



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

VITÓRIA VASCONCELOS DO NASCIMENTO

**MODELAGEM DO TRANSPORTE DE PROPÁGULOS DE MANGUE NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DO CEARÁ**

FORTALEZA
2023

VITÓRIA VASCONCELOS DO NASCIMENTO

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE PROPÁGULOS DE MANGUE NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, do Instituto de Ciências do Mar, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Oceanografia Física.

Orientador: Carlos Eduardo Peres Teixeira
Coorientador: Alexander Cesar Ferreira Roman

FORTALEZA
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

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

- N199 Nascimento, Vitória Vasconcelos do.
MODELAGEM DO TRANSPORTE DE PROPÁGULOS DE MANGUE NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DO CEARÁ / Vitória Vasconcelos do Nascimento. – 2023.
59 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
Coorientação: Prof. Dr. Alexander Cesar Ferreira Roman.

1. Modelagem numérica. 2. dispersão de propágulos. 3. manguezais. I. Título.

CDD 551.46

MODELAGEM DO TRANSPORTE DE PROPÁGULOS DE MANGUE NA PLATAFORMA
CONTINENTAL DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, do Instituto de Ciências do Mar, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Oceanografia Física.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Gbekpo Aubains Hounsou Gbo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A minha mãe Eneida e avó Teodora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao pai maior que aqui chamo Tupã, mãe Tamain e a toda encantaria sem a qual a sua força e sabedoria esse trabalho não existiria.

À minha família, meu pai Pedro, mãe Eneida, irmãos Thiago, Virgínia, Suzana, Abrãao por sempre me incentivarem ao conhecimento. Por me ensinarem o valor do trabalho, da persistência, do amor. A vocês dedico o melhor do que faço.

A FUNCAP pelo apoio através da bolsa de pesquisa.

Ao Professor Carlos por todos esses anos de idas e vindas de sua orientação, seu esforço e compreensão. Se hoje sou Oceanógrafa é também por sua dedicação ao ensino e pesquisa.

Ao professor Alex por me orientar e apontar o caminho na parte biológica do trabalho.

Aos colegas de laboratório, Rafael, Gustavo, Caio, Bárbara e Augusto por sempre estarem dispostos a ajudar quando precisei e por serem afago nas aflições inerentes a pesquisa.

Ao laboratório de Geologia Costeira e Gleidson que me forneceram os dados de batimetria da plataforma.

Ao PELD semiárido que me forneceu os dados de velocidade de corrente do estuário.

A todos os que não citei aqui, mas que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Quem nunca viu regar uma plantação
Há rios de suor neste nosso chão
Se a chuva não caiu do lado de cá
Regar com água do corpo e não esperar
Más há de vir tempo bom
Aliviando esta dor
Pois quem cultiva a esperança
Rega em seu peito uma flor
(Banda de Pau e Corda, Esperança)

RESUMO

O propágulo é a unidade de dispersão de mangue. Entender seu transporte pela circulação estuarina e da plataforma oferece subsídio para uma melhor gestão das áreas de manguezais através dos indícios de conectividade entre espécies de mangue. O presente estudo tem por objetivo investigar o transporte marinho dos propágulos oriundos do rio Pacoti (estado do Ceará) para áreas de manguezais a oeste. Nesse intuito, foi usado módulo FLOW do modelo numérico Delft3D para simular a circulação na plataforma e estuário. As trajetórias dos propágulos das espécies *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* e *Avicennia schaueriana*, descritas aqui como *Avicennia spp.* e *Laguncularia racemosa* foi simulado pelo módulo de partículas (PART). Comparados os dados de maré obtidos pelo modelo e coletados para validação para plataforma e estuário verificou-se que: para plataforma houve erro médio quadrático (RMSE) de 0.03 cm e skill de 0.99% para os dados de amplitude de maré. Entre os dados de componente de velocidade paralela à costa foi obtido RMSE com valor de 0.03 m/s e skill de 85%. Para o estuário do Rio Pacoti na comparação entre os dados de intensidade da corrente observado e modelados foi obtido RMSE de 0.29 m/s e skill de 81%. As trajetórias dos propágulos lançados dentro do estuário do Rio Pacoti mostraram que os mesmos demoram cerca de 15 dias para começar a sair da área de estudo, decaindo gradualmente a cerca de 0% em um mês de transporte. O transporte teve grande influência do vento no sentido de leste para oeste, de forma que o vento e também a orientação da costa foram determinantes para que os propágulos estivessem mais juntos ou afastados do litoral. Considerando o tempo de dispersão obrigatória e de flutuação para cada uma das espécies estudadas, *Laguncularia racemosa* seria uma espécie com trajetória restrita ao estado do Ceará sendo que *Avicennia spp.* e *Rhizophora mangle* podem ser espécies de dispersão para área externa do estado. Dentro da região de Fortaleza os propágulos apresentaram trajetórias condicionadas pelo padrão de vórtices gerados pelo cisalhamento da corrente geradas pelos espigões que lhes aprisionaram por mais tempo que em locais livres destas obras sendo, portanto, áreas de possível depósito de propágulos. De um modo geral a possibilidade de conexão entre os estuários do estado do Ceará através de propágulos oriundos do Rio Pacoti é condicionada pelas correntes, ventos e fisiografia da costa, sendo *Rhizophora mangle* a espécie com maior possibilidade de trocas para estuários externos pelas suas características de longevidade e estabelecimento.

Palavras chaves: Modelagem numérica, dispersão de propágulos, manguezais, *Rhizophora mangle*, costa do Ceará.

ABSTRACT

The propagule is the mangrove dispersal unit. Understanding their transport by estuarine and platform circulation rewards better management of mangrove areas through examples of connectivity between mangrove species in the state of Ceará. The present study aims to investigate the marine transport of propagules originating from the Pacoti River to mangrove areas to the west. In this sense, the FLOW module of the Delft3D numerical model was used to simulate the circulation on the shelf and estuary. The trajectories of the propagules of the species *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* and *Laguncularia racemosa* were simulated by the particle module (PART). When comparing the tidal data obtained by the model and collected for validation for the platform and the tolerated estuary, it was found that: for the platform, there was a mean squared error (RMSE) of 0.03 cm and a skill of 0.99% for the tidal amplitude data. Among the parallel-to-shore velocity component data, an RMSE was obtained with a value of 0.03 m/s and an ability of 85%. For the estuary of the Pacoti River, in the comparison between the observed and modeled current intensity data, an RMSE of 0.29 m/s and an ability of 81% were obtained. The trajectories of the propagules released into the Pacoti River estuary showed that they remained about 15 days previously to start leaving the study area and gradually decay to about 0% in one month of transport. The transport had a great influence of the wind, being verified from east to west, so that the orientation of the coast and the wind were decisive for the propagules to be closer together or farther from the coast. Considering the obligatory dispersion and fluctuation time for each of the observed species, *Laguncularia* is a species that would have a trajectory range restricted to the state of Ceará, and *Avicennia* and *Rhizophora* could be dispersed outside of the state. Within the Fortaleza region, the propagules followed trajectories conditioned by the pattern of vortices generated by the shear of the current generated by the spikes that trapped them for longer than in free sites, these works being, therefore, areas of possible deposit of propagules. In general, the possibility of connection between the estuaries through eastern propagules of the Pacoti River is conditioned by the currents, winds and physiography of the coast, and the species *Rhizophora mangle* has a greater possibility of exchanges to external estuaries due to the characteristics of survival and establishment of this species.

Keywords: Numerical modeling, propagule dispersion, mangroves, *Rhizophora mangle*, Ceará state coast.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Desenvolvimento do propágulo de Rhizophoraceae na planta mãe e durante a dispersão.....	5
Figura 2 - Desenvolvimento do propágulo de <i>Avicennia spp</i> .durante a dispersão.....	5
Figura 3 - Desenvolvimento dos propágulos de <i>Laguncularia racemosa</i> na planta mãe e durante a dispersão.....	6
Figura 4 - Distribuição geral do mangue. No painel superior a linha pontilhada delimita a presença latitudinal do mangue. No painel inferior está a distribuição de ambos hemisférios leste, oeste a cada 15°.....	8
Figura 5 - Área de estudo.....	11
Figura 6 - Grade do modelo Delft 3D FLOW.....	14
Figura 7 - Grade área de estudo para o estuário.....	15
Figura 8 - Grade área de estudo para a plataforma.....	15
Figura 9 - Rosa dos ventos para o mês de março de 2021.....	17
Figura 10 - Comparação entre a componente perpendicular à costa observada e de saída do modelo.....	22
Figura 11 - Comparação entre a componente paralela à costa observada e de saída do modelo.....	23
Figura 12 - Direção e magnitude média para a coluna da água das correntes para o ponto observado no período de 1 a 31 de março para as condições modeladas.....	24
Figura 13 - Direção e magnitude média para a coluna da água das correntes para o ponto observado no período de 1 a 31 de março para as condições observadas.....	24
Figura 14 - Comparação a componente paralela ao canal do estuário do modelo e observado.....	25
Figura 15 - Saída dos propágulos da área de estudo.....	27
Figura 16 - Trajetórias de todos os propágulos da espécie <i>Rhizophora mangle</i> lançados na área de estudo durante mês de maio.....	30
Figura 17 - Trajetórias de todos os propágulos da espécie <i>Avicennia spp</i> . lançados no Rio Pacoti e acompanhadas por 31 dias na área de estudo durante o mês de janeiro de 2021.....	31
Figura 18 - Trajetórias de todos os propágulos da espécie <i>Laguncularia racemosa</i> lançados no Rio Pacoti e acompanhadas por 31 dias na área de estudo durante o mês de janeiro de 2021.....	32

Figura 19 - Trajetórias de todos os propágulos da espécie <i>Laguncularia racemosa</i> lançados no Rio Pacoti e acompanhadas de 01 a 08 de janeiro durante o mês de janeiro de 2021.....	33
Figura 20 - Trajetórias de todos os propágulos da espécie <i>Laguncularia racemosa</i> lançados no Rio Pacoti e acompanhadas de 01 a 13 de janeiro durante o mês de janeiro de 2021.....	35
Figura 21 - Padrões de circulação observados próximo ao Porto do Mucuripe na máxima amplitude da maré de Sizígia.....	38
Figura 22 - Padrões de circulação observados próximo ao Porto do Mucuripe na mínima amplitude da maré Sizígia.....	39
Figura 23. Trajetória de três propágulos de <i>R. mangle</i> ao largo de Fortaleza.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns parâmetros usados no modelo.....	17
Tabela 2 - Períodos de simulação para a validação dos dados da plataforma e estuário.....	20
Tabela 3 - Massa, comprimento, mês médio de pico de produção de propágulos e período de flutuação das espécies estudadas.....	21
Tabela 4 - Comparação entre as componentes harmônicas de maré disponibilizadas pela FEMAR e as componentes de saída do modelo.....	22

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Manguezais no Brasil.....	7
1.2 Circulação na Plataforma Continental do Ceará.....	11
1.3 Transporte Marinho de Propágulos.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Geral.....	14
2.2. Específicos.....	14
3 METODOLOGIA.....	15
3.1 Área de Estudo.....	15
3.2. Modelagem Numérica.....	16
3.2.1 DELFT 3D Flow.....	20
3.2.2 Metodologia de Validação.....	20
4.3. DELFT 3D PART.....	20
3.3.1 Dispersão dos Propágulos no Rio Pacoti.....	20
4 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	22
4.1 Validação do Modelo hidrodinâmico.....	22
4.1.1 Plataforma.....	22
4.1.1.1. Marés.....	22
4.1.1.2. Correntes.....	23
4.1.2 Estuário.....	23
4.1.2.1. Correntes.....	26
4.2. Trajetória dos propágulos.....	28
4.2.1. Tempo dos propágulos na área de estudo.....	28
4.2.2. Trajetória das mil partículas na plataforma.....	30
4.2.3. Trajetórias de três propágulos de <i>R. mangle</i> no litoral de Fortaleza.....	37
5 CONCLUSÃO.....	44
6 REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A palavra mangue define árvores especializadas a habitarem áreas costeiras entremarés principalmente em estuários, onde há a inundação constante de suas raízes. Ela também pode ser usada para referir-se ao habitat em si, sendo por vezes melhor definida por ‘comunidade de mangue’. Com objetivo de elucidar os termos e seus usos, a palavra manguezal foi proposta para denominar o habitat, porém o termo mangue ainda é mais usado. Por habitar locais dinâmicos, o mangue desenvolveu diversas adaptações que incluem raízes aéreas, pneumatóforos, excreção do excesso de sal, propágulos vivíparos, dentre outras características que nem sempre são encontradas conjuntamente em todas as plantas de mangue (DUKE, 1994; TOMLINSON, 2016). O propágulo de mangue nada mais é que sua unidade de dispersão formada pela plântula já desenvolvida. Diferente das sementes terrestres, os propágulos não têm estado de dormência, já que após a formação do zigoto ele passa de embrião para a muda. Tal característica lhe possibilita uma maior capacidade de dispersão no ambiente marinho (TOMLINSON, 2016).

Globalmente o mangue é encontrado em áreas costeiras tropicais e subtropicais e possui maior extensão nas margens leste dos continentes, pois é nessas margens que as águas das correntes oceânicas superficiais são mais quentes. Latitudinalmente sua extensão pode ser delimitada pela isoterma de 20 °C no inverno em ambos os hemisférios (DUKE, 1994; TOMLINSON, 2016).

O habitat do mangue tem biodiversidade relativamente baixa quando comparado a outros ambientes como florestas tropicais e recifes de corais, exceto se considerada a sua microbiota; porém sua riqueza não é medida em número de espécies e sim nos inúmeros atributos que lhes permitem ocupar zonas entremarés e sobreviver a alta dinâmica do ambiente estuarino (DUKE, BALL, ELLISON, 1998).

Potter (2010) na iniciativa de ampliar o conceito de estuário para áreas fora de zonas temperadas, onde há maior bibliografia sobre o assunto, definiu estuário como:

É um corpo de água costeiro parcialmente fechado permanente ou periodicamente aberto ao mar e recebe pelo menos descargas periódicas de um ou mais rios. Sua salinidade é tipicamente menor que a da água do mar e varia temporalmente e ao longo de seu comprimento, podendo se tornar hipersalino em regiões onde a perda de água por evaporação é alta e as entradas de água doce e de maré são insignificantes.

Os padrões de circulação dentro do estuário são uma resposta a diversos fatores que regem sua dinâmica, incluindo marés, vazão fluvial, ventos, precipitação e evaporação. Estes fatores agem através da mistura vertical e horizontal, gerando gradientes de densidade decorrentes das trocas entre a água marinha e doce, que possuem temperatura e salinidade distintas. Portanto, a hidrodinâmica do estuário controla o transporte de materiais, sejam eles sedimentos, contaminantes, propágulos ou organismos sem movimento ativo (WOLANSKI, ELLIOTT, 2015).

Os propágulos de mangue são hidrocóricos, ou seja, se dispersam pela água. Eles possuem adaptações que lhes permitem flutuar na água salgada e doce até alcançarem locais propícios para estabelecimento (TOMLINSON, 2016). O estabelecimento de novas florestas de mangue depende de fatores bióticos e abióticos. Dentre os fatores abióticos estão a direção das correntes marinhas e estuarinas, vento, salinidade, disponibilidade de luz e tempo de alagamento pela maré (DUKE *et al.*, 1998). Entender como estes fatores agem, é fornecer recursos para a compreensão de como a floresta de mangue funciona enquanto unidade e se há conexões com os manguezais vizinhos. Tal conhecimento é subsídio para previsões de como estas relações se estabelecem e podem ser afetadas pelas modificações naturais e antrópicas em curso nestes ambientes, como a elevação do nível do mar por como consequência das mudanças climáticas (STOCKEN *et al.*, 2015).

No intuito de compreender a dispersão de propágulos de mangue, foram desenvolvidos trabalhos com diferentes técnicas como marcação e recaptura de propágulos (SOUSA *et al.*, 2007; STIEGLITZ, RIDD, 2001), uso de modelos numéricos para simulação de trajetórias (STOCKEN, MENEMENLIS, 2017; NITTO *et al.*, 2017) e ambientes controlados em laboratório (STOCKEN *et al.*, 2015; RABINOWITZ, 1978). Tais estudos pretendem compreender como a longevidade e estabelecimento podem ser afetados pelas correntes e/ou ventos considerando as características morfológicas de cada espécie. Estas metodologias são complementares e oferecem maior elucidação de como a dispersão acontece considerando a área estudada. Estudos de dispersão feitos em laboratório não abrangem fisiografia local, enquanto que estudos de marcação e recaptura dentro do mangue possuem dificuldade metodológica devido a recaptura dos propágulos, não sendo possível o entendimento de como as diversas variáveis ambientais atuam neste deslocamento. O uso de modelos numéricos surge como um auxiliar, pois é possível simular cenários de dispersão dos propágulos e fornecer uma alternativa econômica já que extensas áreas e suas condições de marés, ventos e correntes podem ser analisadas.

