa de liberação durante as 24 horas foi de 0,001 m³/s, a concentração do traçador foi de 1000 kg/m³, e a massa total das partículas atingiu 86,4 toneladas. Além de ter sido determinado um número total de 100.000 partículas a serem liberadas.

A precisão de uma simulação é definida por Deltares (2020c) como a menor concentração que uma partícula pode ter para ser representada por uma célula computacional. Dessa forma, o número mínimo de partículas necessário para ser inserido no modelo é dado a partir da equação representada pela Fig. 9:

Figura 9: Equação para o cálculo da concentração mínima de partículas.

$$C_{\min} = \frac{m_{\text{particle}}}{A_{\text{cell}} \times h_{\text{layer}}} = \frac{M_{\text{total}}}{N_{\text{total}} \times A_{\text{cell}} \times h_{\text{layer}}}$$

Fonte: Deltares (2020c).

Em que:

C_{min} : concentração mínima para resolução ($Kg.m^{-3}$)

$M_{partícula}$: massa por partícula [kg]

$A_{célula}$: área da célula computacional [m^2]

H_{camada} : profundidade da célula [m]

N_{total} : número total de partículas a ser liberado [-]

M_{total} : massa total a ser liberada [kg]

Através dela, é possível estimar a concentração mínima em kg/m^3 que o modelo é capaz de simular, baseado na área e na profundidade da célula do ponto de lançamento das partículas. Para a obtenção da concentração mínima, utilizou-se uma massa total de partículas de 86,4 toneladas, o número total de 100.000 partículas a serem liberadas, uma área de 924.429 m^2 e a profundidade da célula de 25 m. Dessa forma, foi possível obter uma concentração mínima de partículas por célula de $3,7 \times 10^{-8} kg/m^3$.

3.7 Implementação do modelo

A simulação hidrodinâmica, realizada no módulo FLOW, foi configurada para a data de junho/2011 a junho/2012, compreendendo um período de um ano, com um passo de tempo de 15 segundos. O arquivo de comunicação e o de intervalo histórico foram configurados para coletar dados a cada hora, e o de mapa ajustado para coletar dados a cada duas horas de simulação.

Já em relação ao período de tempo para o cálculo da dispersão de partículas no módulo PART, foram realizadas duas simulações, uma para o mês de setembro de 2011 e outra para o mês de março de 2012, coincidindo com o período chuvoso e seco da região, respectivamente. O passo de tempo das saídas das simulações foram configurados para cada 1 hora.

3.8 Validação

Para avaliar a capacidade de um modelo numérico de simular um fenômeno de forma satisfatória, é necessário que ocorra o processo de validação do mesmo. Nessa fase, é comum que se utilize parâmetros estatísticos para testar a eficácia do modelo, avaliando assim, seu

desempenho. O Erro Médio Quadrático (RMSE), Erro Médio Absoluto Relativo (RMAE) e o skill foram os parâmetros utilizados para este caso, e que, através das equações, representadas pela Figura 10, são capazes de expressar a efetividade do modelo (WILLMOT, 1981; RIJN. *et al.*, 2003; WILLIAMS; ESTEVES, 2017).

Figura 10: Equações representantes dos parâmetros estatísticos utilizados (RMSE, RMAE e Skill).

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

$$RMAE = \frac{\{(|x_{mod} - x_{obs}|) - (\epsilon)\}}{|x_{obs}|}$$

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

Fonte: Adaptado de WILLMOT (1981) e RIJN et. al (2003).

Onde:

X_{mod} : valores de saída do modelo.

X_{obs} : valores observados.

\bar{x}_{obs} : é a média dos valores observados.

ϵ erro de medição do equipamento utilizado na coleta de dados.

Por via de regra, o RMAE e o RMSE podem apresentar valores entre 0 e $+\infty$, e o Skill valores entre 0 e 1 (Tabela 2). Os valores desses parâmetros que representam uma associação perfeita entre os dados modelados e os dados observados são: RMAE e RMSE igual a 0, e Skill igual a 1 (RIJN. *et al.*, 2003).

Os resultados de nível do mar simulados também foram validados através da comparação dos dados das componentes harmônicas de maré do modelo com os mesmos observados disponíveis no catálogo da Femar. Dessa forma, foi feito o cálculo da diferença entre os dados observados e modelados por meio do cálculo do erro percentual, correspondente a equação representada pela Figura 11:

Figura 11: Equação representante do cálculo de erro percentual utilizado para a validação do nível do mar.

$$\text{desvio (\%)} = \frac{\text{Obs} - \text{Mod}}{\text{Obs}} * 100$$

Fonte: O autor (2021).

Tabela 2 – Intervalo de classificação para erros de parâmetro

Classificação	skill	RMAE e RMSE
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

4.1.1 Marés

Para a validação do nível do mar, foi realizada a comparação dos dados observados, disponibilizados pelo catálogo da Femar, com os dados modelados a fim de serem representados de maneira realística. Foi validado os quatro limites abertos estabelecidos no modelo, correspondentes aos dados de maré de Fortaleza, Acaraú, Camocim e Luis Correia, representados respectivamente pelas tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 3: Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar da estação maregráfica do porto do Mucuripe.

Fortaleza	Amp. Obs. (cm)	Amp. Mod. (cm)	Erro de Amp. (%)	Fase Obs. (°)	Fase Mod. (°)	Erro de Fase (%)
S2	31,00	30,03	3,13	151,00	150,68	0,21
M2	96,20	93,96	2,33	132,00	132,04	0,03
N2	19,50	18,81	3,54	115,00	115,05	0,05
O1	7,30	6,89	5,62	186,00	184,83	0,63
K1	7,70	7,93	2,99	211,00	217,51	3,09

Fonte: O autor (2021).

Tabela 4: Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar na praia de Acaraú.

Acaraú	Amp. Obs. (cm)	Amp. Mod. (cm)	Erro de Amp. (%)	Fase Obs. (°)	Fase Mod. (°)	Erro de Fase (%)
S2	28,70	28,47	0,80	178,00	176,91	0,61
M2	93,90	95,65	1,86	148,00	148,03	0,02
N2	23,60	22,40	5,08	153,00	151,70	0,85
O1	4,00	4,18	4,50	174,00	171,77	1,28
K1	8,50	8,03	5,53	260,00	252,94	2,72

Fonte: O autor (2021).

Tabela 5: Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar na estação do porto de Camocim.

Camocim	Amp. Obs. (cm)	Amp. Mod. (cm)	Erro de Amp. (%)	Fase Obs. (°)	Fase Mod. (°)	Erro de Fase (%)
S2	35,60	34,76	2,36	170,00	169,70	0,18
M2	112,30	111,40	0,80	144,00	144,62	0,43
N2	23,20	23,53	1,42	138,00	138,30	0,22
O1	8,20	7,64	6,83	196,00	189,65	3,24
K1	8,10	8,69	7,28	230,00	233,03	1,32

Fonte: O autor (2021).

Tabela 6: Comparação dos dados modelados com os dados coletados pela Femar no porto de Tutóia.

Luis Correia	Amp. Obs. (cm)	Amp. Mod. (cm)	Erro de Amp. (%)	Fase Obs. (°)	Fase Mod. (°)	Erro de Fase (%)
S2	34,40	33,67	2,12	159,00	158,95	0,08
M2	105,60	104,02	1,50	139,00	139,09	0,06
N2	22,20	21,82	1,71	124,00	124,57	0,46
O1	7,80	8,19	5,00	192,00	192,46	0,24
K1	9,10	9,57	5,16	217,00	220,12	1,44

Fonte: O autor (2021).

Nas tabelas, são apresentados os valores de amplitude e fase das 5 principais componentes harmônicas da região de estudo, além do erro calculado a partir da diferença dos dados observados e modelados.

Ao comparar os valores das harmônicas de maré do modelo com o observado, nota-se boa similaridade entre os dados, válidos para as tabelas 2, 3, 4 e 5. No entanto, constatou-se que o modelo subestimou o nível do mar em algumas situações.

Contrapondo os valores modelados e observados da amplitude das quatro localidades, todas as componentes (S2, M2, N2, O1 e K1) apresentaram o erro de amplitude menor que 10%, e, exceto O1 e K1, também mostraram os percentuais de erros menores que 5%. Em relação a comparação dos erros de fase, todas as componentes apresentaram valores de erros menores que 5%, ainda para todas as localidades configuradas (Fortaleza, Acaraú, Camocim e Luís Correia). Os maiores erros de amplitude e fase, representados pelas componentes diurnas (O1 e K1), ao contrário das componentes semi-diurnas, são pouco consideráveis pois representam pouco a variabilidade total do nível do mar da região.

O valor do parâmetro skill da validação de nível do mar foi 0,99 para as quatro localidades validadas, sendo esse valor classificado como excelente.

Sabendo que, para os objetivos deste trabalho, as variações de amplitude são importantes para representar as variações de nível do mar a cada ciclo de maré e o regime de maré, esses resultados são satisfatórios e pode-se concluir que o modelo conseguiu representar de maneira adequada as variações de nível do mar produzidas pela maré.