A modelagem de sistemas estuarinos e de plataforma requer resoluções que cubram seus processos hidrodinâmicos temporal e espacialmente. Para o estuário, devido sua menor área

é esperado que tenha uma maior resolução para resolver a circulação. Na plataforma devido sua extensa área, é preferível usar resoluções menores devido o gasto computacional e tempo para a simulação de suas condições. Para resolver estas diferenças, a alternativa é o uso de modelos acoplados que permite a junção de simulações entre dois ambientes que requeiram detalhamentos diferentes, sendo a sua junção usada no modelo de dispersão. É a primeira vez que o uso de modelos acoplados será usado para simular ambientes costeiros no estado do Ceará.

O mangue é um ecossistema caracterizado pela abundância de recursos que fornecem alimento e refúgio para diversas espécies de vida aquática como moluscos, crustáceos, aves e peixes. Ele também contribui para a estabilidade costeira fornecendo proteção à linha de costa. Nele muitas comunidades costeiras tradicionais encontram seu alimento cultural e material há milhares de anos (SPALDING et al., 1997). O Brasil está entre os países com maior área de mangue no mundo e foi somente em 15 de setembro de 1965 criada a Lei Federal N° 4771 que instituiu o mangue como área de preservação permanente (BRASIL, 1965). A constituição do Ceará de 1989, em seu capítulo II, artigo 23, define as áreas de manguezais como parte da área de praia, sendo proibido o uso que desnature suas características. O aumento populacional principalmente na zona costeira demanda uma maior ocupação de áreas para habitação ou produção de alimentos pela aquicultura e agricultura, construção de portos, *resorts* e descarte inadequado de resíduos sem nenhum gerenciamento, levando a destruição de extensas áreas (SPALDING et al., 1997). Outro fator de risco aos mangues são as mudanças climáticas que alteram seu ambiente químico, físico, biológico e geomorfológico (JENNERJAHN, T. C. et al., 2017).

O Rio Pacoti está localizado na região metropolitana de Fortaleza entre os municípios de Eusébio, Aquiraz e Fortaleza. Este é um ambiente múltiplo onde é necessária a promoção de estudos investigue seu funcionamento dentre as perturbações urbanas nas quais está inserido, assim como o grau de impacto. Para isto é necessário entender como a floresta de mangue funciona e parte disto é compreender como se dá a distribuição das áreas de bosque de mangue e se há conexão entre o rio Pacoti e as áreas vizinhas. Este estudo almeja investigar a dispersão de propágulos de mangue oriundos do Rio Pacoti na plataforma continental do Ceará através do uso de modelo numérico.

1.1 Manguezais no Brasil

Globalmente existem 28 gêneros e aproximadamente 70 espécies de mangue (DUKE, 1994). No Brasil os manguezais se estendem de uma ponta a outra da linha de costa, quase 92% de sua totalidade. Desde o extremo norte na cidade de Oiapoque, no Amapá, até o extremo sul na cidade de Laguna, em Santa Catarina. Estima-se que a área de mangue seja de 1,0 a 2,5 milhões de hectares (MAIA et al., 2006; MAIA, 2016).

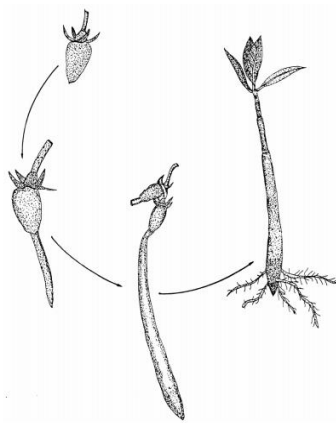
O manguezal é composto por diversas feições ao longo de sua extensão e são elas: lavado, bosque de mangue e apicum. O lavado são áreas que somente ficam emersas durante a maré de sizígia e que, portanto, permanecem mais tempo em contato com a água do estuário e costeiras, nele são onde crescem as gramas marinhas. O bosque de mangue também pode ser entendido como a segunda feição que adentra o estuário, é nele que estão as árvores de mangue. No Brasil estão presentes três gêneros de árvores de mangue: *Rhizophora*, *Laguncularia* e *Avicennia*. O apicum está em áreas mais elevadas e possui material mais arenoso que aquele encontrado no bosque de mangue. Ele é banhado pelas águas somente nas marés de sizíguas (FUMI, 2018). O gênero *Rhizophora* L. (espécies *R. mangle*, *R. harrisonii* e *R. racemosa*) geralmente é encontrado em solo pouco consolidado e possui raízes que se sobrepõem ao chão para aumentar sua área de sustentação (FUMI, 2018; MAIA, 2006). Geralmente se encontra em terrenos próximos à água do mar onde a salinidade lhe confere crescimento ideal (SCHAEFFER-NOVELLI, 1986). A espécie *Rhizophora mangle* pode chegar aos 19 m de altura, 30 cm de diâmetro e também é conhecida como mangue verdadeiro, mangue vermelho ou mangue-sapateiro (MAIA, 2006)). O gênero *Laguncularia* (monoespecífico, somente *L. racemosa*) também chamado de mangue branco, é encontrado no baixo e médio estuário, possui folha oval, pecíolo e nervura central avermelhados. Tem desenvolvimento melhor em áreas de baixa energia, salinidade reduzida ou água salobra. O gênero *Avicennia* L. (espécies *A. schaueriana* e *A. germinans*) é conhecido popularmente, entre outros nomes, como mangue preto e siriba. Se adapta bem a terrenos lamacentos e arenosos, suportando salinidade de 90 partes por mil (SCHAEFFER-NOVELLI, 1986).

As espécies acima descritas são consideradas verdadeiras, pois seguem os seguintes critérios: ocorrem somente no manguezal, não se estendendo às comunidades terrestres, possuem sementes vivíparas, adaptações morfológicas exclusivas, mecanismos para exclusão de sal e separação sistemática de seus parentes terrestres (TOMLINSON, 2016). A espécie *Conocarpus erectus* comum no manguezal do Nordeste, é também chamada de mangue de botão ou ratinho e

não é considerado mangue verdadeiro, pois tem menor tolerância à salinidade, e não possui propágulos vivíparos, nem hidrocóricos (MAIA et al., 2006; MAIA, 2016).

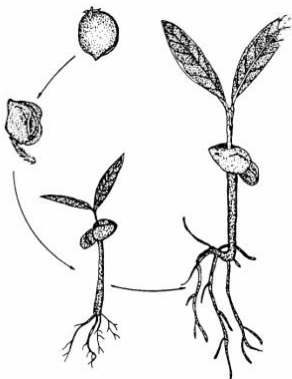
Os propágulos de *Avicennia sp.* são achatados e ovoides. Após se desprender da árvore mãe o pericarpo é perdido e os cotilédones surgem, permanecendo por vários meses (figura 2) (Rabinowitz,1978). Já os propágulos de *Rhizophora* possuem formato de lança e se estabelecem na horizontal tornando eretos posteriormente ou quando se posiciona verticalmente (figura 1) (Rabinowitz,1978). Os propágulos de *L. racemosa* são os menores entre as espécies abordadas neste estudo. Seu pericarpo é somente liberado quando o propágulo está estabelecido ou quase morto (figura 3) (Rabinowitz,1978).

Figura 1. Desenvolvimento do propágulo de Rhizophoraceae na planta mãe e durante a dispersão.



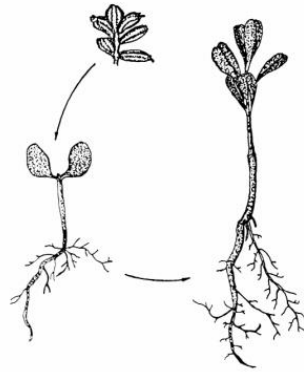
Fonte: SCHAEFFER-NOVELLI, 1986.

Figura 2. Desenvolvimento do propágulo de *Avicennia spp.* durante a dispersão.



Fonte: SCHAEFFER-NOVELLI, 1986

Figura 3. Desenvolvimento dos propágulos de *Laguncularia racemosa* na planta mãe e durante a dispersão.



Fonte: SCHAEFFER-NOVELLI, 1986

1.2 Circulação na plataforma continental do Ceará

Os processos costeiros possuem dinâmica impulsionada por agentes como ventos, ondas, correntes e marés, e, portanto, é necessário conhecê-los para compreender a dinâmica local e regional da área em estudo (MAIA, 1998).

O litoral cearense está incluso na costa Semiárida que é inicialmente delimitada pela Baía de São Marcos, MA, até o Cabo de Calcanhar, RN. A costa semiárida é caracterizada por clima seco, dunas móveis geradas por ventos de E-SE, falésias, lagunas e rios com pequeno aporte fluvial rodeados por florestas de mangue (MAIA, 1998).

O sistema climático regional da região costeira do estado do Ceará tem como principal sistema atmosférico a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT é a confluência dos ventos alísios de sudeste e nordeste que ascendem próximo a linha do Equador formando uma corrente de nebulosidade (FERREIRA, MELLO, 2005). O deslocamento meridional da ZCIT é um dos fatores de mudança sazonal do vento e das chuvas na margem equatorial da região Nordeste do Brasil. Ela passa da posição norte, limite de 14 ° N, entre agosto e outubro para posição mais ao sul, em torno de 2 a 4°S entre fevereiro e abril. Tal mudança é impulsionada pelas variações da Temperatura de Superfície do Mar (TSM) nas bacias norte e sul do Atlântico (FERREIRA, MELLO, 2005; MAIA, 1998). Outro fenômeno importante no montante de chuvas no Nordeste é o ENSO (El Niño Oscilação Sul). Ele consiste no aquecimento anômalo das águas do leste-centro do Pacífico próximo à costa do Equador. Este fenômeno causa uma inversão na célula de circulação atmosférica zonal, célula de Walker. Em condições normais a célula de Walker possui ramo

ascendente no pacífico ocidental e descendente no pacífico oriental. Em condições de El Niño a célula de Walker se inverte e passa a ter ramo descendente sobre o nordeste do Brasil impedindo a formação de nuvens e consequente chuva. Efeito contrário acontece quando há condições de La Niña, com o consequente resfriamento das águas centro-leste do Pacífico e condições de maior precipitação sobre o nordeste brasileiro.

A plataforma continental é o prolongamento submerso do continente. Geralmente possui declive suave até a sua ruptura. Na margem brasileira o limite externo da plataforma continental é na média definido pela isóbata de 130 m, enquanto que para o Ceará o valor muda para 70 metros (MAIA,1998). A largura para a Plataforma continental do Ceará é de 75 a 80 km ao largo de Fortaleza (DIAS, 2011).

A Corrente Norte do Brasil (CNB) compõe a principal corrente de circulação ao largo da plataforma continental da margem equatorial do Nordeste e possui velocidade média que varia de 50 a 80 cm-s-1 (DIAS, CASTRO, LACERDA, 2011).

Maia (1998) coletou com correntômetro valores de corrente nas isóbatas de 5 a 10 m ao largo da cidade de Fortaleza, as coletas foram realizadas durante o período chuvoso, março a maio e seco, setembro a novembro, ambos durante um ciclo completo de maré de quadratura. Os valores de corrente para a estação seca foram entre 0.22 a 0.68 m/s, enquanto que na chuvosa de 0.08 a 0.58 m/s. Houve boa correlação entre as correntes superficiais e o vento, resultado também obtido em estudos realizados por Miranda e Signorari (1985) e Dias, Castro, e Lacerda (2011). Estes últimos autores realizaram medições de corrente na isóbata de 30 m durante a estação chuvosa (14 de junho a 31 de julho ano 2009) próximo à saída do estuário do rio Jaguaribe. Os vetores de velocidade foram analisados em suas componentes longitudinal e transversal à costa. Na componente transversal os valores de corrente foram em superfície de -0,40 e 0,37 m/s com forte influência das oscilações de maré. Na componente longitudinal os valores de corrente foram de -0,32 e 0,31 m/s, com grande influência do vento local como forçante.

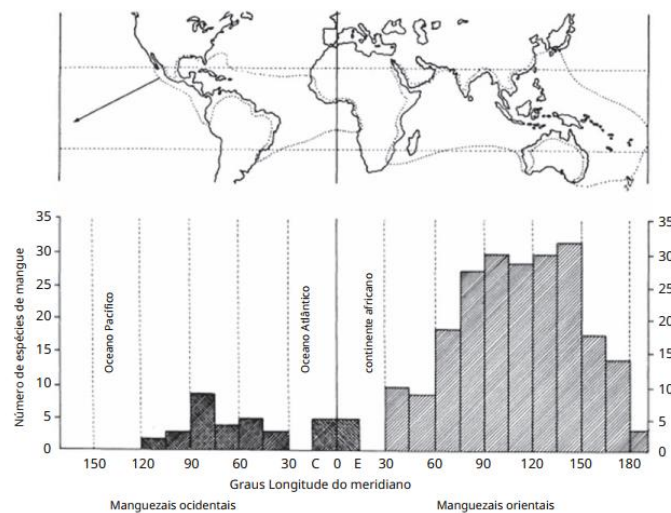
A maré é composta por diversas curvas sinusoidais de frequência determinada que somadas lhe dão origem. Cada uma destas oscilações sinusoidais são chamadas de componentes harmônicos (WOLANSKI, ELLIOTT, 2016). As componentes com período semidiurno, em torno de 12h, são M2, S2, N2 e K2. As que possuem período diurno, em torno de 24 horas são O1, P1, K1, Q1. Na plataforma continental do Ceará a maré é do tipo astronômica, já que grande parte de sua amplitude é regida pela força gravitacional da Lua e do Sol. Quanto à periodicidade de enchentes e vazantes, ela é classificada como semidiurna com dois picos de preamar e de baixamar durante um dia lunar, 24h e 50 min. As componentes harmônicas de maré com maior influência na amplitude de onda são S2, principal semidiurna solar, M2, principal semidiurna lunar,

a componente N2 elíptica lunar , O1, componente lunar diurna principal e K1, componente principal lunar e solar. Seu regime é de mesomaré com amplitudes que variam de 2 m a -2 m (MAIA, 1998; SOARES, 2013).

1.3 Transporte Marinho de Propágulos

Atualmente a distribuição de manguezais no mundo é dividida em dois centros: oriental e ocidental. No centro oriental há 40 espécies verdadeiras, enquanto que no ocidental este número é 5 vezes menor com 8 espécies verdadeiras. Os gêneros *Avicennia* e *Rhizophora* são pantropicais, porém as espécies entre os centros são distintas. *Rhizophora mangle*, presente no centro ocidental, é considerada espécie irmã de *R. samoensis*, presente no centro oriental, o que revela a disparidade entre as espécies presentes entre estes dois grupos (TOMLINSON, 2016). Na figura 4 é possível ver os limites de distribuição destes centros.

Figura 4. Distribuição geral do mangue. No painel superior a linha pontilhada delimita a presença latitudinal do mangue. No painel inferior está a distribuição de ambos hemisférios leste, oeste a cada 15°.



Fonte: Tomlinson, 2016.

Esta diferença distribucional é explicada pela dispersão dos mangues de sua área de origem no início do Cretáceo. Nesse período, as massas de terra ao norte correspondiam a Laurásia e ao sul Gondwana e entre elas estava o mar de Tétis. Acredita-se que o centro de origem dos manguezais estava ao sul da Laurásia na área hoje correspondente à região indo-malaia. Atualmente esta região possui a maior concentração de espécies que pode ser explicada pela

permanência de condições climáticas adequadas para a existência de mangues. Deste centro houve migração dos propágulos que acompanharam os movimentos tectônicos de abertura para o oceano Atlântico e posteriormente para o pacífico leste através do transporte marinho (TOMLINSON, 2016).

As distribuições atuais das florestas de mangue são um resultado de um conjunto de fatores ambientais que influenciam a riqueza das espécies a nível global, regional, estuarino e entremarés. As correntes marinhas e estuarinas possuem grande influência no transporte dos propágulos, porém as características interespecíficas de cada espécie como longevidade, requisitos para estabelecimento e condições externas como predação são condições que explicam as diferentes configurações da floresta em sítios/zonas diferentes em ambientes geográficos diversos (DUKE, BALL, ELLISON, 1998). Dos fatores que influenciam a riqueza de espécies a nível global têm-se: temperatura, correntes, clima e habitat adequados, dispersão e estabelecimento de propágulos. A nível regional os fatores são: capacidade de dispersão, correntes, temperatura, chuva, área de aprisionamento e marés. A nível local ou estuarino: salinidade ao longo do estuário, gradientes entremarés, fauna associada, dispersão, estabelecimento e competição por luz (DUKE, BALL, ELLISON, 1998).

O presente estudo pretende investigar processos dispersivos das comunidades de mangue para compreender a dinâmica das suas populações na costa do Ceará. Este conhecimento é imprescindível para entender a conectividade entre áreas vizinhas e guiar as tomadas de decisões acerca da riqueza biológica presente na região costeira. Buscando compreender como os fatores físicos que geram a circulação, transportam os propágulos de mangue.

Na perspectiva das mudanças nos padrões de vento e correntes pela mudança climática, os dados apresentados são importantes para compreender mudanças nos padrões de estabelecimento e desenvolvimento das florestas de mangue na costa semi-árida do Estado do Ceará.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o transporte marinho dos propágulos de mangue que saem do Rio Pacoti como uma possibilidade de conexão com os manguezais que estão a oeste dele.

2.2 Específicos

- Implementar o modelo hidrodinâmico Delft 3D FLOW para o estuário do Rio Pacoti e zona costeira do Ceará.
- Implementar a simulação de dispersão de propágulos através do modelo DELFT 3D PART de forma acoplada entre estuário e zona costeira.
- Investigar os resultados de trajetórias obtidas no modelo DELFT 3D na plataforma e a possibilidade de conexão em estuários a oeste do Rio Pacoti.

3 METODOLOGIA

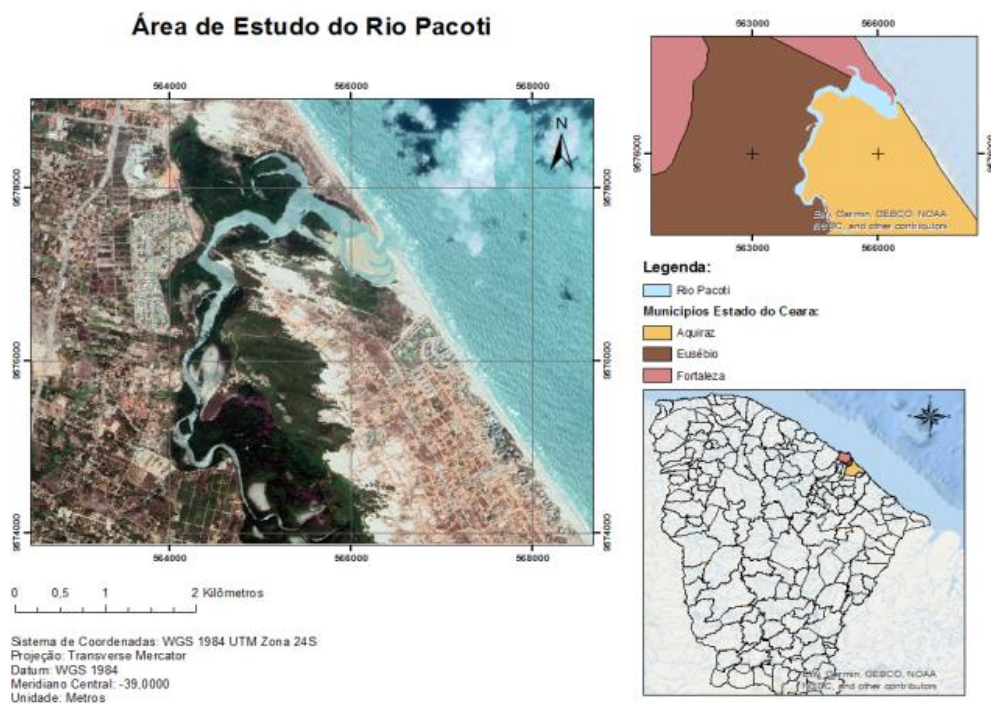
A seguir estão elencados e descritos cada uma das ferramentas e métodos que serão usados para alcançar o objetivo do estudo aqui proposto.

3.1 Área de estudo

A área de estudo do Rio Pacoti fica localizada entre os municípios de Fortaleza, Aquiraz e Eusébio (figura 5). O Rio Pacoti tem nascente na serra de Baturité em uma altitude de cerca de 850 metros e percorre cerca de 150 km até sua desembocadura no mar.

Dado a sua importância ecológica, em 15/02/2000 foi criada a Área de Proteção Ambiental do Rio Pacoti pelo Decreto Estadual n.º25.778 que visa a preservação do ecossistema costeiro presente na sua foz (MAIA, 2016).

Figura 5. Área de estudo.



Fonte: a autora.

A vegetação predominante às margens do estuário é o mangue. Ele se prolonga a cerca de 15 km da foz em direção ao interior do continente e ocupa uma área de 158 ha (BARRA, 2014). De acordo com Miranda, França e Coutinho (1994 apud Bezerra, 2003) as espécies de mangue presente no estuário do Rio Pacoti são as seguintes: *Rhizophora mangle* (mangue vermelho), *Laguncularia racemosa* (mangue branco), *Avicennia schaueriana*, *Avicennia germinans* (mangue preto) e mangue não verdadeiro *Conocarpus erectus* (mangue de botão).

Com relação ao regime pluvial, a estação chuvosa ocorre entre os meses de janeiro a junho com média mensal de precipitação de 236,4 mm. As maiores precipitações ocorrem de fevereiro à maio. O período seco ocorre nos meses de julho a dezembro com média de precipitação de apenas 37,4 mm. Na estação chuvosa a média de temperatura é 26,67 ° C e na seca 26,65°C, caracterizando a região como clima tropical (BEZERRA, 2003).

O Rio Pacoti possui estuário raso e curto (comprimento de 15 km), dominado por marés em regime de mesomarés. A área de mangue possui cerca de 4.5 km² e bacia de drenagem de 1200 km². Salinidade e temperatura possuem distribuições homogêneas com valor de salinidade de 37 g/kg da foz até cerca de 5 km adentrando o estuário, já a temperatura média é de 28°C. Para corrente foram obtidos valores médios de 0.9 m/s para vazante e 0.58m/s para enchente. Estes valores foram medidos em pontos coletados por Schettini et al. (2017) durante 13 horas, em 7 de novembro de 2010.

Freire e Maia (1991) realizaram estudo hidrodinâmico no estuário do rio Pacoti nos anos de 1986 a 1987. Foi identificada influência sazonal na amplitude de maré pela descarga fluvial, ventos e pressão atmosférica, sendo encontrado valor médio de amplitude 1,9 m para o período. Durante o período chuvoso, as águas fluviais possuem predominância com entrada de volume de cerca de cerca de 12×10^5 m³. No período de estiagem o estuário funciona como um braço de maré com introdução de cerca de 1.65×10^5 m³ de água marinha. Há predominância do fluxo de vazante durante o período chuvoso e presença de fraca correntes contrárias nas direções norte-oeste e sul-sudoeste até local onde estas se anulam (ponto nodal). O ponto nodal varia de posição de acordo com a amplitude e vazão. Durante a estação seca as correntes de norte-oeste predominam durante a preamar e as sul-sudoeste estão presentes somente nas marés de Sizígia. Dados de vazão para o rio Pacoti são escassos, há somente estimativas realizadas por Molisani et al. (2006) que obteve valor de 19 m³/s para o período chuvoso e 1 m³/s para o período seco.

3.2. Modelagem Numérica

O modelo pode ser resumido como a representação de relações que são observadas qualitativamente e quantitativamente em um determinado espaço. Estas relações podem ser representadas por um modelo matemático através de equações. A modelagem numérica é uma das opções de resolução do modelo matemático através do auxílio computacional (ROSMAN, 2021). Em Oceanografia os modelos numéricos são usados para representar e prever condições de circulação, por exemplo. Modelos hidrodinâmicos simulam o estado do nível do mar, propriedades físico-químicas e correntes que servem de suporte para a elaboração de simulações neste ambiente (HARARI, 2015).

Neste estudo a modelagem numérica será realizada com o modelo DELFT 3D que foi desenvolvido pelo Instituto Deltares na Holanda e possui módulos com interface gráfica e ferramentas para pré e pós-processamento. Ele foi desenvolvido para ambientes costeiros, entre os quais lagunas, rios e áreas estuarinas. Os cenários por ele trabalhados resolvem ambientes dividindo a coluna da água em várias camadas verticais (3D) ou em uma camada (2D), esta última usada neste trabalho.

O modelo DELFT 3D possui diversos módulos direcionados para diferentes objetivos. Neste estudo será usado o módulo hidrodinâmico (FLOW) e de partículas (PART).

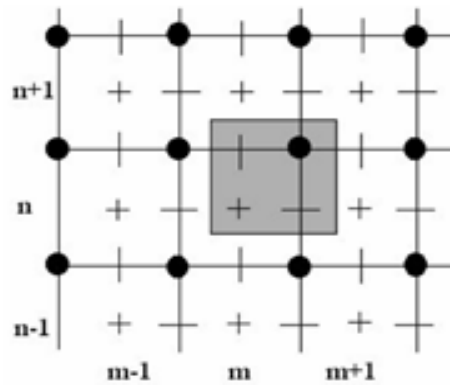
3.2.1. DELFT 3D Flow

Este módulo simula condições de direção, intensidade de correntes e elevação do nível do mar. Estas condições se desenvolvem a partir de forçantes que são inseridas como descarga fluvial, maré e velocidade do vento. A delimitação da área estudada é feita através de pontos, ou seja, discretizada e o conjunto destes pontos neste espaço é chamado de malha ou grade (Figura 6) (FORTUNA, 2000). Neste trabalho a grade usada compreende 379 km do litoral e se estende desde o extremo oeste do litoral cearense na praia de Bitupitá (Município de Barroquinha), até a praia do Iguape, município de Aquiraz, no extremo leste da grade. O segmento compreende a entrada dos estuários dos Remédios, Rio Coreaú, Guriú, Acaraú, Aracati-mirim, Aracati-açu, Mundaú, Curu, Ceará, Cocó e Pacoti.

O modelo hidrodinâmico será a base do estudo de dispersão, já que para prever com maior fidelidade a direção dos propágulos a circulação estuarina e da plataforma devem corresponder ao que é esperado para a região. Para a construção da simulação hidrodinâmica na

área estudada foram inseridos dados de coleta de batimetria, vento, componentes harmônicas e corrente. As fronteiras que delimitam a área de estudo são de contorno fechado (limite com a massa de terra) e abertos (limites água-água) e devem ser iniciadas dentro do modelo no começo da simulação hidrodinâmica (ROSMAN,2021). Neste intuito a parte do mar externa a área de estudo, chamadas de fronteiras abertas, são forçadas por componentes harmônicos de maré obtidos pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR) para simular a entrada das ondas de maré dentro da área de estudo na partida inicial do modelo.

Figura 6 grade do modelo Delft 3D FLOW.



Fonte:Deltares (2017).

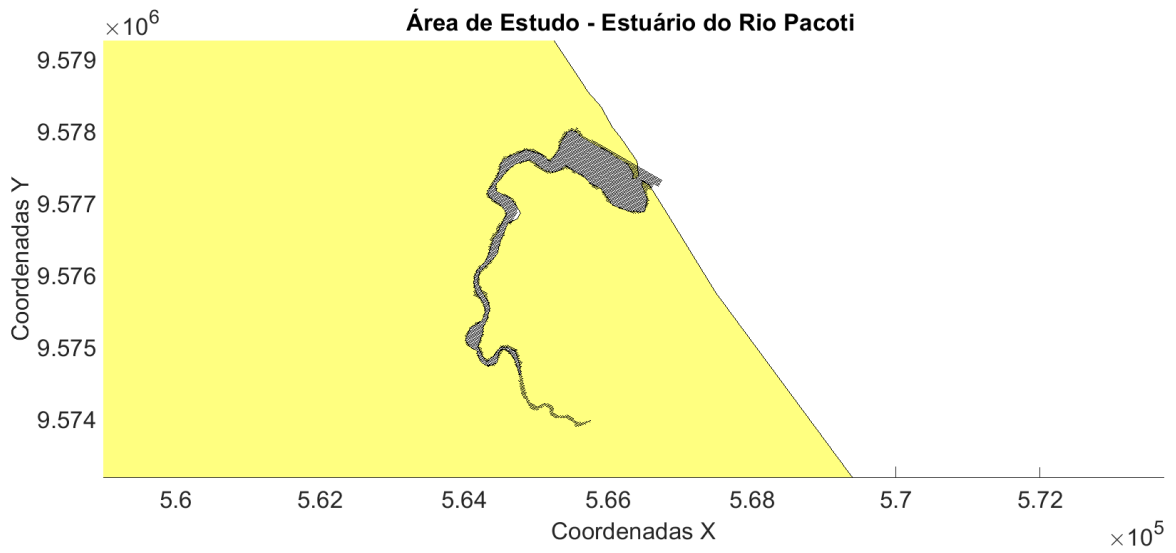
Cada um dos quadrados dentro da grade são células onde:

- + nível da água, salinidade, temperatura.
- velocidade horizontal na direção m.
- | velocidade horizontal na direção n.

No Delft 3D a resolução é dada como a raiz quadrada da área de um elemento da grade. Para a plataforma a resolução mínima de 162 m e máxima de 825 m. A grade do estuário possui resolução mínima de 11 m e máxima de 23 m (figura 7 e 8).

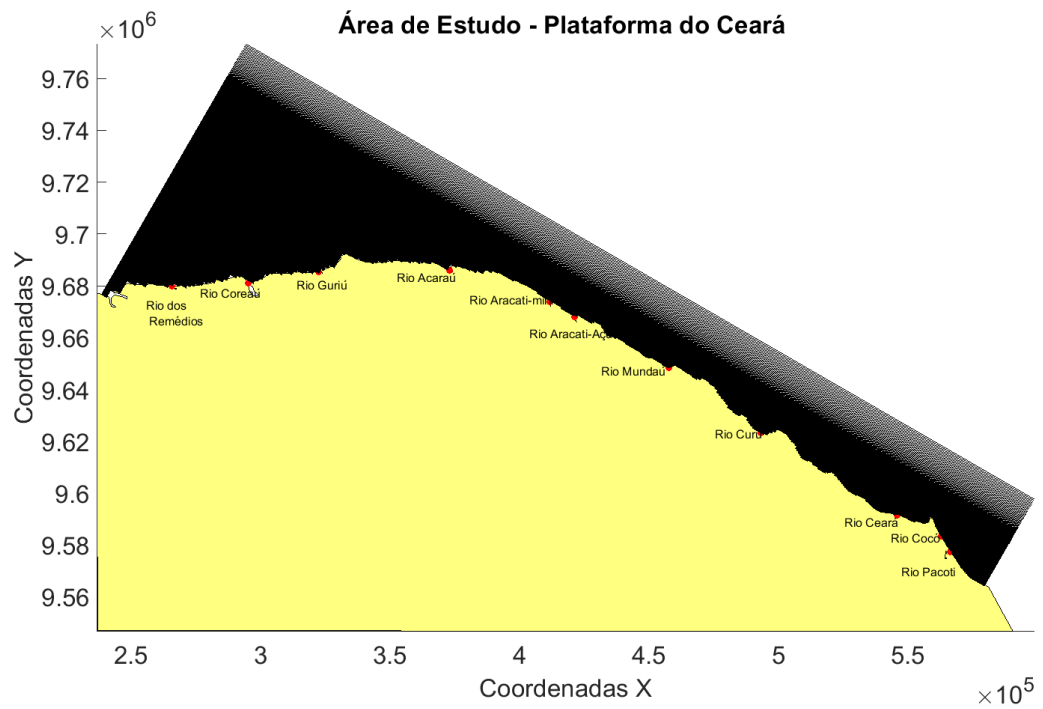
Optou-se por uma maior resolução dentro da área do estuário onde é necessário maior detalhamento da grade para resolução dos processos hidrodinâmicos (figura 7).

Figura 7. Grade área de estudo para o estuário.



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 8. Grade área de estudo para a plataforma.