4.1.2 Correntes

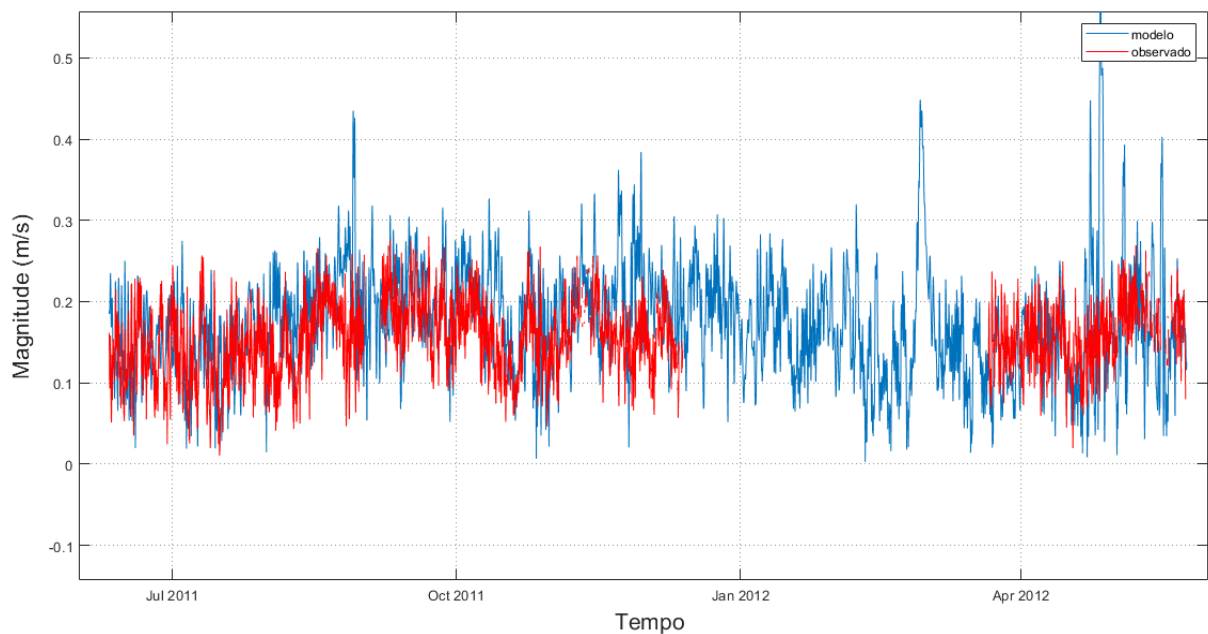
Para a validação das correntes simuladas, comparou-se os dados de magnitude e direção modelados com os dados observados coletados em ponto de fundeio do ADCP (Figura 3) localizado próximo ao porto do Mucuripe. As figuras 12 e 13 representam as séries temporais de magnitude e direção da corrente integrada na coluna d'água modelada e observada, respectivamente.

Comparando as curvas de magnitude (Figura 12), apesar dos valores observados terem sido ligeiramente subestimados pelo modelo, principalmente no período final da simulação (Abril/2012 a Junho/2012), constata-se que o modelo conseguiu reproduzir o padrão de correntes no ponto de fundeio do ADCP. Em relação à série temporal de direção, representado pela Fig. 13, nota-se que o modelo também conseguiu reproduzir bem as variações de direção

durante o período simulado, apesar de ter ligeiramente subestimado os valores observados na maior parte do período.

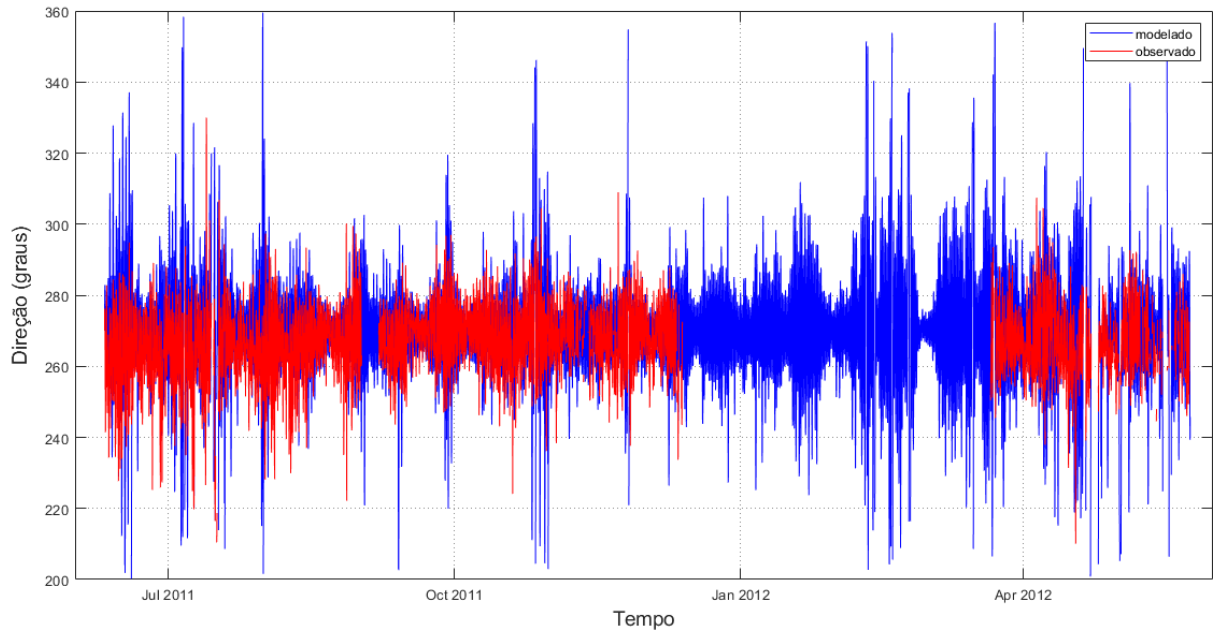
Os valores dos parâmetros RMSE e RMAE foram baixos, sendo considerados excelentes, juntamente com o skill. Sendo assim, baseado nestas estatísticas e nas comparações das duas figuras, conclui-se que o modelo foi capaz de reproduzir o campo de correntes da região. Na Tabela 6, estão descritos os valores de RMSE, RMAE e skill dos resultados de corrente modelados.

Figura 12: Série temporal da média de magnitude da corrente integrada na coluna d'água (modelado x observado).



Fonte: O autor (2021).

Figura 13: Série temporal da média da direção resultante das correntes na coluna d'água (modelado x observado).



Fonte: O autor (2021).

Tabela 6: Valores de RMSE, RMAE e skill para magnitude e direção.

Propriedade	RMSE	RMAE	Skill
Magnitude	0,05 m/s	0,01	0,94
Direção	13°	-	0,99

Fonte: O autor (2021).

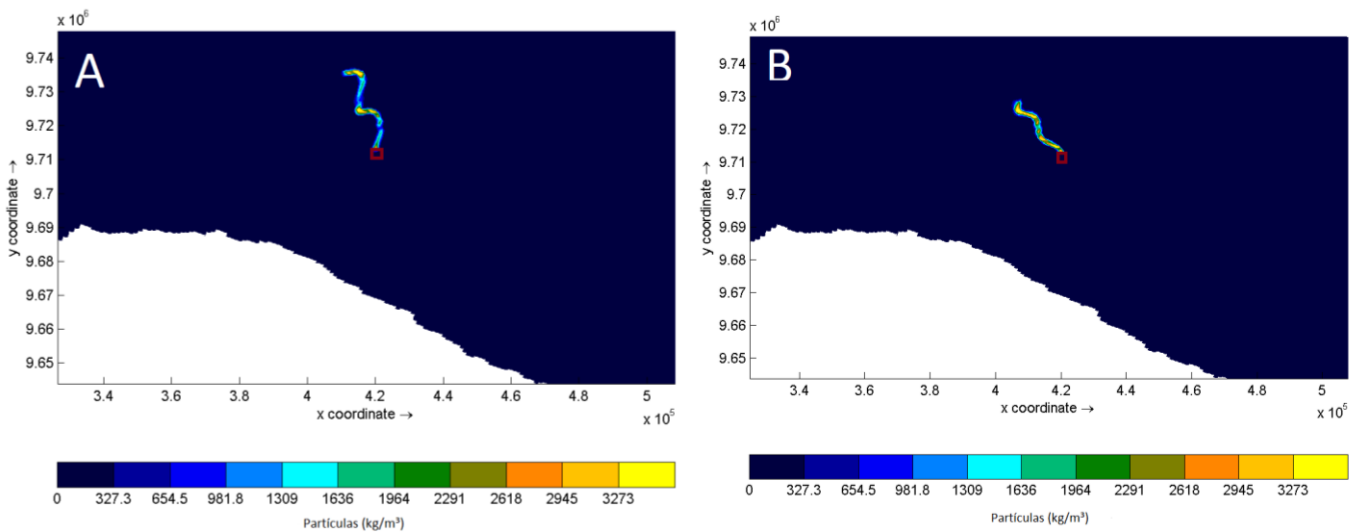
4.2 EXPERIMENTOS

Os resultados foram explorados a partir dos objetivos de análise de cenários distintos, com relação à influência da amplitude de maré e direção e intensidade dos ventos na dispersão e período de assentamento da larva do coral sol.

4.2.1 Primeiro semestre

Após 24 horas do início do lançamento das partículas no ponto do naufrágio do Acaraú, tanto na sizígia, quanto na quadratura, representados pela Fig. 14, é possível observar a dominância do efeito da maré sobre a dispersão das plumas em curto período.

Figura 14: Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no primeiro semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.

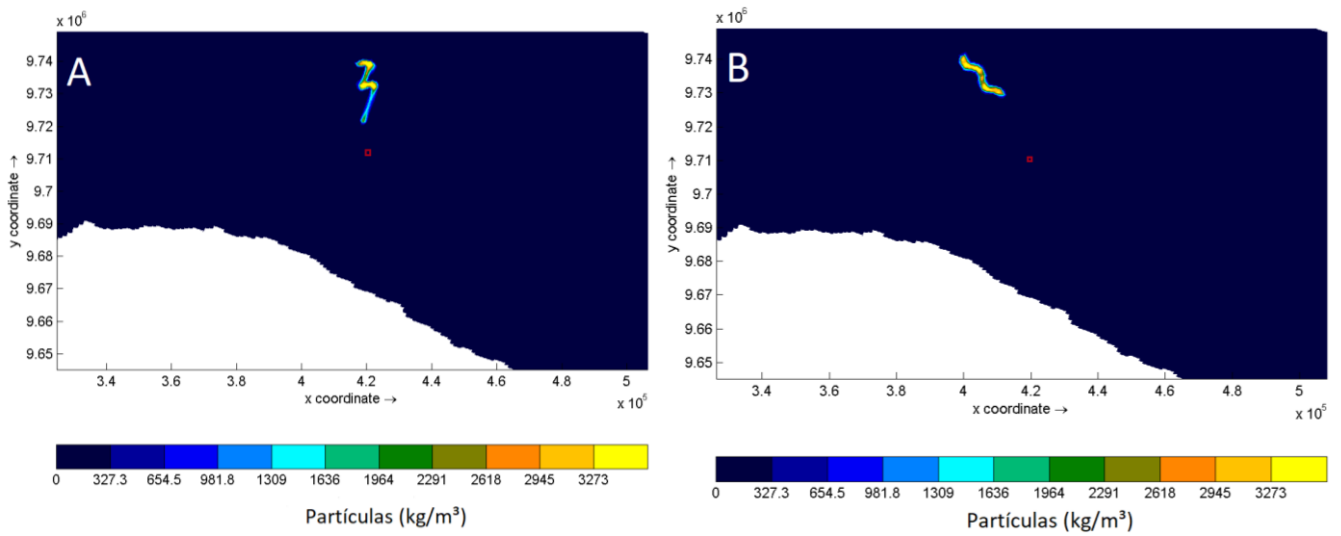


Fonte: O autor (2021)

No cenário de lançamento na data correspondente à maré de sizígia (Figura 14.A), as partículas se dispersam de forma mais espalhada, seguindo um trajeto definido primordialmente pelas oscilações do nível do mar com grandes amplitudes, característico das marés de sizígia. Já no experimento de liberação das partículas na quadratura (Figura 14.B), foi possível observar o mesmo padrão de dispersão das partículas definido pelo nível do mar, entretanto, com menor dispersão devido às menores amplitudes que caracterizam as marés de quadratura.

Ainda no mesmo ponto de liberação, três dias após o lançamento das partículas, a pluma em dispersão na maré de sizígia (Figura 15.A) é mais extensa que a liberada no período de maré de quadratura (Figura 15.B). Apesar disso, durante esse intervalo de dias, as duas plumas percorreram uma distância de cerca de 25 km a noroeste do ponto de liberação, tendendo a se aproximarem cada vez mais da quebra da plataforma continental.

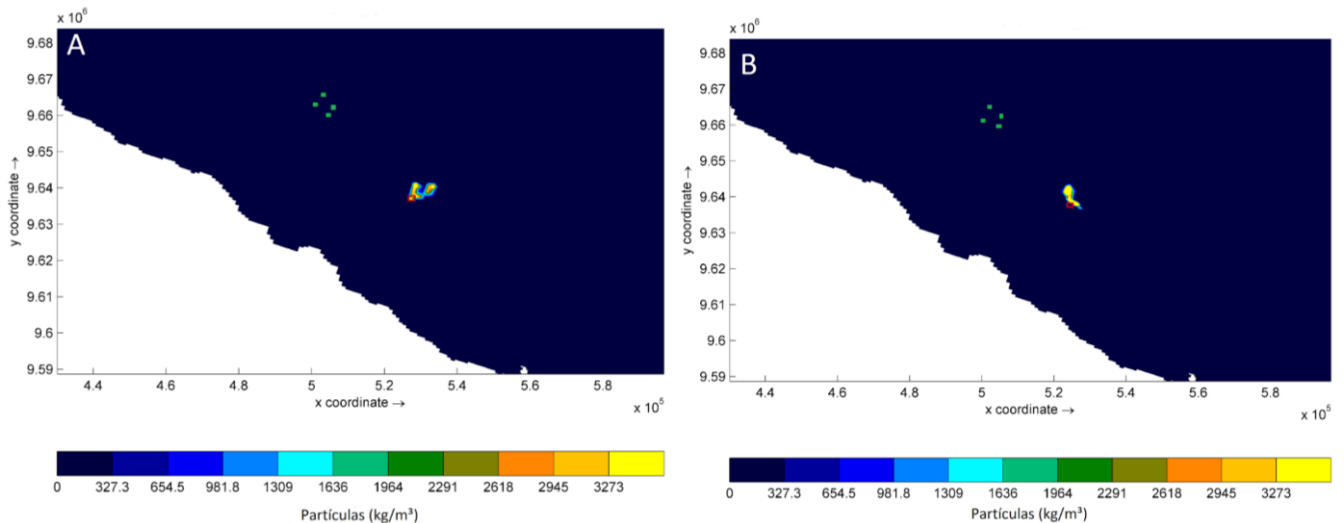
Figura 15: Dispersão da pluma das larvas 3 dias após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no primeiro semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.



Fonte: O autor (2021).

Em relação ao lançamento no naufrágio do Pecém, referente tanto à maré de sizígia (Figura 16.A) quanto à maré de quadratura (Figura 16.B), durante as 24 horas após o início da liberação, não foi possível observar o mesmo efeito das variações quinzenais de maré no padrão de dispersão que se obteve no experimento do Acaraú. Nessas primeiras horas de simulação, apesar da dispersão estar sob efeito dominante das marés, as partículas mantiveram-se concentradas na região de lançamento e não houve espalhamento tão evidente.

Figura 16: Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o lançamento no naufrágio do Pecém no primeiro semestre. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.

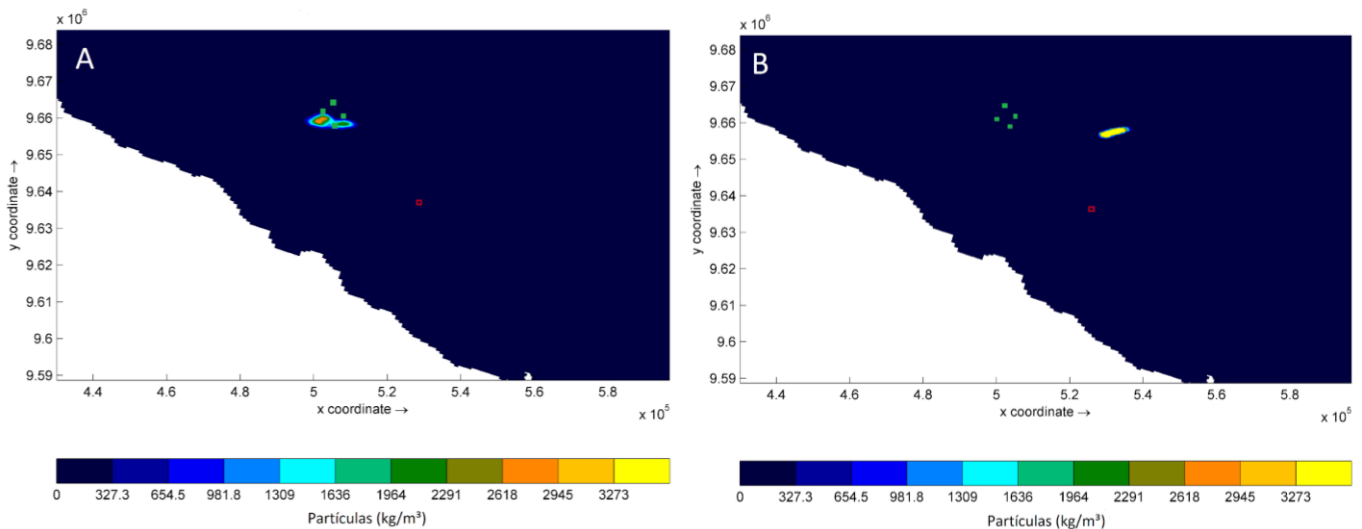


Fonte: O autor (2021).

Ainda no ponto naufrágio do Pecém, dois dias e meio após a liberação das partículas nas diferentes fases de maré, a pluma se manteve pouco extensa e concentrada, além de ter sido possível observar que após esse tempo, as partículas se dispersaram por cerca de 25 km a noroeste do ponto inicial, e passaram por dois pontos de observação representantes das plataformas de óleo e gás do Paracuru (Xeréu e Curimã) apenas no lançamento na maré de sizígia. O mapa e o gráfico de concentração das partículas em função do tempo na maré de sizígia estão representados, respectivamente, por Fig 17.A e Fig 18.A.