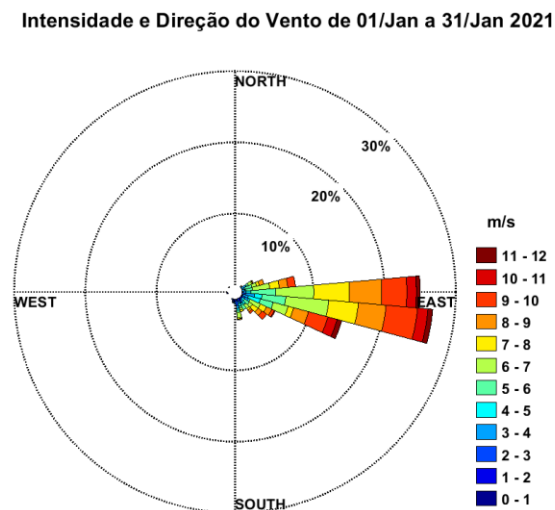


Fonte: Dados da pesquisa.

A batimetria que será utilizada nas simulações para a área do rio Pacoti foi concedida pelo Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO) da Universidade Estadual do Ceará (UECE) obtidas em 2010 por GPS náutico 521 S Garmin acoplado a ecossonda. A batimetria para a plataforma foi concedida pelo laboratório de dinâmica costeira da Universidade Federal do Ceará (UFC).

As séries de vento usadas para o forçamento do modelo em superfície foram obtidas através do banco de dados meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados são da estação Fortaleza que possui longitude de $-38,53777777$, latitude de $-3,81583333$ e altitude de 29,55 m. As séries de vento usadas possuem período de acordo com os dados disponíveis para validação do modelo hidrodinâmico do estuário (Abril de 2022) e plataforma (Março de 2021) e do período simulado para a dispersão dos propágulos (Janeiro de 2021) (figura 9). No modelo os dados são variantes no tempo e uniformes no espaço. Os dados de ventos foram convertidos para 10 m acima do nível do mar através do modelo SisBAHIA.

Figura 9. Rosa dos ventos para o mês de março de 2021.



Fonte: Dados da pesquisa.

A descarga fluvial estuarina usada possui valor médio de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondendo a estação chuvosa (MOLISANI, 2005).

Tabela 1. Alguns parâmetros usados no modelo.

Parâmetro	Valor
Passo de tempo	0.05 min
Fuso horário	-3
Gravidade	9.8 m/s ²
Densidade	1023 kg/m ³
Coefficiente Manning de fricção do fundo.	0.02

Fonte: dados da pesquisa.

3.2.2 Método de Validação

Qualquer modelo proposto para solucionar um problema precisa ser validado através da comparação entre os dados medidos em campo e aqueles obtidos pelo modelo. O modelo hidrodinâmico é a base onde as trajetórias de propágulos são simuladas. Portanto, é necessário validar a maré e as correntes do estuário do Rio Pacoti e da plataforma. Para validação da maré será usado dados das componentes harmônicas da maré fornecidas para o Porto do Mucuripe pela Fundação de Estudos do Mar (FEMAR). Os valores de corrente simulados para o estuário pelo modelo serão validados por dados coletados por um ADCP (do inglês, *Acoustic Doppler current profile*) de duração de 6h coletados por fundeio no dia 25 de abril de 2022. Já os dados de corrente simulados para a plataforma serão validados por medições de ADCP de campanha realizada no contexto de caracterização das condições oceanográficas da Praia do Futuro financiados pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE). Esses dados de corrente foram coletados durante o mês de março de 2021 através de ADCP fundeado a 2 km da costa e a 15 m de profundidade na localização de 3°41'328"S e 38°27.319'W.

Serão construídas duas simulações hidrodinâmicas correspondentes às datas de correntes in situ disponíveis para validação do estuário e da plataforma (Tabela 2).

Tabela 2. Períodos de simulação para a validação dos dados da plataforma e estuário.

Dados	Data do dado Observado	Período de Simulação
Corrente para a plataforma	Março de 2021	Março de 2021
Corrente para o Estuário	25 de abril de 2022	Abril de 2021

Fonte: Dados da Pesquisa.

Os pontos de observações dentro do modelo onde serão retirados os dados de velocidade de corrente para o estuário e plataforma terão a mesma localização que aquela dos dados de corrente coletados em campo para cada um dos ambientes simulados.

A habilidade de predição do modelo comparado aos dados observados para a maré e corrente serão avaliados através da **raiz do erro quadrático médio (RMSE em inglês)** e do **parâmetro Skill**, equação 1 e equação 2, respectivamente.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2.$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

Equação 1. Fonte: Wilks (2019)

Onde y_k é o i -ésimo dado observado e o_k é o par correspondente do valor previsto pelo modelo. N corresponde a quantidade de dados disponíveis para as comparações entre o modelo e o observado. Portanto quanto maiores forem as discrepâncias entre os valores medidos e os simulados pelo modelo, maior será a RMSE, desta forma do contrário a RMSE será próximo a zero.

O parâmetro skill proposto por Wilmott (1981) e adaptado por Warner et al. (2005), tem valor 1 quando há completa concordância entre os dados simulados pelo modelo e os dados observados e zero para completa discordância (Equação 2).

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

Equação 2. Fonte: Warner(2005).

Onde:

X_{model} valores de saída do modelo

X_{obs} valores observados

\bar{X}_{model} média dos valores observados

Os valores de skill são classificados em excelente quando >0.65 , entre 0.5-0.65 como muito bom, 0.2-0.5 como bom e <0.2 como ruim (ALLEN et al., 2007).

3.3 DELFT 3D PART

O módulo PART estuda o rastreamento de partículas conservativas ou não em áreas bidimensionais ou tridimensionais. Usa como base para os fluxos os dados de saída do modelo FLOW, em simulações bidimensionais as velocidades são tomadas como médias da coluna da água que é o caso do presente estudo. Neste módulo a substância simulada será conservativa, portanto ao ser lançada no ambiente de estudo ela permanece com a mesma massa do início ao final da simulação dentro do modelo, sem trapeamento ao tocar a costa ou margens do estuário.

No módulo PART é especificado o número de partículas a serem lançadas e o total em kg de todas elas. Por exemplo, se lançar 500 partículas cada uma de 5 g a massa total disponível dentro do modelo será de 2,5 kg. A apresentação da localização da partícula pode ser dada pela concentração em massa dentro da célula dentro da grade ou através do caminho que cada partícula individual faz dentro do modelo ao longo do tempo estudado.

O número de partículas a ser liberado dentro de uma simulação está condicionado à concentração de menor precisão que o modelo é capaz de gerar considerando a maior resolução da grade e a profundidade correspondente (Equação 3).

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

Equação 3. Fonte: Deltares(2023)

Onde :

C_{\min} : concentração mínima das partículas a serem simuladas.

M_{particle} : massa individual da partícula (kg)

A_{cell} : área superficial da menor célula computacional da grade de estudo

H_{layer} : profundidade correspondente a A cell.

M_{total} : massa total do lançamento

N_{total} : número total de partículas no lançamento.

As condições que serão estudadas com objetivo de ser realizada previsão ou simulação do funcionamento do ambiente em determinada condição são chamadas de cenários. Neste trabalho serão desenvolvidos 3 cenários correspondente a dispersão de cada uma das espécies e em cada um deles serão lançados mil propágulos com a massa correspondente para cada espécie de acordo com a tabela 2. A liberação dos propágulos será na área mais a montante do estuário simulada nos cenários. A duração de cada um desses cenários será correspondente ao período de flutuação de cada uma das espécies estudadas ou até que os propágulos saiam da área em estudo.

Os pontos de lançamento dos propágulos foram no limite superior da grade do estuário no modelo para *Avicennia spp.* e *Laguncularia racemosa* visto que ambas são encontradas no alto e médio estuário. O ponto de liberação de *R. mangle* foi próximo a desembocadura, já que esta espécie é encontrada no baixo estuário.

Tendo em concordância os dados de maré e corrente entre o período simulado e dados observados, será realizada a construção dos cenários. Para a trajetória dos propágulos iniciou-se os cenários para o mês de janeiro de 2021, já que é um mês de intersecção entre os picos de produção de propágulos para as espécies *R. mangle* e *Avicennia spp.*. Levando em conta o esforço computacional e como Janeiro é um mês do período chuvoso e a produção de propágulos é neste período, este mês também foi usado para simular os propágulos de *L. racemosa*, mesmo que este não seja seu mês de produção máxima.

Tabela 3. Massa, comprimento, mês médio de pico de produção de propágulos e período de flutuação das espécies estudadas.

Espécie	Massa (g)	Comprimento (cm)	Mês médio de pico de produção de propágulos	Período de flutuação (dias)
<i>Laguncularia Racemosa</i>	0.41 ± 0.02	2.19 ± 0.05	Maio	31
<i>Avicennia spp.</i>	1.10 ± 0.11	1.83 ± 0.05	Janeiro	90
<i>Rhizophora mangle</i>	14.0 ± 1.1	22.1 ± 1.0	Janeiro	180

Fonte: Rabinowitz(1978) e Nadia(2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Validação modelo hidrodinâmico

4.1.1. Marés

Os resultados obtidos através do modelo para a variação do nível de maré corresponderam ao esperado para a região na data estudada (Tabela 3). Os valores calculados pelo modelo DELFT 3D apresentaram boa correspondência com as componentes de maré obtidas pela do FEMAR através do marégrafo do Porto Mucuripe. O maior erro de amplitude e fase foram obtidos para a componente K1 com valores respectivamente de 7.79% e 1.22%. A componente K1, não apresenta grande influência na variação total da maré para a região estudada, diferente das componentes S2 e M2 que corresponde a sua quase totalidade. Foi obtido RMSE de 0.03 cm e parâmetro Skill de 0.99% sendo a qualidade do dado modelo em relação ao observado excelente. Filho (2019) fez uso do modelo Delft 3d para simular a circulação da plataforma entre junho de 2011 e junho de 2012. Para a maré foi encontrado diferença de 5,59% para a amplitude e 3.78 de fase para maré entre os dados simulados e observados. Já o RMSE foi de 0.12 cm e skill de 0.98 corroborando com a confiabilidade do modelo Delft 3D em simular a maré para a plataforma do Ceará.

Tabela 4. Comparação entres as componentes harmônicas de maré disponibilizadas pela FEMAR e as componentes de saída do modelo.

Componentes	Amplitude observada (cm)	Amplitude modelo (cm)	Erro amplitude (%)	Fase observado (graus)	Fase modelo (graus)	Erro de fase (%)
M2	96.2	99.53	3.46	132	132.46	0.35
S2	31	32.41	4.55	151	151.92	0.61
N2	19.5	19.95	2.31	115	113.79	1.05
K1	7.7	7.1	7.79	211	213.57	1.22
O1	7.3	7.48	2.47	186	184.59	0.76

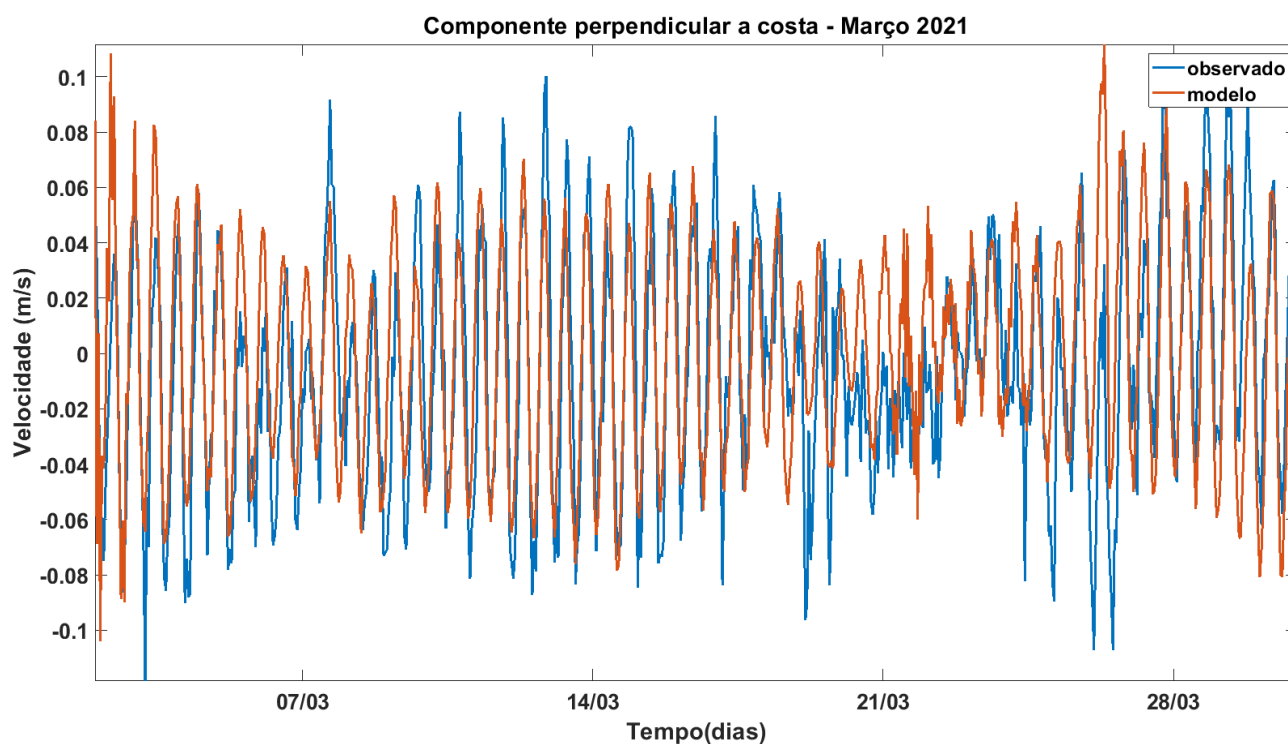
Fonte: Dados da pesquisa.

4.1.2. Correntes

4.1.2.1 Plataforma

Os dados de velocidade média das correntes para a coluna da água obtidos através do modelo e dados observados foram decompostos em componentes perpendiculares e paralela à costa. Os valores de velocidade da componente perpendicular à costa possuem maior influência da maré (Figura 10). Isto pode ser observado nos menores valores de amplitude das correntes, correspondente às marés de quadratura e maiores amplitudes presentes em marés de sizígia, tanto nos dados observados quanto nos modelados. De maneira geral os valores calculados pelo modelo Delft 3D para a componente perpendicular apresentaram velocidades maiores para a amplitude durante as marés de quadratura e subestimaram os valores de velocidade durante as marés de sizígia, se comparado aos valores observados (Figura 10). Foi obtido RMSE com valor de 0.03 m/s e skill de 85%, considerado excelente.

Figura 10. Comparação entre a componente perpendicular à costa observada e de saída do modelo.



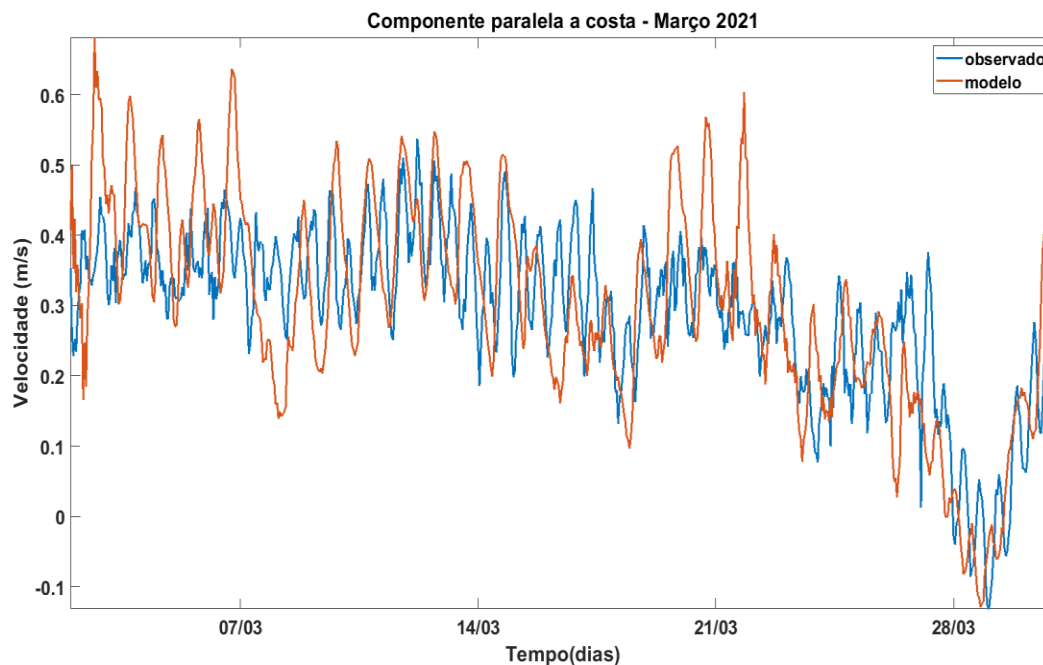
Fonte: Dados da pesquisa.