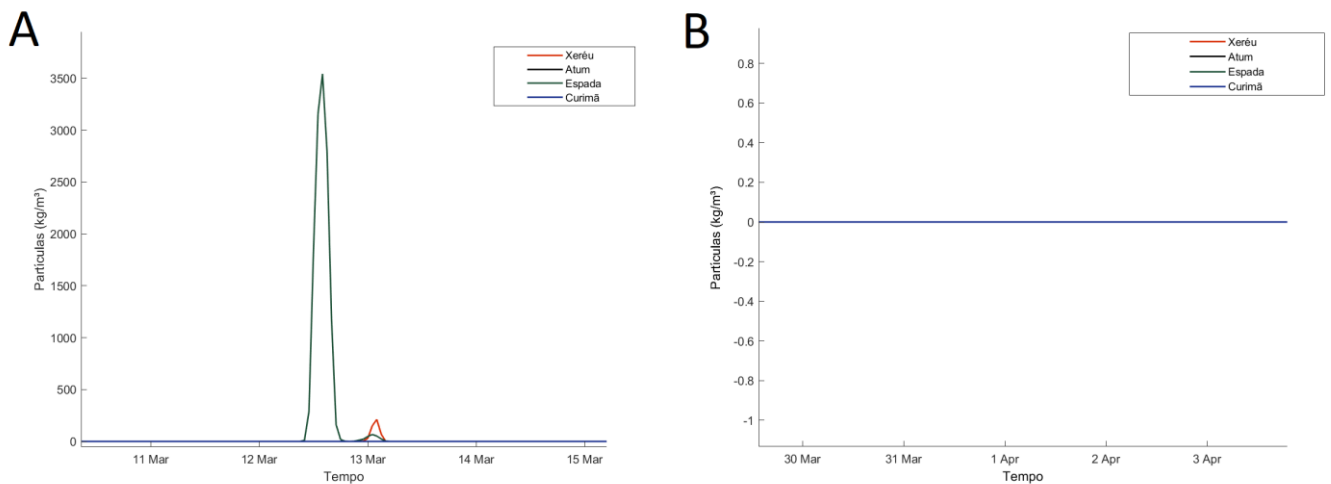
Já no cenário de lançamento na maré de quadratura, na mesma média de dias, as partículas se deslocam por cerca de 20 km do ponto de lançamento, e 20 km a leste das plataformas de Paracuru (Figura 17.B), não as atingindo em nenhum momento da dispersão (Figura 18.B).

Figura 17: Dispersão da pluma de larvas 2 dias e meio após o lançamento no naufrágio do Pecém no primeiro semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.



Fonte: O autor (2021).

Figura 18: Gráfico de concentração de partículas nas quatro plataformas de óleo e gás do Paracuru nos primeiros dias de simulação. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.

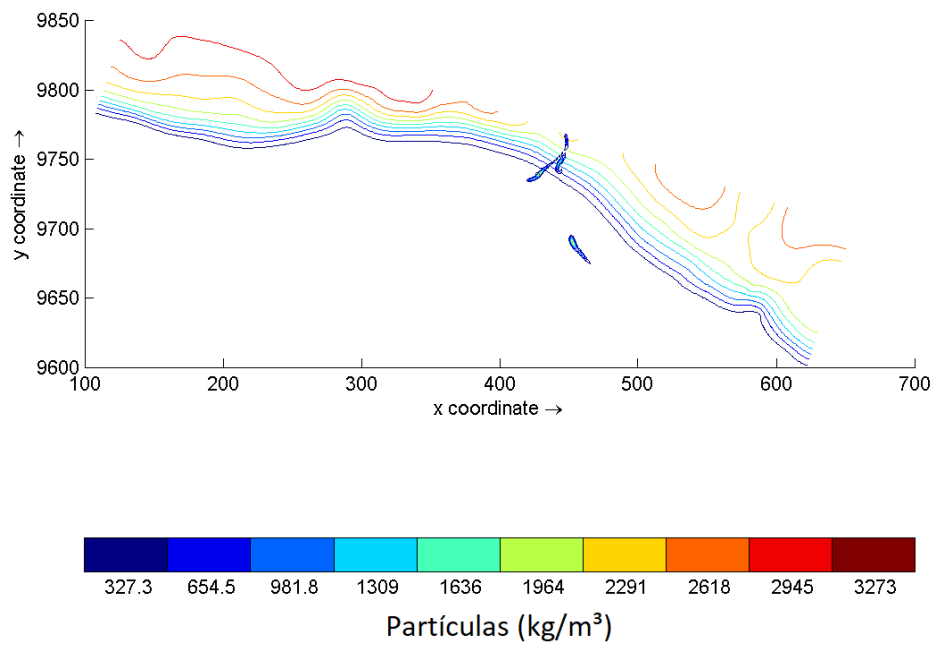


Fonte: O autor (2021).

Também foi possível constatar que, as plumas lançadas nos dois cenários de maré e nas duas localidades, se dispersam na direção da quebra da plataforma e ultrapassam o limite do talude após um determinado intervalo de dias, cada uma. A primeira pluma, liberada no naufrágio do Acaraú (Figura 19), atravessa a quebra da PCCE 6 dias após o lançamento, deslocando-se 40 km nesse período, enquanto as partículas lançadas no Pecém ainda continuam dispersando sobre a plataforma continental, alcançando o limite do talude continental, em uma distância de 50 km apenas 12 dias após a liberação (Figura 20). Tanto no cenário realizado na sizígia, quanto no cenário de quadratura, a pluma manteve um padrão de dispersão que as direcionava para a quebra da plataforma na mesma média de dias para cada uma.

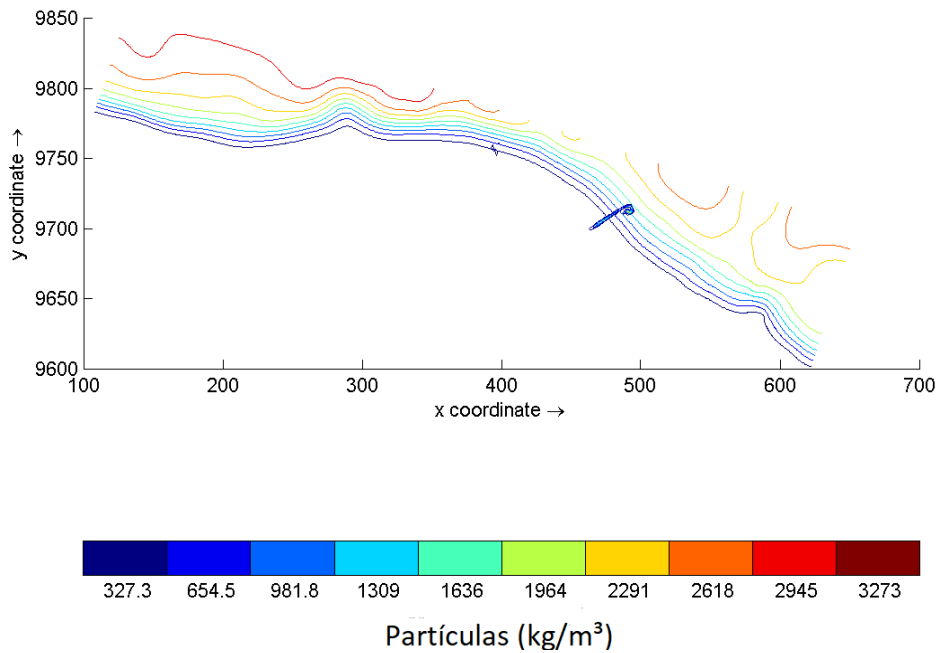
Acredita-se que, as partículas liberadas no naufrágio do Pecém demoram mais para alcançarem o limite do talude continental por não terem registrado uma ampla dispersão inicial, além do ponto de lançamento do Pecém estar localizado mais distante da quebra da plataforma do que o ponto do Acaraú.

Figura 19: Dispersão da pluma de larvas 6 dias após o lançamento nos dois pontos de liberação no primeiro semestre do ano e no cenário de maré de sizígia.



Fonte: O autor (2021).

Figura 20: Dispersão da pluma de larvas 12 dias após o lançamento nos dois pontos de liberação no primeiro semestre do ano e no cenário de maré de sizígia.



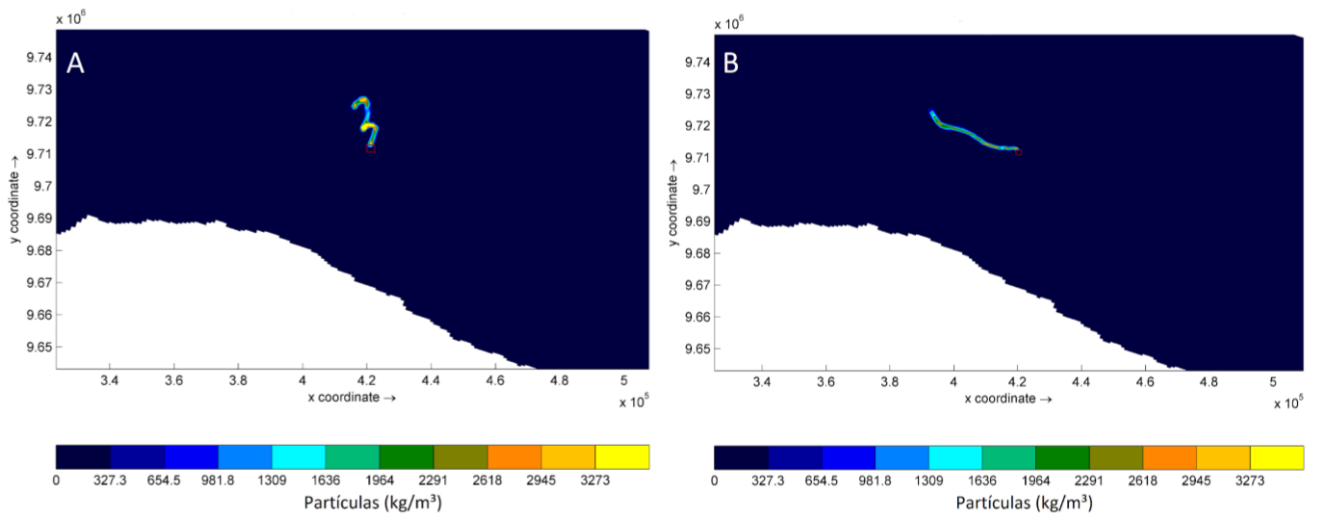
Fonte: O autor (2021).

4.2.2 Segundo semestre

Nos experimentos relacionados ao segundo semestre do ano, nas primeiras 24 horas do lançamento de partículas no petroleiro do Acaraú (Figura 21.A), foi possível observar que no lançamento na maré de sizígia, as partículas seguiram um padrão de dispersão mais espalhado, característico da influência de marés de grandes amplitudes, assim como no lançamento na quadratura (Figura 21.B), observou-se uma dispersão de menor abrangência. Ou seja, ambas foram influenciadas pelo maior domínio da força de maré em curto período.

Nestas primeiras horas, a pluma lançada na maré de quadratura atingiu uma distância de cerca de 35 km a oeste do ponto de liberação, e a lançada na sizígia conseguiu percorrer uma distância de cerca de 20 km a norte do ponto inicial.

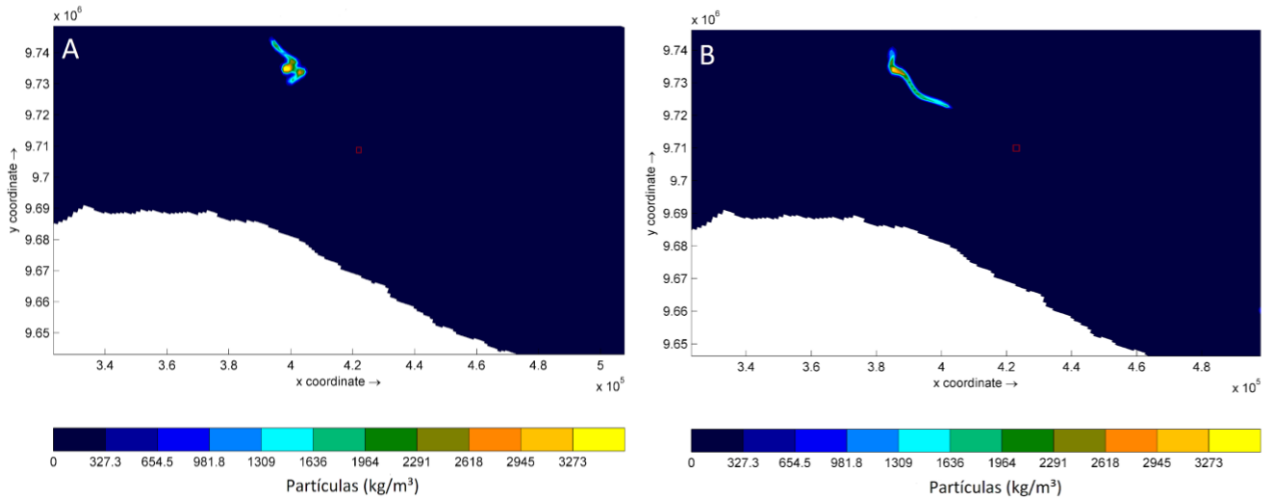
Figura 21: Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no segundo semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.



Fonte: O autor (2021).

Após 3 dias do lançamento das partículas, as plumas mantiveram o padrão de dispersão inicial, tanto para sizígia (Figura 22.A), quanto para quadratura (Figura 22.B). Durante este intervalo de tempo, ambas conseguiram se afastar do ponto inicial por cerca de 40 km a noroeste.

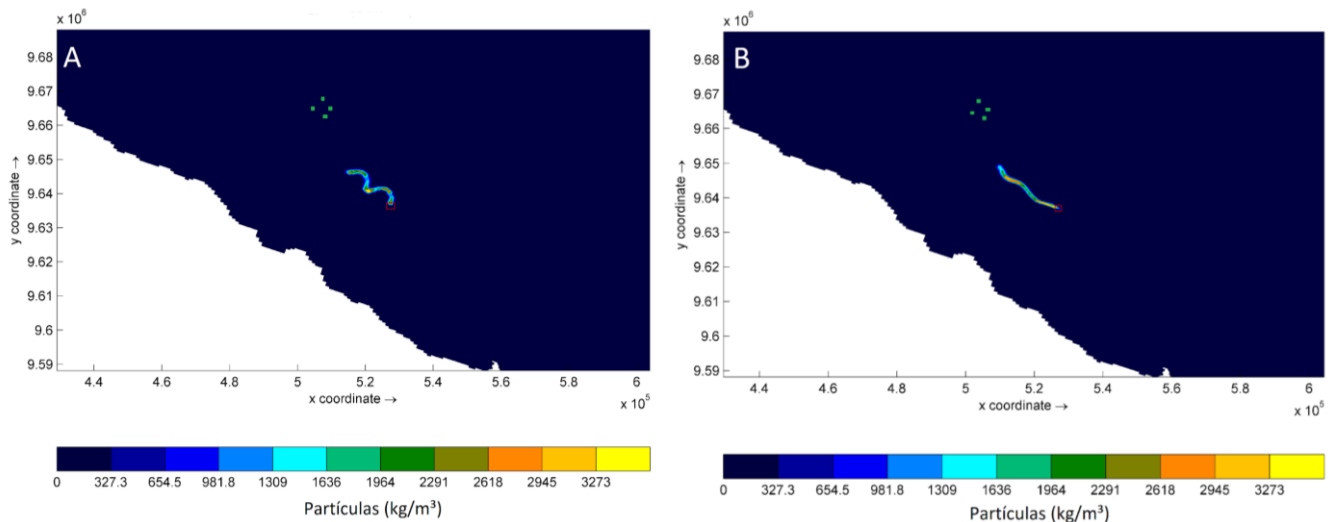
Figura 22: Dispersão da pluma das larvas 3 dias após o início do lançamento no petroleiro do Acaraú no segundo semestre do ano. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.



Fonte: O autor (2021).

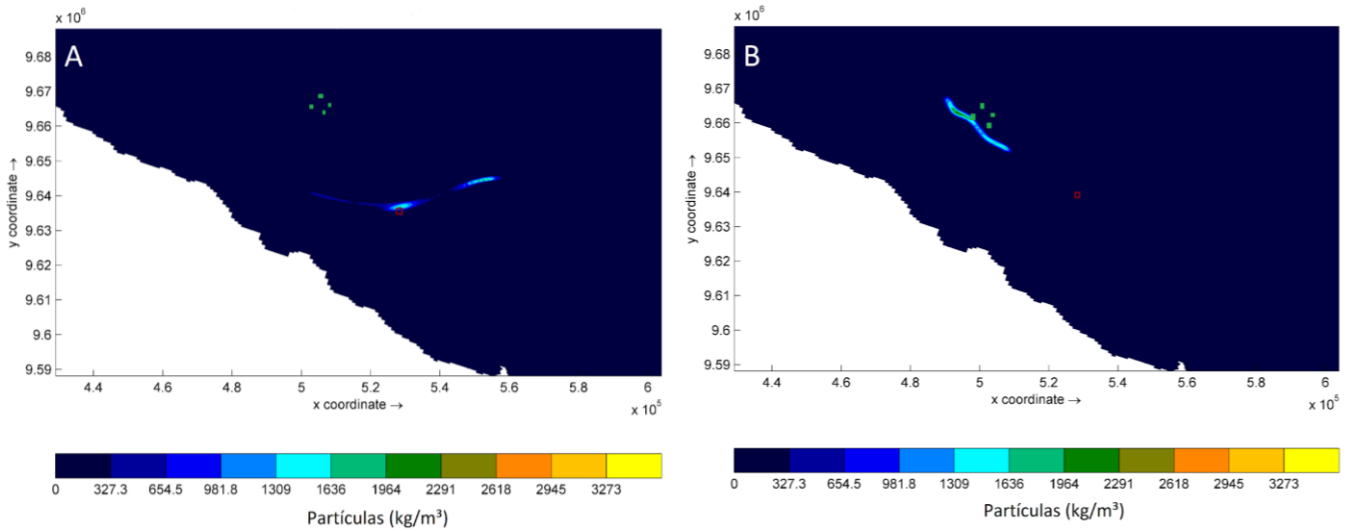
Para o experimento realizado no naufrágio do Pecém, a dispersão das plumas nas primeiras 24 horas também se mostrou de acordo com as diferenças de amplitude, maiores no primeiro cenário (Figura 23.A) e menores no segundo cenário (Figura 23.B). Dispersaram-se por cerca de 20 km a noroeste do ponto inicial em direção às plataformas de óleo e gás do Paracuru, mesmo que não tenham conseguido alcançá-las nessas primeiras horas.

Figura 23: Dispersão da pluma de larvas 24 horas após o lançamento no naufrágio do Pecém no segundo semestre. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.



Fonte: O autor (2021).

Figura 24: Dispersão da pluma de larvas 2 dias após o lançamento no naufrágio do Pecém no segundo semestre. (A) Cenário na maré de sizígia (B) Cenário na maré de quadratura.

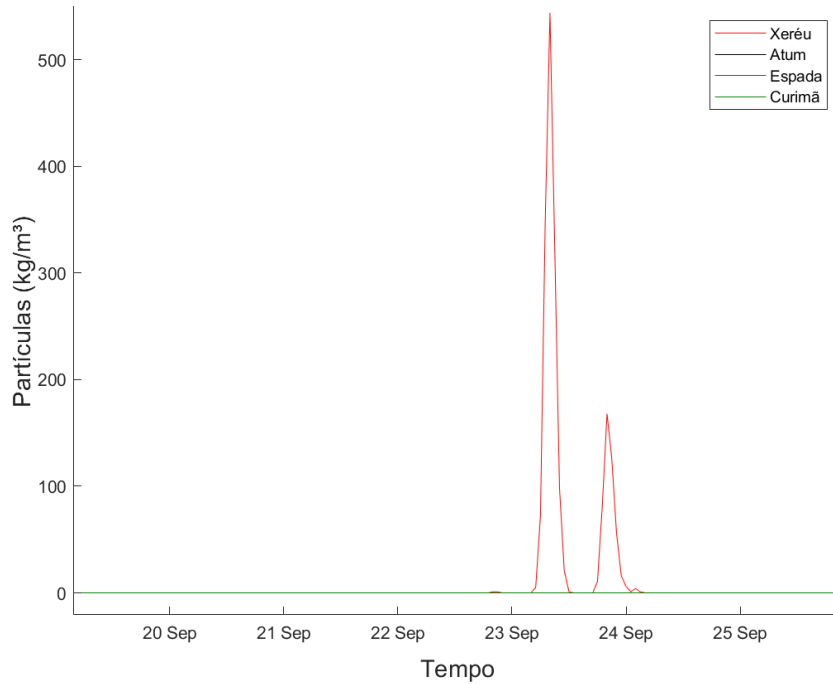


Fonte: O autor (2021).