Para a componente paralela (Figura 11) à costa o RMSE obtido foi no valor de 0.13 m/s e skill de 74%, também considerado excelente.

Os padrões encontrados para as componentes perpendicular e paralela à costa estão de acordo com os estudos mostrados por Soares e Castro para a plataforma do estado do Ceará (1996) no qual os valores de velocidades paralelo à costa possuem forte relação com a intensidade do

vento, enquanto que a componente perpendicular possui valores de velocidades explicados pela oscilação da maré.

Figura 11. Comparação entre a componente paralela à costa observada e de saída do modelo.



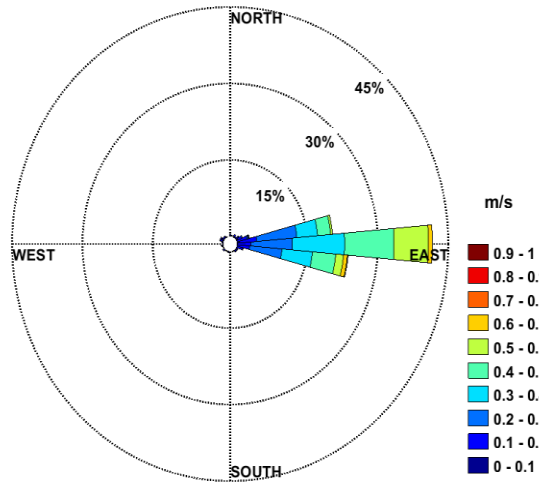
Fonte: dados da pesquisa.

Nas figuras 12 e 13 a seguir estão apresentadas as direções e intensidades das correntes em rosa dos ventos para as saídas do modelo e condições observadas, respectivamente. Tais correntes possuem direção predominante oriunda de leste para oeste. Tais resultados corroboram com as direções de corrente obtidas por Maia (1998) e Filho (2019) usando o modelo Delft3D para esta região.

As direções de correntes são semelhantes para ambos os resultados o que pode ser consequência da qualidade dos dados batimétricos obtidos para a região onde foi colocado o ponto de observação das correntes do modelo que foi o mesmo onde o ADCP da CAGECE coletou os dados observados. As magnitudes das médias de velocidade simuladas e observadas estão majoritariamente em ambos os dados entre 0,4 m/s a 0,6 m/s (figura 12 e 13). A velocidade média das magnitudes do modelo tiveram limites máximos de 1 m/s que pode ser explicado pela acomodação do modelo nos dias iniciais de simulação. Valores mais uniformes da magnitude de velocidade simuladas em relação a observada podem ser explicadas pelos dados de ventos horários e uniformes no espaço que foram inseridos no modelo e, portanto, não adicionavam velocidades por atrito na superfície da água com a variação no tempo e espaço que é esperada em condições reais. De forma geral, os dados de corrente modelados tiveram boa representação das condições de direção e velocidade da plataforma.

Figura 12. Direção e magnitude média para a coluna da água das correntes para o ponto observado no período de 1 a 31 de março para as condições modeladas.

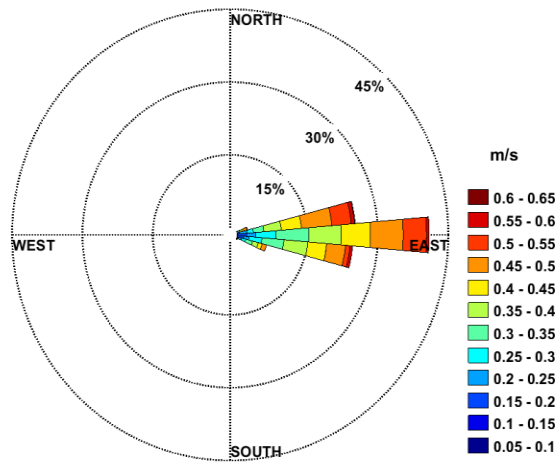
**Direções e Mágnitudes Médias das Correntes para a Coluna da Água - Modelo (m/s)
Março de 2021**



Fonte: dados da pesquisa.

Figura 13. Direção e magnitude média para a coluna da água das correntes para o ponto observado no período de 1 a 31 de março para as condições observadas.

**Direções e Mágnitudes Médias das Correntes para a Coluna da água - Observado (m/s)
Março de 2021**

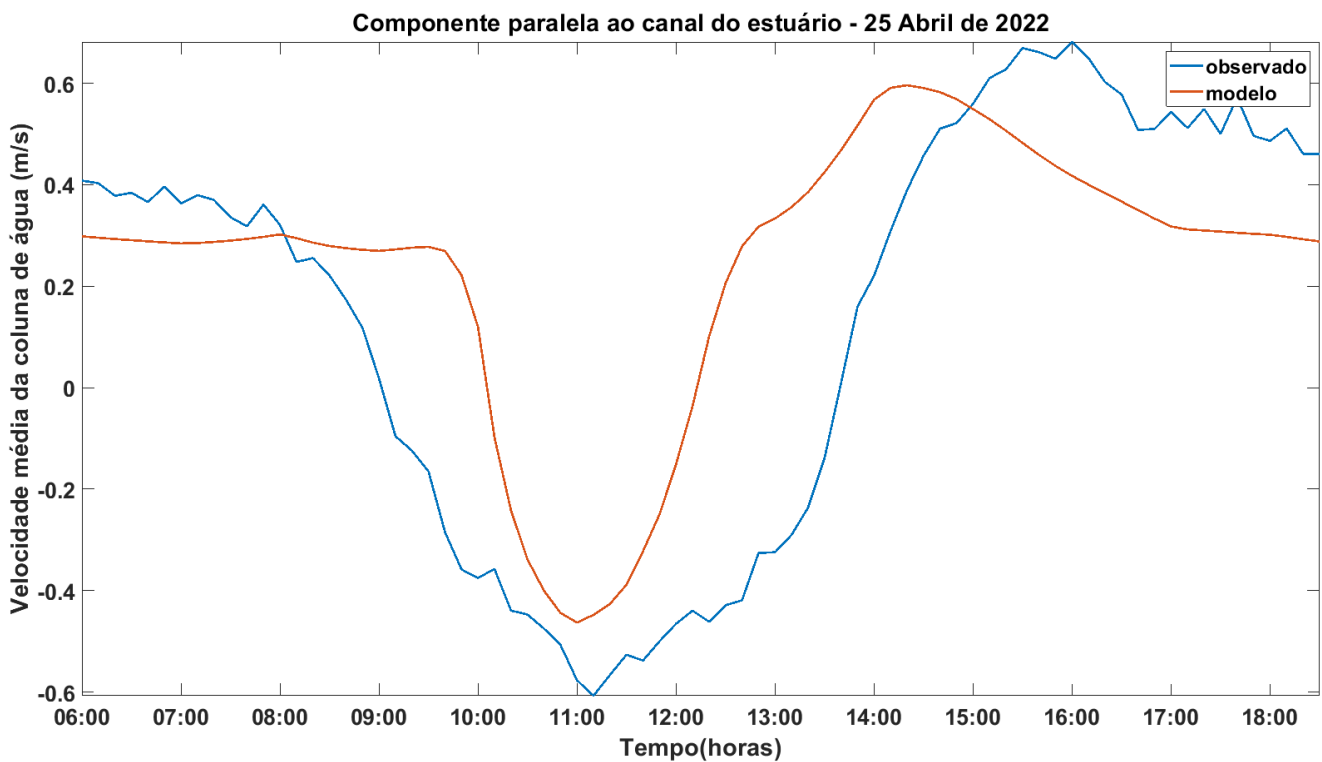


Fonte: dados da pesquisa.

4.1.2.2 Estuário

Para fins de validação das simulações das correntes simuladas para o estuário, foi realizada decomposição da componente paralela e perpendicular ao eixo principal do estuário, pois é a que possui maior predominância no fluxo do estuário. Esta componente se mostrou com picos e cavados alinhados nas comparações entre os dados (figura 14). O tempo de enchente foi maior para os dados modelados em relação ao observado. Já o tempo de vazante dos dados modelados foi menor que o dos dados coletados. Esta diferença entre o tempo de enchente e vazante entre os dados comparados pode ter acontecido devido a inconsistências na batimetria inserida no modelo que modificaram o atrito de fundo e conseqüente valores de velocidade diferentes modelados para o local onde os dados observados foram coletados. O valor de RMSE obtido para os dados de simulação do estuário foi de 0.29. O parâmetro skill foi de 81%, sendo, portanto, considerado excelente.

Figura 14. Comparação da componente paralela ao canal do estuário do modelo e observado.



Fonte: Dados da pesquisa

Xavier (2019) utilizando o modelo DELF 3D para estudo da hidrodinâmica do rio Jaguaribe, que está sobre o domínio de condições climáticas semelhantes ao rio Pacoti porém com muito maior fluxo, também obteve boa correlação entre os dados modelados e observados para a velocidade no baixo e médio estuário, com skill de 0.96 com desvios entre os dados de valores de enchente e vazante menores que 10%.

Considerando os resultados da validação acima de velocidade das correntes e de maré e o bom resultado do modelo no estudo da circulação para a plataforma e o estuário do Rio Pacoti, pode-se dizer que o modelo simulou satisfatoriamente as condições de circulação para área de estudo e pode ser utilizado para simular o transporte dos propágulos.

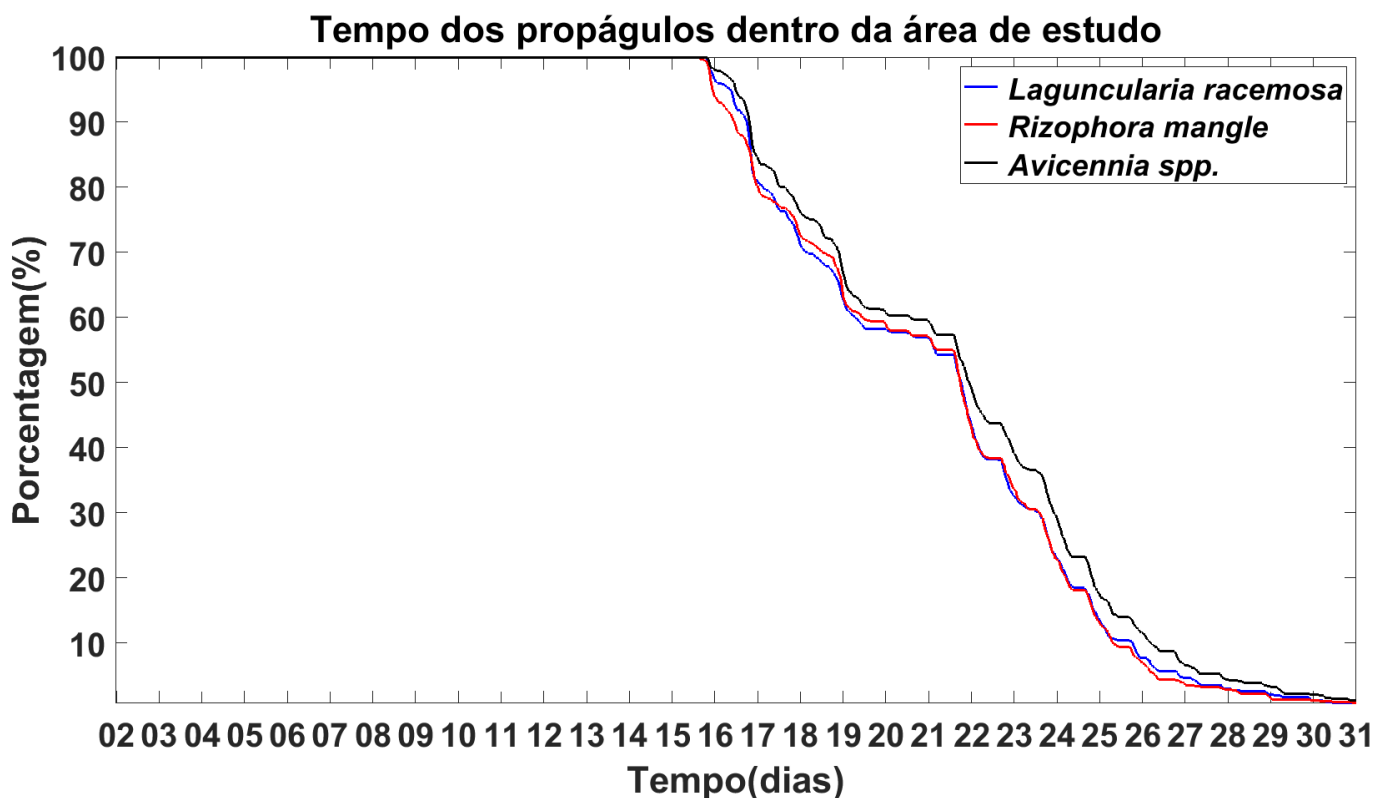
4.2 Trajetória dos propágulos

4.2.1 Tempo dos propágulos dentro da área de estudo

Neste estudo assumimos que todos os propágulos liberados dentro do estuário encontram as águas abertas da plataforma, não levando em conta o aprisionamento dos mesmos pelo emaranhado de raízes que podem retardar ou impedir sua propagação para áreas externas ao manguezal ou herbivoria.

Os propágulos simulados percorreram todo litoral modelado a oeste do Rio Pacoti e começaram a sair da área de estudo (limite no extremo oeste na praia de Bitupitá, município de Barroquinha) a partir do dia 15. Gradualmente a porcentagem de propágulos decaíram a aproximadamente zero dentro de 31 dias (figura 15).

Figura 15. Saída dos propágulos da área de estudo.



Fonte: Dados da pesquisa.

As três espécies estudadas tiveram comportamento muito similar no tempo de dispersão e suas respectivas concentrações dentro da área estudada, apontando para um comportamento equivalente nas simulações independente de suas massas.

Bittencourt (2013) analisou através do modelo Regional Ocean Modelling System (ROMS) a trajetória de flutuadores oriundos da desembocadura do Rio Pacoti na plataforma do Ceará. Como encontrado neste estudo, os flutuadores forçados por vento e maré tiveram deslocamento de leste para oeste. A autora observou que o tempo dos flutuadores com origem na desembocadura do Rio Pacoti alcançaram o rio Cocó em intervalo de 10 dias, o rio Ceará em 30 dias, rio Curú em 120 dias e rio Acaraú em 200 dias.

O tempo superior de dispersão encontrado por Bittencourt (2013) com relação a este estudo para a dispersão na plataforma pode ser explicado por menor velocidade da circulação de

correntes na plataforma. Tais diferenças podem ser explicadas pelo uso de médias mensais de ventos e menor resolução da grade do domínio da autora que é de 3 x 3 km na área estudada para a plataforma. Ambas configurações do modelo podem ter levado a uma menor representação das condições reais de circulação da plataforma principalmente em áreas mais rasas onde é necessário refinamento da grade. Outro ponto a ser observado é que não foi especificado a massa dos flutuadores usados dentro do modelo de forma que uma possível maior massa possa levar a um maior tempo de transporte.

4.2.2. Trajetória das mil partículas na plataforma

Os propágulos dentro do domínio tiveram dispersão de leste para oeste junto à costa, destacando o papel do vento de direção leste-sudeste como direcionadores das correntes e consequentemente como determinantes na orientação de propagação (figura 16, 17, 18). A maré como principal forçante dos propágulos em direção ao mar aberto, devido ao seu movimento cíclico e valores de velocidade menores frente a componente paralela à costa (figuras 10 e 11), teve baixa interferência na direção e transporte dos propágulos.

As espécies estudadas atravessaram toda a extensão do domínio rente ao litoral (cerca de 379 km) em cerca de 31 dias, período de flutuabilidade correspondente a espécie *Laguncularia racemosa* e menor que o considerado neste trabalho para *Avicennia spp.*, 90 dias e *Rhizophora Mangle*, 180 dias.