Dois dias após o início da liberação das partículas no Pecém, a pluma lançada na quadratura seguiu o padrão de dispersão inicial e conseguiu alcançar uma das plataformas de óleo e gás do Paracuru (Fig 24.B e Fig. 25). No entanto, as partículas lançadas no período de maré de sizígia não mantiveram o padrão em direção a noroeste e só conseguiram atingir as plataformas do Paracuru 6 dias após o início da liberação (Figura 26), através de partículas aleatórias que se dispersaram da pluma, e com baixas concentrações que não tornaram possível a observação pelo mapa de dispersão.

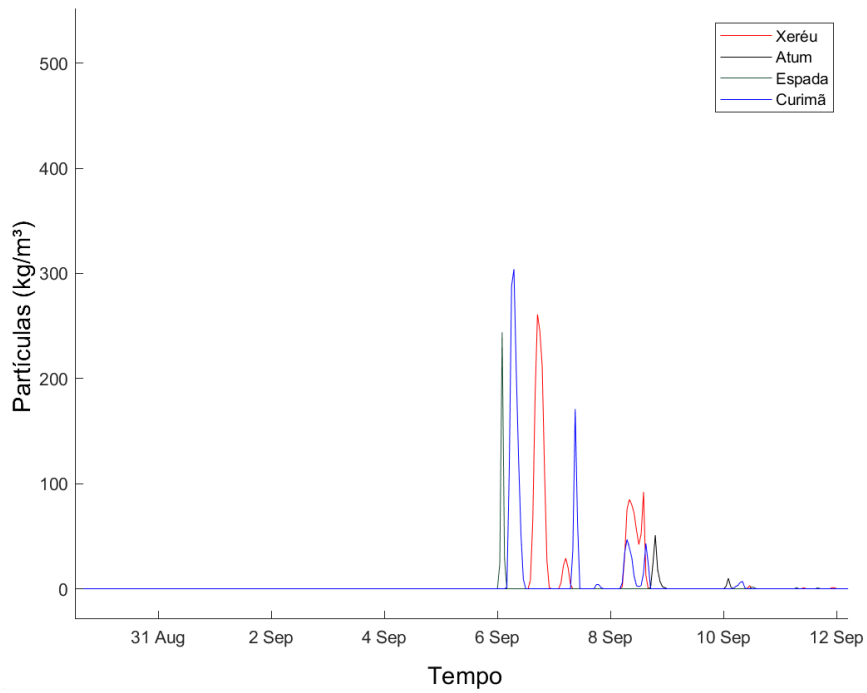
Acredita-se que as partículas liberadas na sizígia se dispersaram mais amplamente e não se mantiveram concentradas devido à junção da alta intensidade dos ventos com as grandes amplitudes de maré.

Figura 25: Gráfico de concentração de partículas nas quatro plataformas de óleo e gás do Paracuru nos dois primeiros dias de simulação no cenário de maré de quadratura.



Fonte: O autor (2021).

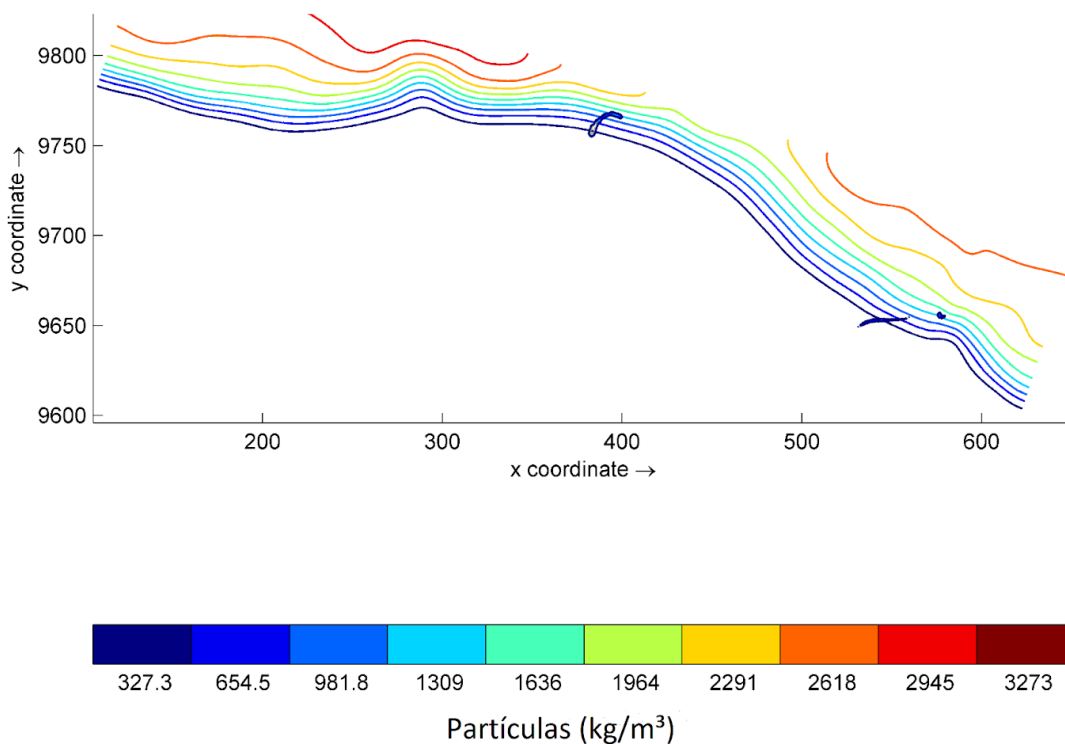
Figura 26: Gráfico de concentração de partículas nas quatro plataformas de óleo e gás do Paracuru após o lançamento das partículas na maré de sizígia, no segundo semestre do ano.



Fonte: O autor (2021).

Também foi possível observar que, as plumas lançadas nos dois cenários de maré e nas duas localidades, ultrapassaram a quebra da plataforma continental, atingindo uma distância média de 45 km em um período médio de 5 dias após o início da liberação, em que, as partículas liberadas no Pecém e as liberadas no Acaraú, foram capazes de chegar no limite do talude na mesma média de tempo, valendo tanto para o lançamento na sizígia quanto para o lançamento na quadratura.

Figura 27: Dispersão da pluma de larvas 4 dias após o lançamento nos dois pontos de liberação no segundo semestre do ano e no cenário de maré de sizígia.



Fonte: O autor (2021).

Analisando os resultados referentes ao deslocamento das plumas liberadas no primeiro semestre do ano, em contraste com o deslocamento das plumas liberadas no segundo semestre do ano, foi possível constatar que a média de distância percorrida pelas partículas em função do tempo foi maior no segundo semestre do ano.

Este resultado pode ser relacionado com o estudo realizado por Freitas (2015), que simulou a média de intensidade das correntes da PCCE e demonstrou que as mesmas possuem maior intensidade no segundo semestre do ano devido as velocidades mais elevadas do vento, assim como a direção noroeste em que seguem. A chegada mais rápida das plumas ao limite

do talude no segundo semestre do ano é outro fator que pode estar relacionado com a diferença sazonal da média de intensidade das correntes.

Os resultados relacionados a dispersão após 3 dias da liberação das partículas, em contraste com o estudo realizado por Glynn (2008), que afirmou que as larvas do *T. tagusensis* podem permanecer viáveis, sofrer metamorfose e assentar dentro do período de 1-3 dias, poderia indicar que após três dias da liberação das larvas no naufrágio do Acaraú, em qualquer um dos cenários, se as mesmas encontrassem substratos adequados, poderiam assentar em meio ao trajeto.

Da mesma forma ocorreria no ponto do naufrágio do Pecém que, neste mesmo cenário de curto período após a liberação, as larvas poderiam assentar nas plataformas de óleo do Paracuru ou em substratos considerados adequados em suas proximidades. Esses resultados relacionados a passagem das plumas pelos campos de Xeréu, Atum, Espada e Curimã obtidos pelo presente estudo, poderiam indicar a possibilidade do naufrágio do Pecém ter agido como vetor para o primeiro registro dessas espécies invasoras nas plataformas de óleo e gás do Ceará, como constatado por Braga et. al. (2021).

O rápido assentamento que poderia ocorrer nestes cenários simulados poderia justificar a distribuição agrupada das colônias e a forte relação entre a quantidade de recrutas e adultos em pequenas escalas espaciais usualmente encontrada (MMA, 2020).

Outros dois estudos constataram que as larvas do coral sol podem permanecer viáveis por até 14 dias (DE PAULA, 2007), ou por até 18 dias (DE PAULA et. al, 2014), em experimentos realizados em aquário apenas com fornecimento de substratos artificiais. Diante disso, também pode-se dizer que as partículas que chegaram até o limite da quebra da plataforma, poderiam indicar larvas dentro do período de viabilidade, com a possibilidade de sofrer metamorfose e assentar na região.

De acordo com Sammarco et. al. (2004), substratos artificiais podem oferecer ao *Tubastraea* oportunidade de intensificar sua expansão geográfica através de “trampolins” em colonização, mecanismo em que o organismo vem a colonizar o substrato artificial e facilitar a passagem para substratos naturais adjacentes. Nesse contexto, acredita-se que, se as larvas que ultrapassam a quebra da plataforma continental colonizarem tipos de substratos artificiais flutuantes (pneus velhos, decks de madeira, pilares em PVC, etc), poderá ocorrer uma dispersão em larga escala devido a circulação que circunda a PCCE ser caracterizada pela CNB, uma corrente de contorno oeste que segue um fluxo intenso sobre o talude continental.

Essa possibilidade de dispersão em larga escala pode reforçar o potencial indicado por Braga et. al. (2021), que esses corais invasores possuem para invadirem o grande sistema de

recifes de corais do Amazonas, que por ser próximo a outras diversas plataformas de óleo e gás, podem estar susceptíveis ao assentamento de larvas transportadas por correntes.

4 CONCLUSÃO

A implementação do modelo hidrodinâmico para a porção oeste da PCCE foi realizada com sucesso, visto que o modelo conseguiu reproduzir os padrões de correntes e maré da região.

O presente trabalho conseguiu apontar que, tanto a pluma lançada no naufrágio do Acaraú, quanto a pluma lançada no naufrágio do Pecém apresentaram um padrão das primeiras 24 horas de dispersão com variação dependente da amplitude de maré, com uma dispersão mais ampla no lançamento na maré de sizígia, e uma mais concentrada e menos ampla no lançamento na maré de quadratura.

A dispersão das plumas a partir das duas localidades de lançamentos também apresentaram variação sazonal, mostrando as diferenças entre o primeiro e o segundo semestre do ano. Foi observado que as plumas liberadas no segundo semestre do ano, devido a maior intensidade dos ventos, e consequentemente das correntes, conseguem percorrer maiores distâncias em menores intervalos de tempo do que as liberadas no primeiro semestre.

O trabalho também constatou que independente do semestre do ano, as partículas liberadas no naufrágio do Pecém atingiram os campos de Xeréu, Atum, Espada e Curimã em curto período após o lançamento das mesmas, a maioria atingindo esse ponto em uma média de 2-3 dias.

Através da análise do padrão de dispersão, o trabalho também possibilitou uma noção mais abrangente dos possíveis locais de assentamento das larvas do *Tubastraea* spp. após a saída tanto do naufrágio do Acaraú como do naufrágio do Pecém em determinados períodos de tempo testemunhados pela literatura.

Além disso, foi possível observar que as plumas se dispersam majoritariamente no sentido noroeste e alcançam o limite da quebra da plataforma continental nos dois cenários sazonais, apesar da diferença de tempo. Como constatado anteriormente, as plumas liberadas no segundo semestre do ano, atingem o limite do talude continental em cinco dias após a liberação, e as liberadas no primeiro semestre levam mais tempo para alcançar essa linha.

Ademais, esse trabalho também tem como propósito atuar como uma ferramenta para a comunidade acadêmica e para o poder público, auxiliando a gestão ambiental na PCCE e

para o monitoramento desses corais invasores no litoral do Ceará e adjacências, podendo ser utilizado também para outros projetos e pesquisas aplicadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSEN, Mark C.; ADAMS, Heather; HOPE, Bruce; POWELL, Mark. Risk Assessment for Invasive Species. **Risk Analysis**, [S.L.], v. 24, n. 4, p. 787-793, ago. 2004. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0272-4332.2004.00478.x>.
- AYRE, D.J., RESING, J.M., 1986. Sexual and asexual production of planulae in reef corals. *Marine Biology* 90, 187-190.
- BRAGA, Marcus Davis Andrade *et al.* Retirement risks: invasive coral on old oil platform on the brazilian equatorial continental shelf. **Marine Pollution Bulletin**, [S.L.], v. 165, p. 112156, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112156>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria no 494. Força Tarefa Nacional para Controle do Mexilhão Dourado. Brasília, 22 de dezembro de 2003.
- CAIRNS, S.D. 2000. A revision of the shallow-water azooxanthellate Scleractinia of the Western Atlantic. *Stud Nat Hist Caribb*, 75, 1-240.
- CAPEL, K.C.C., 2012. Scleractinia (Cnidaria: Anthozoa) da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo (SC), com ênfase na estrutura espaço-temporal da formação mais meridional de corais recifais no Oceano Atlântico. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Centro de Ciências Biomédicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- CAPEL, K.C.C., MIGOTTO, A.E., ZILBERBERG, C., KITAHARA, M.V. 2014. Another tool towards invasion? Polyp “bail-out” in *Tubastrea coccinea*. *Coral Reefs*, 33, 1165- 1165
- CARLTON, James T.. Patterns of transoceanic marine biological invasions in the Pacific Ocean. *Bulletin of marine science*, v. 41, n. 2, p. 452-465. 1987.
- CARLTON, James T.. Man's Role in Changing the Face of the Ocean: biological invasions and implications for conservation of near-shore environments. **Conservation Biology**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 265-273, set. 1989. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1523-1739.1989.tb00086.x>.
- CARLTON, James T.. “Transoceanic and interoceanic dispersal of coastal marine organisms: the biology of ballast water.” *Oceanography and Marine Biology* 23. p. 313-37, 1985.
- CASTRO, C. B.; PIRES, D. O. 2001. Brazilian coral reefs: what we already know and what is still missing. *Bulletin of Marine Science*, v. 69, n. 2, p. 357–371.
- COOLEN, Joop W. P. *et al.* Marine stepping-stones: connectivity of *mytilus edulis* populations between offshore energy installations. **Molecular Ecology**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 686-703, fev. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/mec.15364>.
- CREED, J.C., DE PAULA, A.F. 2007. Substratum preference during recruitment of two invasive alien corals onto shallow-subtidal tropical rocky shores. *Marine Ecology Progress Series*, 330, 101-111.

CREED, J. C.; OLIVEIRA, A. E. S.; DE PAULA, A. F. 2008. Cnidaria, Scleractinia, *Tubastraea coccinea* Lesson, 1829 and *Tubastraea tagusensis* Wells, 1982: Distribution extension. Check List, v. 4, n. 3, p. 297–300.

CONABIO. (2009). Estratégias nacional sobre espécies exóticas. Solução CONABIO no 5 de 21 de outubro de 2009: Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente. p. 27.

COSTA, T.J.F., PINHEIRO, H.T., TEIXEIRA, J.B., MAZZEI, E.F., BUENO, L., HORA, M.S.C., JOYEUX, J.-C., CARVALHO-FILHO, A., AMADO-FILHO, G., SAMPAIO, C.L.S., ROCHA, L.A., 2014. Expansion of an invasive coral species over Abrolhos Bank, Southwestern Atlantic. Marine Pollution Bulletin 85, 252-253.

CROOKS, J. A. 2002. Characterizing ecosystem-level consequences of biological invasions: the role of ecosystem engineers. Oikos 97: 153 – 166.

DELTAIRES, Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual. Delft3D, v. 3.15.52614, Holanda, 2021b. 686 p.

DELTAIRES, Delft3D: Functional Specification. Delft3D, v. 2.20.52614, Holanda, 2021a. 46p.

DELTAIRES, D-Waq PART: Simulation of mid-field water quality and oil spills, using particle tracking. User manual. D-Water Quality, v. 2.15.52614, Holanda, 2021c. 130 p.

DELTAIRES, RGFGRID: Generation and manipulation of structured and unstructured grids, suitable for Delft3D-FLOW, Delft3D-WAVE or D-Flow Flexible Mesh. User manual, v.985.00.52614, Holanda, 2021d. 126 p.

DELTAIRES, QUICKIN: Generation and manipulation of grid-related parameters such as bathymetry, initial conditions and roughness. User manual. Hydro-Morphodynamics & Water Quality, v. 4.00.52614, Holanda, 2021e. 100 p.

DELTAIRES, Delft3D-QUICKPLOT: Visualisation and animation program for analysis of simulation results. User manual. Hydro-Morphodynamics & Water Quality, v. 2.15.52614, Holanda, 2021f. 190 p.

DE PAULA, A. F., 2007. Biologia reprodutiva, crescimento e competição dos corais invasores *Tubastraea coccinea* e *Tubastraea tagusensis* (Scleractinia: Dendrophylliidae) com espécies nativas. 2007. 107 p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas - Zoologia) - Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DE PAULA, A.F., PIRES, D.O., CREED, J.C. 2014. Reproductive strategies of two invasive sun corals (*Tubastrea* spp.) in the southwestern Atlantic. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 94, 03, 481-494.

DE PAULA, A.F., CREED, J.C. 2005. Spatial distribution and abundance of nonindigenous coral genus *Tubastraea* (Cnidaria, Scleractinia) around Ilha Grande, Brazil. Brazilian Journal of Biology, 65(4): 661–673.

DIAS, F. J. S. Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações. São Paulo, 2011. Tese de doutorado.

DRAKE, James A.. Community-Assembly Mechanics and the Structure of an Experimental Species Ensemble. **The American Naturalist**, [S.L.], v. 137, n. 1, p. 1-26, jan. 1991. University of Chicago Press. <http://dx.doi.org/10.1086/285143>.

FENNER, D. 2001. Biogeography of three Caribbean corals (Scleractinia) and the invasion of *Tubastraea coccinea* into the Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, v. 69, n. 3, p. 1175–1189.