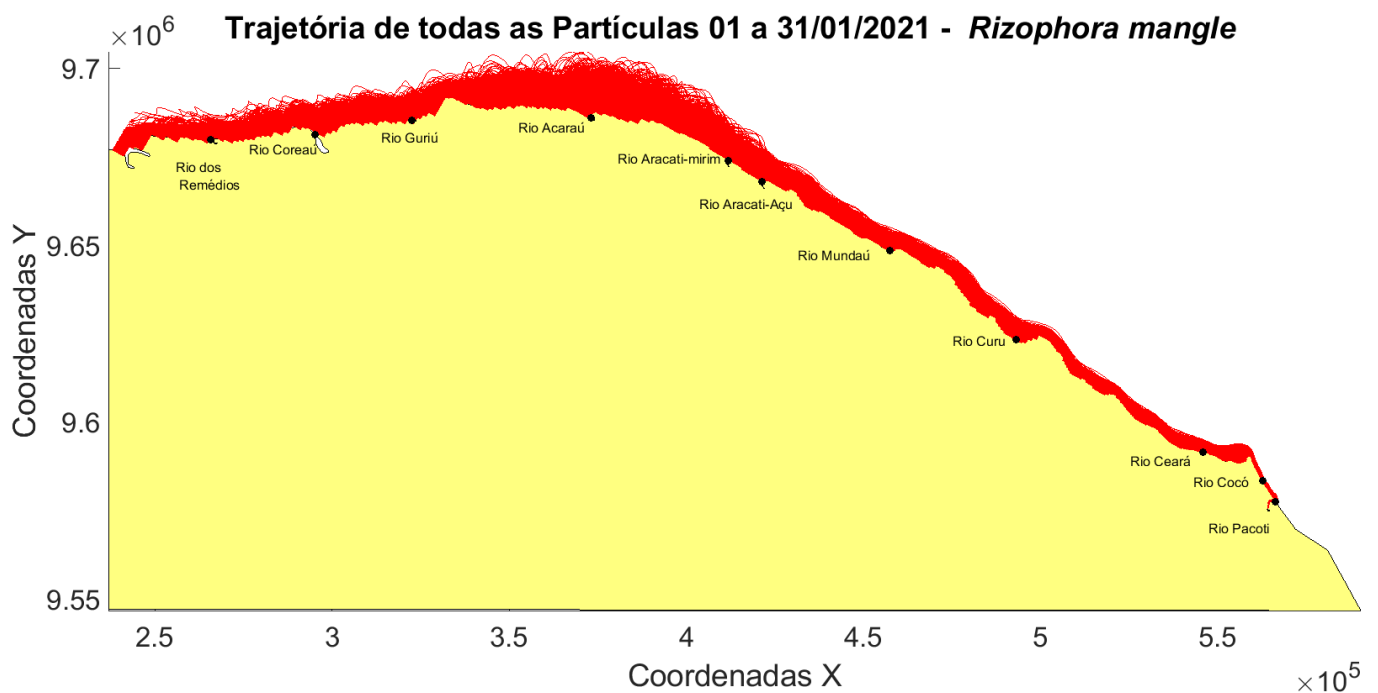
Van der Stocken & Menemenlis (2017) assumiram período de flutuação de 2.5 meses para flutuadores em modelo que simulava a velocidade das trajetórias dos propágulos considerando diferentes coeficientes em equação de cálculo de velocidade que descreviam a influência do vento obtidos em Van der Stocken (2013). Neste período o autor obteve dispersão maior que 800 km entre canal que liga Moçambique e Madagascar.

Steiken (2013) simulou o transporte de propágulos de *Avicennia marina* oriundo de manguezais da África do Sul através da liberação de flutuadores de plástico com densidade igual ao desta espécie. Estes flutuadores continham informações para caso encontrados pudessem ter sua localização informada por quem os achasse. Dentro de um intervalo pouco maior que um ano, o autor obteve transporte transoceânico com notificação de 3 cartões na América do Sul, 52 na Austrália e 11 na Nova Zelândia.

Takayama et al.(2013) confirmou através de estudo de similaridades genéticas entre *R. mangle* e *R. samoensis* a dispersão transoceânica de espécies de *R. mangle* da costa Pacífica do continente Americano para Ilhas do Pacífico oeste.

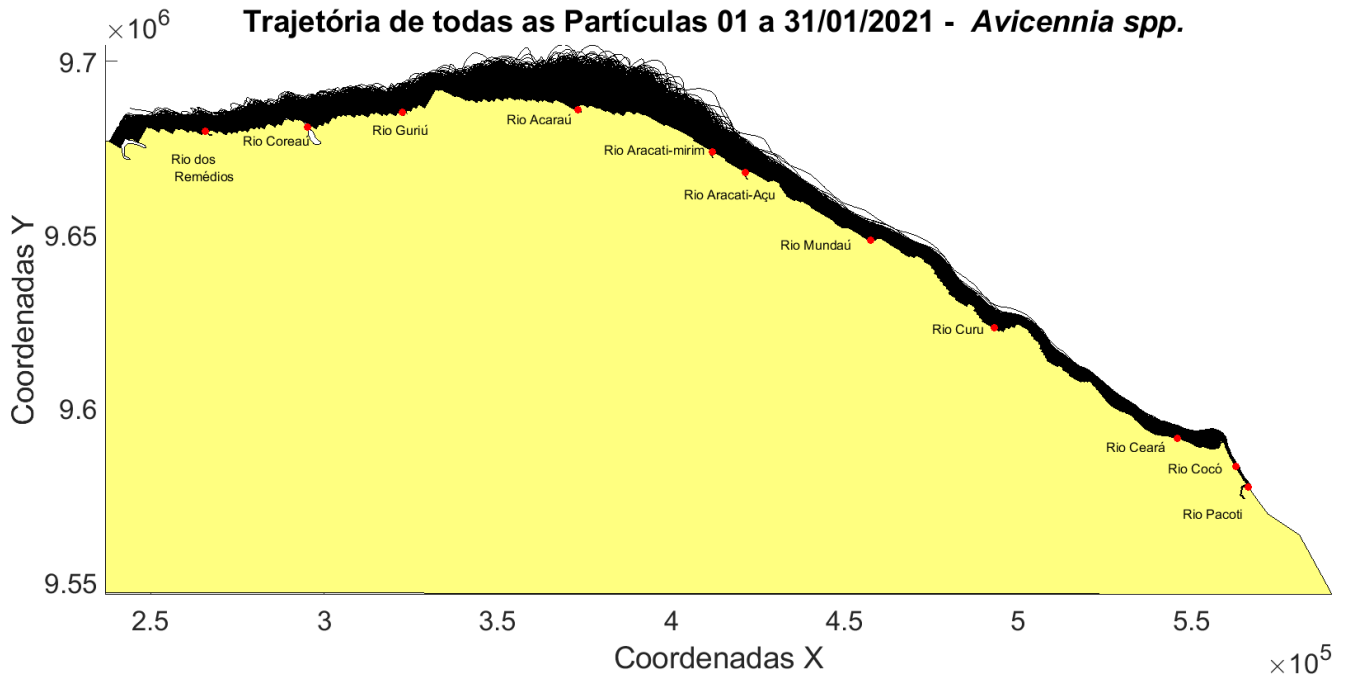
Portanto, considerando os intervalos citados anteriormente a saída dos propágulos do domínio neste período abre a possibilidade de maior alcance dos propágulos de *Avicennia spp.* e *R. mangle* para áreas mais ao noroeste de do Brasil. Considerando que os propágulos percorreram cerca de 379 km em 31 dias, para os 90 dias de flutuabilidade de *Avicennia spp.* pode-se estimar que os propágulos alcançariam cerca de 1100 km de distância do Rio Pacoti e para os 180 dias de flutuabilidade de *R. mangle* 2200 km. Estes valores de distância são reforçados pelas dispersões em longas distâncias verificadas por Steink (2003), Van der Stocken & Menemenlis (2017) e em estudos genéticos por Takayama et al. (2013). Mesmo não considerado neste estudo o encalhe dos propágulos ocorreriam junto à costa devido aos diferentes usos e materiais que a compõem, diminuindo a quantidade de propágulos a ambientes possíveis de estabelecimento.

Figura 16. Trajetórias de todos os propágulos da espécie *Rhizophora mangle* lançados no Rio Pacoti e acompanhadas por 31 dias na área de estudo durante o mês de janeiro de 2021.



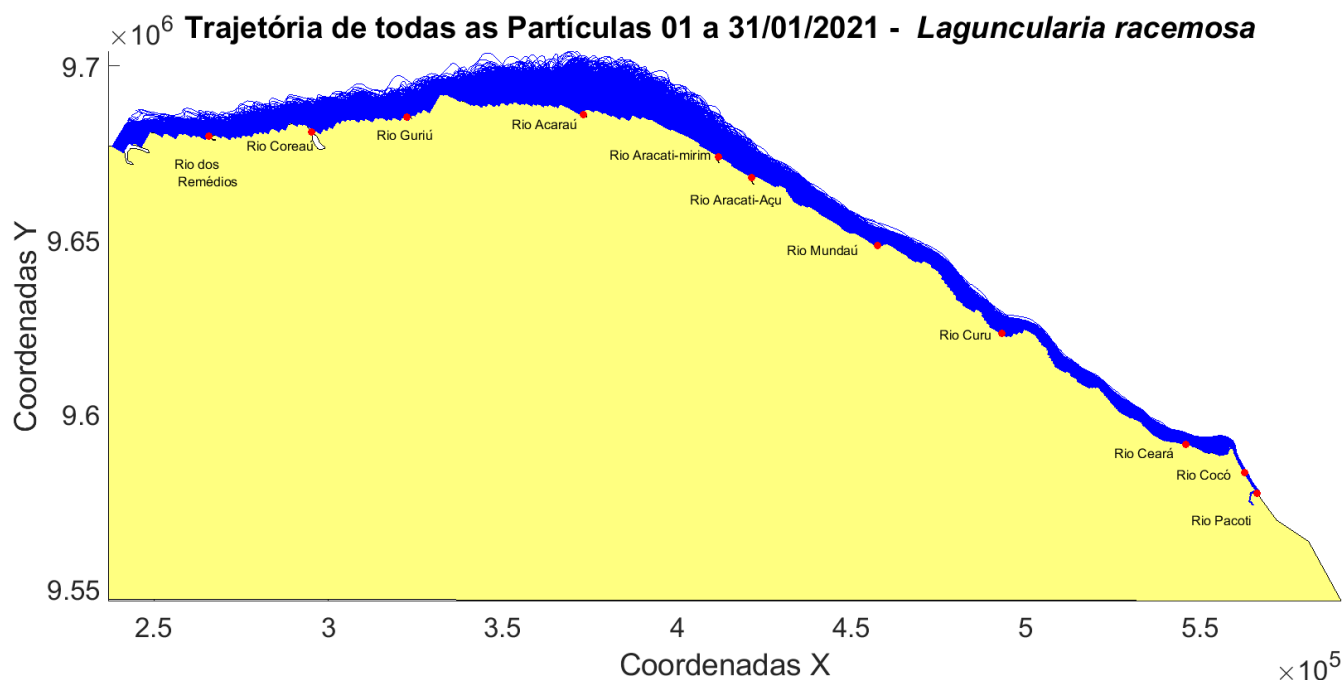
Fonte: Dados da pesquisa

Figura 17. Trajetórias de todos os propágulos da espécie *Avicennia spp.* lançados no Rio Pacoti e acompanhadas por 31 dias na área de estudo durante o mês de janeiro de 2021.



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 18. Trajetórias de todos os propágulos da espécie *Laguncularia racemosa* lançados no Rio Pacoti e acompanhadas por 31 dias na área de estudo durante o mês de janeiro de 2021.



Fonte: Dados da pesquisa.

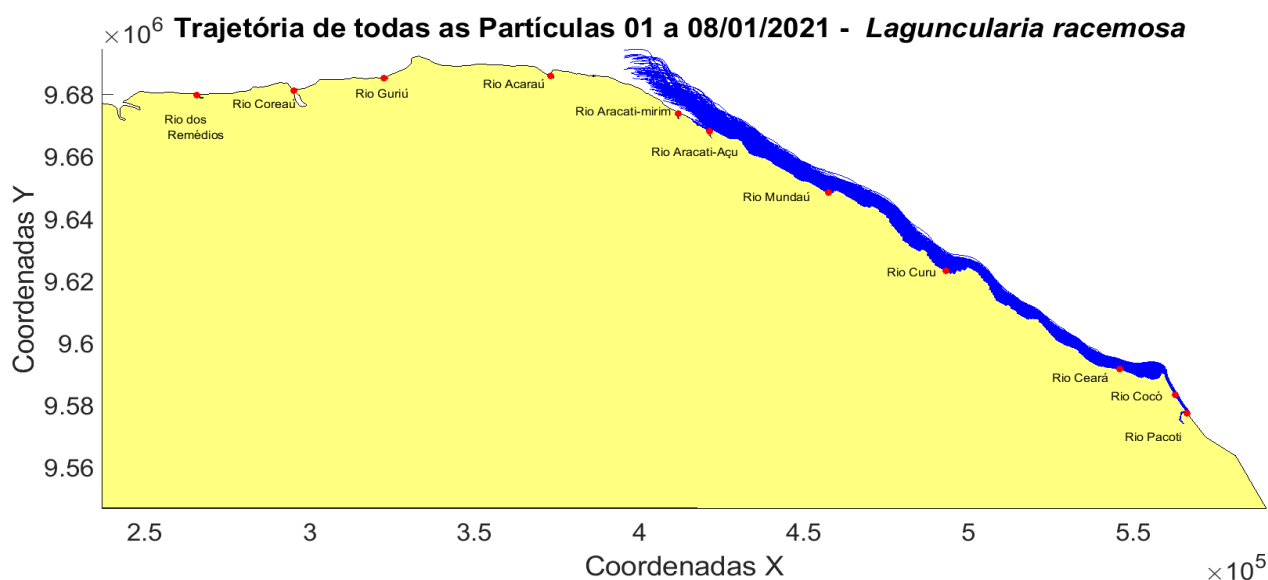
Observa-se que na área do litoral leste, antes da ponta do Porto do Mucuripe, os propágulos permanecem conjuntamente próximos a linha de costa. Isto se deve a orientação do vento que fica perpendicular a esta parte do litoral transportando os propágulos em direção à costa nesta direção (Figura 16, 17 e 18). Ao passar pelo espigão do Mucuripe, os propágulos são afastados da costa que se pronuncia ao longo do litoral e atinge um máximo na coordenada X de 400. Este ponto coincide com a mudança de direção da costa do Ceará do sentido noroeste para leste-oeste. Nesta região o vento permanece paralelo a costa e contribui juntamente com a mudança de direção da do litoral para o afastamento das trajetórias da costa para águas mais profundas.

O período de dispersão obrigatória corresponde ao tempo necessário para que as primeiras raízes dos propágulos cresçam e permitam que este tente se estabelecer no solo (Clarke,

1993). Para a *Laguncularia racemosa* este período foi encontrado para ser de no mínimo de 8 dias e máximo de 16 dias, sendo que os propágulos desta espécie perdiam o vigor para estabelecimento após 8 dias de dispersão. Após 31 dias os propágulos eram considerados como mortos (Rabinowitz,1978). Após período de 8 dias os propágulos simulados teriam máximo alcance na região próxima a foz do rio Aracati-miri, sendo portanto a extensão ótima para colonização da espécie.

Considerando que o propágulo maduro após ser liberado da árvore mãe fosse transportado pela circulação do estuário para a área da plataforma, a espécie *L.racemosa* teria sua dispersão e colonização restrita à costa do Ceará .

Figura 19. Trajetórias de todos os propágulos da espécie *Laguncularia racemosa* lançados no Rio Pacoti e acompanhadas de 01 a 08 de janeiro durante o mês de janeiro de 2021.

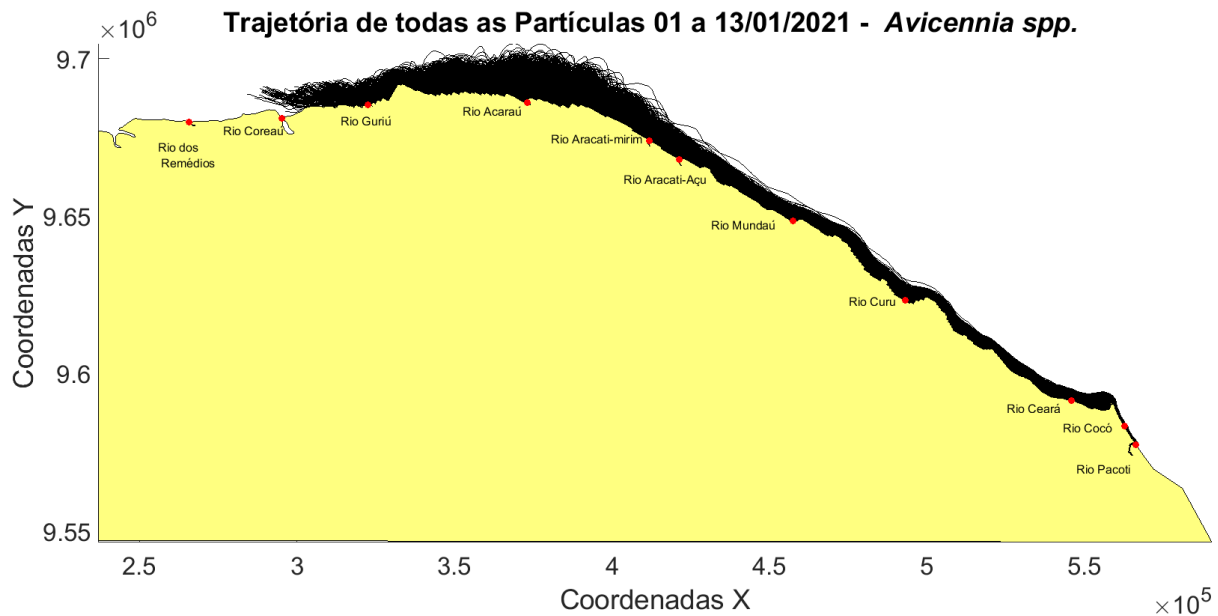


Fonte: Dados da pesquisa.

Em estudo realizado por Clarke (1993) em gradeados com propágulos de *Avicennia marina* submetidos a diferentes inundações pela maré, verificou-se que esta espécie perde o pericarpo após 3 dias e daí surgem as primeiras raízes no intervalo máximo de 10 dias. Estas permaneceram viáveis antes de haver apodrecimento por 2 meses e algumas poucas por 7 meses. Balke et al. (2011) submeteu alguns propágulos de *Avicennia marina* a simuladores de oscilações

da maré e obteve que era necessários cerca de 8 dias após o plantio para que as raízes em areia fossem fortes o suficiente para que os propágulos não fossem arrastados e suspensos na coluna da água. Considerando então o período obrigatório, ou seja, para que o propágulo desenvolva raízes capazes de se ficar no solo, seja de 13 dias, os propágulos liberados no modelo estariam próximos ao Rio Coreau, portanto, seria em torno desta região e a partir dela que os propágulos de *Avicennia spp.* poderiam se estabelecer. Considerando que estes tivessem caminho livre neste período dentro da plataforma.

Figura 20. Trajetórias de todos os propágulos da espécie *Laguncularia racemosa* lançados no Rio Pacoti e acompanhadas de 01 a 13 de janeiro durante o mês de janeiro de 2021.



Fonte: Dados da pesquisa.

Os propágulos de *Avicennia spp.* e *Laguncularia racemosa* necessitam de um período sem perturbações das marés para que possam ter tempo para que suas raízes adentrem o solo e se fixem. Por isso estão restritas às regiões mais altas do estuário onde as inundações da maré são menores nas marés de quadratura (Rabinowitz, 1978). Desta forma as condições que permitiriam a entrada de propágulos de *Avicennia spp.* e *Laguncularia racemosa* oriundos do Rio Pacoti na parte

média e alta de estuários a oeste iriam depender largamente da força de entrada das marés de sizígia para transporte em áreas ideais.

Devido a seu maior peso, capacidade de afundar e se estabelecer abaixo da água, *R. mangle* é encontrada em terrenos mais baixos onde há maior oscilação das forças de arrasto da maré. Seu período de dispersão obrigatória é de cerca de 40 dias na água salgada (Rabinowitz,1978). Esta característica torna *Rhizophora mangle* a espécie com maior chance de estabelecimento dentre as estudadas, pois seu propágulo uma vez na plataforma junto à linha de costa possui proximidade com o baixo estuário onde consegue se estabelecer. Ela é a única entre as espécies estudadas que o propágulo orienta-se na vertical e afunda para enraizar (Davis,1940). Mesmo que seu período de dispersão obrigatória passe o tempo encontrado no cenário mostrado neste estudo que foi de 31 dias, em cenário real o propágulo de *R. mangle* pode ficar aprisionado em raízes e escapar do transporte para a parte exterior da plataforma do Ceará e ser um colonizador interno entre mangues do Ceará.

A influência do no transporte de propágulos considerando a morfologia de cada espécie não foi considerada neste estudo, porém segundo Van de Stocken et al. (2013) analisou como a morfologia dos propágulos interage com variáveis físicas como o vento e as correntes. Ele obteve que a densidade dos propágulos, orientação e rugosidade da superfície determinam o grau de influência do vento na velocidade de dispersão. Propágulos menos densos que flutuam na horizontal possuem maior área em superfície para o arrasto do vento. Propágulos de maior densidade, por consequência tem maior área submersa, e por vezes, podem flutuar na vertical o que diminui a influência do vento em sua velocidade. Porém a orientação do vento deve ser considerada com relação ao sentido das correntes. Ventos em sentidos contrários ao das correntes tornam propágulos menos densos mais lentos, sendo, portanto, propágulos com maior densidade menos influenciados por estas diferenças fazendo com que alcancem maiores distâncias de dispersão.

A probabilidade de colonização de propágulos oriundos do Rio Pacoti em estuários a oeste depende da orientação da entrada do canal do estuário com relação a direção do vento, da força da corrente de vazante e enchente dentro do estuário que pode facilitar a entrada de propágulos no caso de estuários dominados por enchente ou forçar sua saída em caso de estuários dominados por vazante.

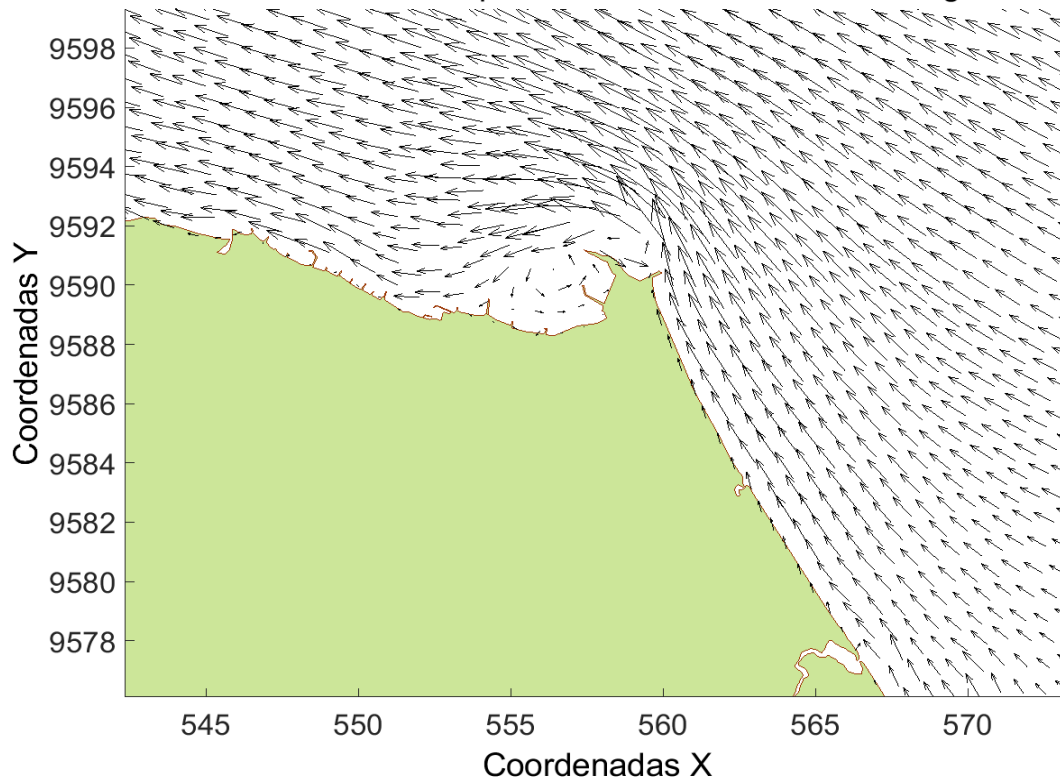
4.2.3. Trajetórias de três propágulos no litoral de Fortaleza

A análise das trajetórias de 3 propágulos de cada uma das espécies estudadas na área da cidade de Fortaleza mostra um padrão de deslocamento influenciado pelas obras costeiras como os espigões. Essas obras costeiras agem na circulação local através do cisalhamento da corrente, gerando padrão circulatório, chamados de vórtices locais. Os vórtices possuem maior intensidade na área do Porto do Mucuripe e do espigão do Titanzinho (figura 21, 22).

Estes vórtices juntos aos espigões do Porto do Mucuripe e Titanzinho também foram relatados em modelagens realizadas por Maia (1998), Viana (2019) e Parente (2013).

Figura 21. Padrões de circulação observados próximo ao Porto do Mucuripe na máxima amplitude da maré de Sizígia.

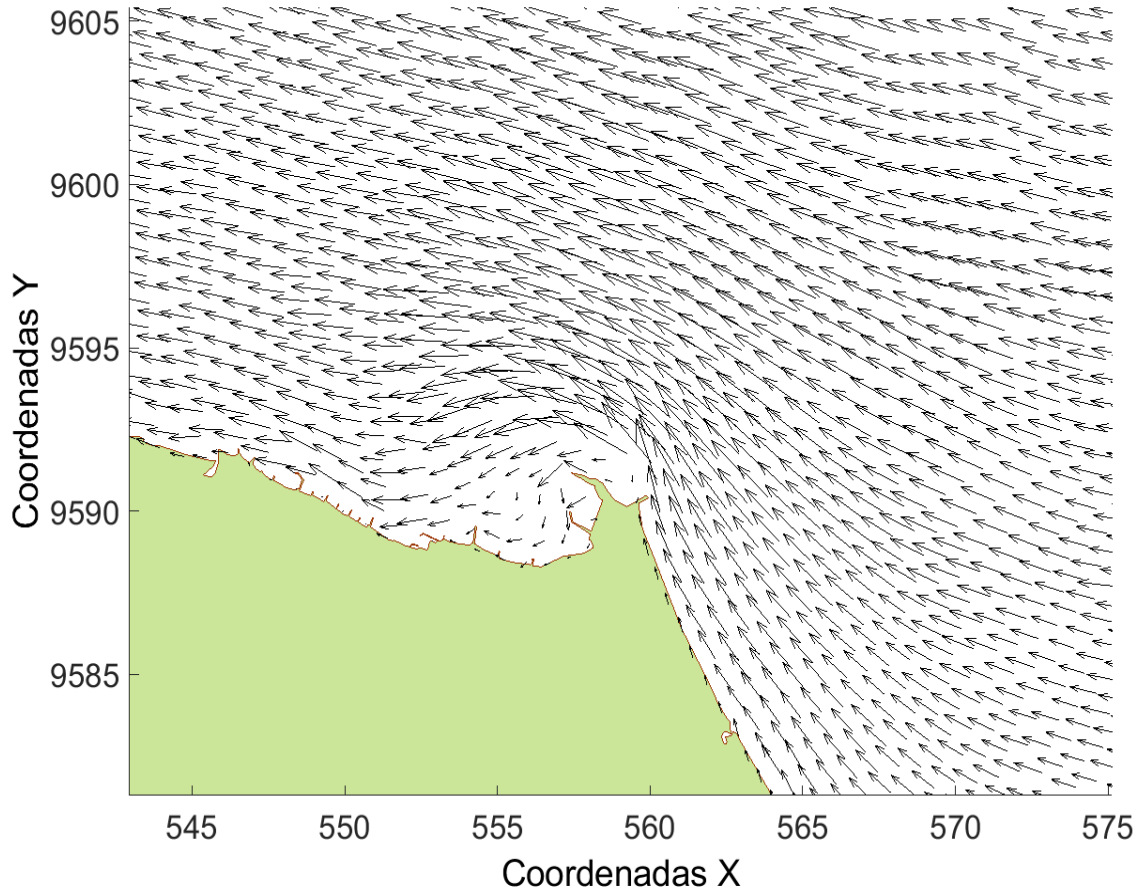
Vetores da Média de Velocidade - Amplitude Máxima da Maré de Sizígia 14/01/2021 18:00h



Fonte: Dados da pesquisa

Figura 22. Padrões de circulação observados próximo ao Porto do Mucuripe na mínima amplitude da maré Sizígia.

Vetores da Média de Velocidade - Amplitude Mínima da Maré de Sizígia 14/01/2021 12:00h



Fonte: Dados da pesquisa

De forma secundária, algumas trajetórias mais próximas à praia tiveram aprisionamento entre espigões menores na região de Fortaleza. Os propágulos nessa região acompanham a circulação local ficando aprisionados por um período maior nas áreas com vórtices que são modificadas pelas oscilações de maré (figura 23).

Estas áreas onde se formam os vórtices são rodeadas de espigões e por vezes enrocamentos que podem servir como áreas de aprisionamento desses propágulos e reduzir seu deslocamento e chance de alcance de áreas onde seja possível desenvolvimento.

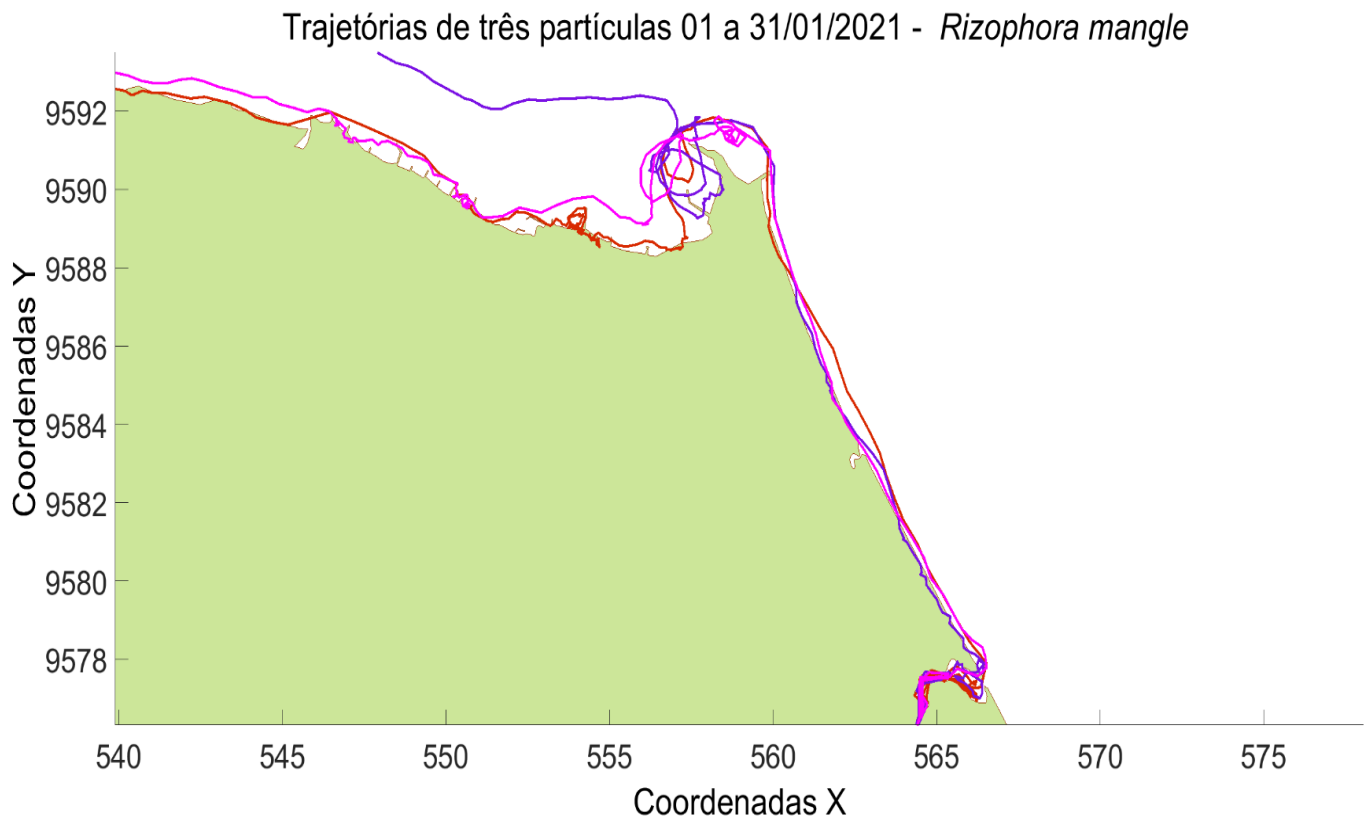
O Rio Cocó pode ser considerado o estuário com maior possibilidade de doação de propágulos oriundos do rio Pacoti já que entre ambos estão ausentes obras costeiras.