FERREIRA, C.E.L. 2003. Non-indigenous corals at marginal sites. *Coral Reefs*, 22(4), 498-498.

FERREIRA, C. E. L.; GONÇALVES, J. E. A.; COUTINHO, R. 2004 Cascos de navios e plataformas como vetores na introdução de espécies exóticas. In: SILVA, J. S.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da 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*, v. 1, n. 1, p. 15–28, 2005.

FREITAS, Pedro Paulo de. **MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA CIRCULAÇÃO SOBRE A PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ - BRASIL**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

GLYNN, P.W., COLLEY, S.B., MATE, J.L., CORTES, J., GUZMAN, H.H.M., BAILEY, R.L., FEINGOLD, J.S., ENOCHS, I.C. 2008. Reproductive ecology of azooxanthellate coral *Tubastrea coccinea* in equatorial eastern Pacific: Part V. *Dendrophylliidae*. *Marine Biology*, 153, 529-524.

GROSHOLZ, Edwin D.; RUIZ, Gregory M.. Predicting the impact of introduced marine species: lessons from the multiple invasions of the European green crab *Carcinus maenas*. **Biological Conservation**, [S.L.], v. 78, n. 1-2, p. 59-66, out. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0006-3207\(94\)00018-2](http://dx.doi.org/10.1016/0006-3207(94)00018-2). AYRE, D.J., RESING, J.M., 1986. Sexual and asexual production of planulae in reef corals. *Marine Biology* 90, 187-190.

GUIDONI, Noir Rocha. **MODELAGEM COMPUTACIONAL DA DISPERSÃO DE ESGOTOS SANITÁRIOS LANÇADOS NA BAÍA DE VITÓRIA - ES**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

GUIMARÃES, D.S.D. 2016. Malacofauna associada ao coral bioinvasor *Tubastraea tagusensis* Wells, 1982 (Scleractinia: Dendrophylliidae), na Baía de Todos-os-Santos, BA. Dissertação – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Biologia. Departamento de Zoologia. Programa de Pós-Graduação em Diversidade Animal. 92 pp.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis). Coral Sol (*Tubastraea* spp.) Plano Nacional de Prevenção, Controle e Monitoramento no Brasil. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/livros/planonacional_coralsol.pdf. 2020.

LAGES, B.G., FLEURY, B.G., REZENDE, C.M. PINTO, A.C., CREED, J.C. 2012. Proximity to competitors changes secondary metabolites of non-indigenous cup corals, *Tubastraea* spp., in the southwest Atlantic. *Marine Biology*, 159(7), 1551-1559.

LEE, Carol Eunmi. Evolutionary genetics of invasive species. **Trends In Ecology & Evolution**, [S.L.], v. 17, n. 8, p. 386-391, ago. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-5347\(02\)02554-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-5347(02)02554-5).

LEITÃO, Francisco Gustavo Viana. Estudo numérico da dispersão da pluma salina da planta de dessalinização de Fortaleza. 2019. 41 f. TCC-Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia), Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LESSER, G. R.; ROELVINK, J. A.; KESTER, J. A. T. M.; STELLING, G. S. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*. Vol. 51. P. 883-915, 2004.

MACDEONALD, I. A. W., LOOPE, M. B., and O. Hamann. 1989. Wildlife conservation and the invasion of nature reserves by introduced species: a global perspective [Chapter 9], in JA Drake and HA Mooney eds., *Biological invasions: a global perspective*. New York, John Wiley & Sons Ltd, SCOPE 37, p. 215-255.

MACHADO, Clara; OLIVEIRA, Liziane Paixão Silva; ARAÚJO JÚNIOR, Luíz Ricardo Santana de. A JUDICIALIZAÇÃO DA BIOINVASÃO POR ÁGUA DE LASTRO E POR BIOINCRUSTAÇÃO NO BRASIL: UMA RESPOSTA SUSTENTÁVEL AO COMBATE DA BIOINVASÃO? **Revista Argumentum**, Marília/Sp, v. 20, n. 3, p. 143-159, dez. 2019.

MAIA, L. P. (1998). Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE - Brasil): implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral. Tese de Doutorado . Universidade de Barcelona.

MANGELLI, T.S., CREED, J.C. 2012. Análise comparativa da abundância do coral invasor *Tubastraea* spp: (Cnidaria, Anthozoa) em substratos naturais e artificiais na Ilha Grande, Rio de Janeiro, Brasil. *Iheringia. Série Zoologia* 102, 122-130.

MANTELATTO, M. C. et al. 2011. Range expansion of the invasive corals *Tubastraea* *coccinea* and *Tubastraea* *tagusensis* in the Southwest Atlantic. *Coral Reefs*, v. 30, n. 2, p. 397–397.

MANTELATTO, M. C. 2012. Distribuição e abundância do coral invasor *Tubastraea* spp. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

MANTELATTO, M.C., CREED, J.C. 2014. Non-indigenous sun corals invade mussel beds in Brazil. *Marine Biodiversity*, p.1-2

MIRANDA, R.J. 2014. Efeitos do coral invasor *Tubastraea tagusensis* sobre corais nativos competidores e sobre a estrutura das assembleias bentônicas de um recife de coral tropical do Atlântico, In *Ecologia e Biomonitoramento*. p. 64. Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MIRANDA, R.J., CRUZ, I.C., BARROS, F. 2016. Effects of the alien coral *Tubastrea tagusensis* on native coral assemblages in a southwestern Atlantic coral reef. *Marine Biology*, 163(3), 1-12.

MIZRAHI et al. 2016. Possible interference competition involving established fish and a sun coral incursion. *Mar Biodiv* DOI 10.1007/s12526-016-0477-2.

MIZRAHI, D., NAVARRETE, S., FLORES, A.V. 2014. Groups travel further: pelagic metamorphosis and polyp clustering allow higher dispersal potential in sun coral propagules. *Coral Reefs*, 33, 443- 448.

MIZRAHI D, NAVARRETE S. A; FLORES .A.V. 2014. Uneven abundance of the invasive sun coral over habitat patches of different orientation: an outcome of larval or later benthic processes? *J Exp Mar Biol Ecol* 452:22–30. doi:10.1016/j.jembe.2013.11.013

NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL. Navy Operational Ocean Circulation and Tide Models. Department of Oceanography. Disponível em: <<http://www.oc.nps.edu/nom/modeling/index.html>>. Acesso em: 13 nov. 2018.

NEDERHOFF, K.; DONGEREN, A. V.; ORMONDT, M. V., Delft Dashboard: a MATLAB-based rapid tool for setting up coastal and estuarine models. *DELTA*RES v. 1201428-000, Holanda, 2016. 64 p.

NOGUEIRA NETO, Antonio Vasconcelos. **Variabilidade da Corrente Norte do Brasil associada aos padrões termohalinos na borda da Plataforma Continental Norte do Brasil**. 2013. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

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.

RUIZ, Gregory M.; CARLTON, James T.; GROSHOLZ, Edwin D.; HINES, Anson H.. Global Invasions of Marine and Estuarine Habitats by Non-Indigenous Species: mechanisms, extent, and consequences. **American Zoologist**, [S.L.], v. 37, n. 6, p. 621-632, dez. 1997. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/icb/37.6.621>.

SAMPAIO, C. L. S.; MIRANDA, R. J.; MAIA-NOGUEIRA, R.; NUNES, J. C. C. 2012. New occurrences of the nonindigenous Orange cup corals *Tubastrea coccinea* and *T. tagusensis* (Scleractinia: Dendrophylliidae) in Southwestern Atlantic. *Check List* 8, 528- 530.

SANTANA, Alice Mara Ferreira da Conceição. **MODELAGEM NUMÉRICA DA DISPERSÃO DE EFLUENTES DE CARCINICULTURA NO ESTUÁRIO DO RIO POTENGI - RN**. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SILVA, Gustavo Rodrigues. **CARACTERÍSTICAS DE VENTO DA REGIÃO NORDESTE**: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. 2003. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SILVEIRA, I. C. A. Contribuição ao estudo da circulação na troposfera oceânica: Região oeste do oceano Atlântico equatorial. 185p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

SOARES, Marcelo de Oliveira; DAVIS, Marcus; CARNEIRO, Pedro Bastos de Macêdo. Northward range expansion of the invasive coral (*Tubastrea tagusensis*) in the southwestern Atlantic. **Marine Biodiversity**, [S.L.], v. 48, n. 3, p. 1651-1654, 20 dez. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12526-016-0623-x>.

SOARES, Marcelo de Oliveira; SALANI, Sula; PAIVA, Sandra Vieira; BRAGA, Marcus Davis Andrade. Shipwrecks help invasive coral to expand range in the Atlantic Ocean. **Marine Pollution Bulletin**, [S.L.], v. 158, p. 111394, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111394>.

TEIXEIRA, Carlos E. P.; MACHADO, Gaia T.. On the temporal variability of the Sea Surface Temperature on the Tropical Southwest Atlantic Continental Shelf. **Journal Of Coastal Research**, [S.L.], v. 165, p. 2071-2076, 3 jan. 2013. Coastal Education and Research Foundation. <http://dx.doi.org/10.2112/si65-350.1>.

UVO, C.; BERNDTSSON, R. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in northeast Brazil. **Journal Of Geophysical Research: Atmospheres**, [S.L.], v. 101, n. 2, p. 4221-4233, 1 fev. 1996. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/95jd03235>.

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>.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. Disponível em:

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.

ZALBA, Sergio; ZILLER, Sílvia R.. Manejo adaptativo de espécies exóticas invasoras: colocando a teoria em prática. **Natureza & Conservação**, [s. l], v. 5, n. 2, p. 17-22, out. 2007. Acesso em: 02 ago. 2021.