Projetos de implantação de parques de energias eólicas onshore e offshore no estado do Ceará requerem adequações necessárias no litoral com contenções que envolvem espigões ou enrocamentos feitos como pedras. Tais estruturas, principalmente quando dispostas de forma perpendicular à costa, podem ou poderão conter a passagem de propágulos que conseguirem escapar para a plataforma, apresentando-se como empecilho ao compartilhamento de populações entre áreas de mangue.

Situação similar foi descrita por Striken e Ward (2003), onde os autores lançaram cerca de 3000 cartões que simularam a densidade de propágulos de *Avicennia marina* distribuídos na saída de estuários na África do Sul e obtiveram retorno menor que 2% nos pontos da costa onde haviam estruturas ou natureza rochosa.

Portanto, não somente a fisiografia da costa mas também a natureza das obras que nela estão implantadas são agentes que podem dificultar a dispersão de propágulos de mangue.

É necessário lembrar que o trapemaneto dos propágulos não foi considerado no modelo, assim o tempo de transporte dos propágulos pode estar subestimado. Os resultados aqui obtidos podem ser validados através do lançamento de propágulos maduros no estuário do Rio Pacoti e busca em percursos e intervalos definidos no litoral. Além do mais, os períodos de dispersão obrigatórios e de estabelecimento devem ser melhor estudados, considerando a salinidade, temperatura e composição dos sedimentos nos manguezais locais.

Figura 23. Trajetória de três propágulos de *R.mangle* ao largo de Fortaleza.

Fonte: Dados da pesquisa

5 CONCLUSÃO

Neste estudo a circulação da plataforma e estuário resultantes de simulações com o modelo Delft 3D foram validadas através da comparação com dados de ADCP coletados dentro do estuário do Rio Pacoti e Plataforma. Através das análises foi demonstrado que as simulações conseguiram reproduzir a circulação nestes ambientes e as mesmas foram usadas para que se pudesse analisar a trajetória dos propágulos de mangue oriundos do Rio Pacoti.

Os resultados mostram que os propágulos tiveram trajetórias condicionadas pelas correntes e ventos. Para todas as espécies houve direção de transporte de leste para oeste onde a orientação da linha de costa afastou ou aproximou os propágulos da praia considerando a direção do vento de sudeste.

Os propágulos levaram cerca de 15 dias para começar a sair da fronteira oeste da área de estudo (localizada a 379 km da entrada do rio pacoti) e gradualmente foram diminuindo sua concentração até zerar suas quantidades dentro da área simulada em cerca de 31 dias.

Levando em conta o intervalo de 31 dias comparado ao tempo de flutuação e dispersão obrigatória das espécies, *Laguncularia racemosa* teria um alcance máximo de dispersão e possibilidade de colonização de área externas ao estuário do rio Pacoti restrita aos estuários do Ceará. *Rhizophora mangle* e *Avicennia spp.* poderiam ser transportadas para plataforma de estados mais a noroeste do estado já que seus períodos de flutuação são de 90 e 180 dias, respectivamente. Os resultados para a dispersão dos propágulos de *Rhizophora mangle* mostraram que é a espécie com maior potencial de dispersão, podendo alcançar áreas fora da costa de Ceará. Esta capacidade dispersiva contribui com a predominância de *R. mangle* nos manguezais neotropicais, sendo uma espécie altamente eficiente em se implantar em novas áreas, pois consegue se fixar no baixo estuário que tem maior proximidade com a praia, lugar onde se concentra o transporte dos propágulos.

No mar ao largo da cidade de Fortaleza os espigões tiveram importante papel na interrupção do padrão circulatório como consequência de vórtices, como os formados na área do Porto do Mucuripe e Titanzinho e em menor escala em espigões menores a oeste. Tal comportamento dos propágulos na região explica como os mesmos podem ficar presos nas pedras que compõem estas estruturas, servindo como armadilhas.

6 REFERÊNCIAS

Balke, Thorsten & Bouma, Tjeerd & Horstman, Erik & Webb, Edward & Erftemeijer, Paul & Herman, Peter. (2011). Windows of opportunity: Thresholds to mangrove seedling establishment on tidal flats. *Marine Ecology Progress Series*. 440. 10.3354/meps09364.

BALL, M. C. (1988). Ecophysiology of Mangrove. *Trees*, 2, 129-142.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00196018>.

BARRA, Otávio Augusto de Oliveira Lima et al. CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL E OS CONFLITOS EXISTENTES NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO BAIXO PACOTI, CEARÁ – BRASIL. *Revista Casa da Geografia de Sobral*, Sobral, v. 16, n. 2, p.66-83, 2014.

BEZERRA, Claudiane Quaresma Pinto. **Aspectos Hidrológicos e Balanço dos Principais Nutrientes Presentes no Estuário do Rio Pacoti**. 2003. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

BRASIL. Código Florestal. 1965.

BITTENCOURT, L. P. Variabilidade especial e sazonalidade da circulação barotrópica da plataforma continental do Ceará. 69 f. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

Clarke, P. J. (1993). *Dispersal of grey mangrove (Avicennia marina) propagules in southeastern Australia. Aquatic Botany*, 45(2-3), 195–204. doi:10.1016/0304-3770(93)90021-n

DAVIS, J. H., JR. 1940. The ecology and geologic role of mangroves in Florida. *Carnegie Inst. Wash. Publ. (Papers from Tortugas Lab. 32)* 517: 303-412

DELTAWARES, Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual. Delft3D, v. 3.15.52614, Holanda, 2017a. 686 p

Duke, Norman & Ball, Marilyn & Ellison, Joanna. (1998). Factors Influencing Biodiversity and Distributional Gradients in Mangroves. *Global Ecology and Biogeography*. 7. 27-47. 10.2307/2997695.

Duke, Norman & Ball, Marilyn & Ellison, Joanna. (1998). Factors Influencing Biodiversity and Distributional Gradients in Mangroves. *Global Ecology and Biogeography*. 7. 27-47. 10.2307/2997695.

DUKE, Norman C.. Mangrove Floristics and Biogeograph. In: ROBERTSON, A.I.; ALONGI, D.M. (ed.). **Tropical Mangrove Ecosystems**. 41. ed. Washington: American Geophysical Union., 1994. Cap. 4. p. 63-100.

FERREIRA, Alexander C.; GANADE, Gislene; ATTAYDE, José Luiz de. Restoration versus natural regeneration in a neotropical mangrove: effects on plant biomass and crab communities. **Ocean & Coastal Management**, [S.L.], v. 110, p. 38-45, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.03.006>.

FERREIRA, Antonio Geraldo; MELLO, Namir Giovanni da Silva. 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**, [S.l.], v. 1, dez. 2005. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25215/16909>>. Acesso em: 11 abr. 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.252>.

Field, C., 1995. **Impacts of expected climate change on mangroves**. *Hydrobiologia* 295, 75–81.

FILHO, José Airton Bezerra Viana. Modelagem do transporte de sedimentos e contaminantes do emissário submarino de Fortaleza, CE. / José Airton Bezerra Viana Filho. – 2019

FORTUNA, Armando de Oliveira. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluídos: conceitos básicos e aplicações. [S.l: s.n.], 2000.

Harari, Joseph. Fundamentos de modelagem numérica em Oceanografia. São Paulo, 2015 246 p.

JENNERJAHN, T. C. *et al.* Mangrove Ecosystems under Climate Change. **Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective**, [S.L.], p. 211-244, 2017. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-62206-4_7.

Komiyama, A., Pongpan, S., & Kato, S. (2005). *Common allometric equations for estimating the tree weight of mangroves*. **Journal of Tropical Ecology**, 21(04), 471–477.

KOMIYAMA, Akira; ONG, Jin Eong; POUNGPARN, Sasitorn. Allometry, biomass, and productivity of mangrove forests: a review. **Aquatic Botany**, [S.L.], v. 89, n. 2, p. 128-137, ago. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.006>.

Lacerda, LD., Ferreira, AC., Borges, R., Ward, R. Mangroves of Brazil. 2022. In: SC Das et al (Eds), Mangroves: Biodiversity, Livelihoods and Conservation. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0519-3_20.

Maciel, N.C., 1991. Alguns aspectos da ecologia do manguezal.. *In*: CPRH, 1991. **Alternativas de uso e proteção dos manguezais do Nordeste**. Recife, Companhia Pernambucana de Controle da Poluição Ambiental e de Administração do Recursos Hídricos. Série Publicações Técnicas, N° 003, 9-37.

MAIA LP, LACERDA LD, MONTEIRO LHU, SOUZA GM. 2006. **Atlas dos manguezais do Nordeste do Brasil**: avaliação das áreas de manguezais dos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. SEMACE, 150p

MAIA, L. P. PROCESOS COSTEROS Y BALANCE SEDIMENTARIO A LO LARGO DE FORTALEZA (NE-BRASIL): IMPLICACIONES PARA UNA GESTIÓN ADECUADA DE LA ZONA LITORAL. Tese de doutorado, Barcelona, ESP, 1998.

MAIA, Rafaela Camargo. **Manguezais do Ceará**. Fortaleza: Ifce, 2016. 57 p.

Matteo Fumi. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. 179 p.

MEDEIROS, T. C. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.. Allometry of aboveground biomasses in mangrove species in Itamaracá, Pernambuco, Brazil. **Wetlands Ecology And Management**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 323-330, 24 nov. 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11273-007-9069-z>.

MOLISANI, M. O. P. **Estimativa da descarga fluvial para os principais estuários do estado do Ceará**, Zoneamento Ecológico e Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. Governo do Estado do Ceará, p.15, 2005.

MOURA-FÉ, Marcelo Martins de; ALBUQUERQUE, Antônia Gislaine Brito Marques; FREITAS, Eduardo Marcelo de Negreiros. A proteção do Ecossistema Manguezal pela Legislação dos Estados do Nordeste Brasileiro. *Estudos Geográficos*, Rio Claro, v. 12, ed. 2, p. 30-44, 2014.

Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/estgeo>. Acesso em: 3 abr. 2022.

NADIA, Tarcila Correia de Lima. Fenologia, Ecologia da Polinização e Reprodução de Espécies de Manguezal no Município de Goiana-PE. 2009. 145 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biologia Vegetal, Botânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

Nitto, D. & Erftemeijer, Paul & van Beek, J.K.L. & Dahdouh-Guebas, Farid & Higazi, L. & Quisthoudt, Katrien & Loku Pulukkuttige, Jayatissa & Koedam, Nico. (2013). Modelling drivers of mangrove propagule dispersal and restoration of abandoned shrimp farms. *Biogeosciences*. 10. 5095-5113. 10.5194/bg-10-5095-2013.

PARENTE, F. T. F. Dispersão de materiais na região costeira de Fortaleza, CE - Brasil. 2013. 64 f. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PBMC. 2013. **Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Sumário Executivo GT1. PBMC, Rio de Janeiro, Brasil, 24 p.

POTTER, Ian C. et al. The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. *Estuarine, Coastal And Shelf Science*, [s.l.], v. 87, n. 3, p.497-500, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.01.021>.

RABINOWITZ, Deborah. Dispersal Properties of Mangrove Propagules. *Biotropica*, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 47-57, mar. 1978. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/2388105>.

ROSMAN, P. C. C. Referência Técnica do SisBaHiA. 2021. Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBaHiA_RefTec_v11a.pdf

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. & CINTRÓN, G., 1986, *Guia para estudo de áreas de manguezal. Estrutura, função e flora*. Caribbean Ecological Research, São Paulo, 150p.

SCHAEFFER-NOVELLI, Yara; VALE, Claudia Câmara do; CINTRÓN, Gilberto. Monitoramento do ecossistema manguezal: estrutura e características funcionais. **Protocolos Para O Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros - Rede de Monitoramento de Habitat Bentônicos Costeiros - Rebentos**, [S.L.], p. 62-80, 2015. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. <http://dx.doi.org/10.7476/9788598729251.0005>.

Schettini, Carlos & Valle-Levinson, Arnoldo & Truccolo, Eliane. (2017). Circulation and transport in short, low-inflow estuaries under anthropogenic stresses. *Regional Studies in Marine Science*. 10. 10.1016/j.rsma.2017.01.004.

Soares, Jacyra & Castro, Belmiro. (1996). Numerical modeling of the response of Ceará continental shelf waters to wind stress forcing. *Brazilian Journal of Oceanography*. 44. 10.1590/S1679-87591996000200004.

SOARES, Julia de Lima. ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE DADOS DE NÍVEL AO LONGO DO LITORAL BRASILEIRO. Orientador: Antonio Fernando Härter Fetter Filho. 2013. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Departamento de Geociências, Santa Catarina, 2013. Disponível em: <https://labdino.paginas.ufsc.br/files/2018/06/Soares-2013.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2022.

Sousa, Wayne & Kennedy, Peter & Mitchel, Betsy & Ordones, Benjamin. (2007). Supply-side ecology in mangroves: Do propagule dispersal and seedling establishment explain forest structure?. *Ecological Monographs*. 77. 10.1890/05-1935.

SPALDING, Mark; BLASCO, François; FIELD, Colin (ed.). **World Mangrove Atlas**. Paris: International Society For Mangrove Ecosystems, 1997.

Steinke, T. D., & Ward, C. J. (2003). *Use of Plastic Drift Cards As Indicators of Possible Dispersal of Propagules of the Mangrove Avicennia Marina by Ocean Currents*. *African Journal of Marine Science*, 25(1), 169–176. doi:10.2989/18142320309504007

Stieglitz, Thomas & Ridd, Peter. (2001). Trapping of mangrove propagules due to density-driven secondary circulation in the Normanby River estuary, NE Australia. *Marine Ecology-progress Series - MAR ECOL-PROGR SER*. 211. 131-142. 10.3354/meps211131.

Takayama, Koji & Tamura, Mariko & Tateishi, Yoichi & Webb, Edward & Kajita, Tadashi. (2013). Strong genetic structure over the American continents and transoceanic dispersal in the mangrove genus *Rhizophora* (Rhizophoraceae) revealed by broad-scale nuclear and chloroplast DNA analysis. *American journal of botany*. 100. 10.3732/ajb.1200567.

Tomlinson, P. (2016). Seedlings and Seeds. In *The Botany of Mangroves* (pp. 135-153). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139946575.011

TOMLINSON, P. B.. Ecology. In: TOMLINSON, P. B.. **The Botany of Mangroves**. 2. ed. Cambridge: Cambridge, 2016. Cap. 2. p. 11-28.

VALLE-LEVINSON, Arnoldo. **Contemporary Issues in Estuary Physics**. Florida: Cambridge University Press, 2010.

Van der Stocken, Tom & Menemenlis, Dimitris. (2017). Modelling mangrove propagule dispersal trajectories using high-resolution estimates of ocean surface winds and currents. *Biotropica*. 49. 10.1111/btp.12440.

Van der Stocken, Tom & Vanschoenwinkel, Bram & De Ryck, Dennis & Bouma, Tjeerd & Dahdouh-Guebas, Farid & Koedam, Nico. (2015). Interaction between Water and Wind as a Driver of Passive Dispersal in Mangroves. *PLoS ONE*. 10. 10.1371/journal.pone.0121593.

WARNER, John C.. Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal Of Geophysical Research*, [s.l.], v. 110, n. 5, p.1-13, 2005. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2004jc002691>.

XAVIER, F. R. L. Análise da hidrodinâmica do rio Jaguaribe utilizando o modelo numérico delft3d. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

Wilks, D. S. (2019). *Statistical Forecasting. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 235–312. doi:10.1016/b978-0-12-815823-4.00007-9

WILLMOTT, Cort J.. ON THE VALIDATION OF MODELS. **Physical Geography**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.184-194, jul. 1981. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>.

Wolanski, E., & Elliott, M. (2016). Estuarine water circulation. *Estuarine Ecohydrology*, 35–76. doi:10.1016/b978-0-444-63398-9.00002-7.

Wolanski, Eric & Elliott, Michael. (2015). *Estuarine Ecohydrology: an introduction*.