



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

LIANA PACHECO BITTENCOURT

**VARIABILIDADE ESPACIAL E SAZONALIDADE DA CIRCULAÇÃO BAROTRÓPICA DA
PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ**

Fortaleza, Ceará

2013

LIANA PACHECO BITTENCOURT

**VARIABILIDADE ESPECIAL E SAZONALIDADE DA CIRCULAÇÃO BAROTRÓPICA DA
PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ**

Monografia apresentada junto ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, na área de Oceanografia Física, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira

Fortaleza, Ceará

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Rui Simões de Menezes

B542 Bittencourt, Liana Pacheco.

Variabilidade espacial e sazonalidade da circulação barotrópica da plataforma continental do Ceará /
Liana Pacheco Bittencourt - 2013.

66 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de
Oceanografia, Fortaleza, 2013.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Plataforma continental - Ceará. 2. Variabilidade espacial. 3. Estuários. I. Título.

CDD 551.483

LIANA PACHECO BITTENCOURT

**VARIABILIDADE ESPECIAL E SAZONALIDADE DA CIRCULAÇÃO BAROTRÓPICA DA
PLATAFORMA CONTINENTAL DO CEARÁ**

Monografia apresentada junto ao curso de Oceanografia da Universidade Federal do Ceará, na área de Oceanografia Física, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Profa. Dra. Maria Oziléa Bezerra de Meneses
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

A Deus.
Aos meus pais, Ana Cristina e Paulo.
Aos meus irmãos, Carol e Rodolfo.
À minha vizinha, Altair.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ana e Paulo, aos meus irmãos Rodolfo e Carol, à minha vizinha Altair e ao meu cunhado Afonso, que são os principais responsáveis pela pessoa que sou hoje e por terem sempre me apoiado, acreditado em mim e me encorajado a seguir meus sonhos.

A todos os meus grandes companheiros e amigos de curso (Consola, Pepe, Ceci, Jota, Bruno, Góis, Zé, Lôra, Pedryx, Luqueta, Mariah, Wersângela, Renan, Évila, Sem Vergoim, Pres, Giulli, Gabi, Lucas (Paty), Airton, 41, Pedro, Thiago...) e aos demais que tive o prazer de conhecer durante esses anos. Obrigada por todos os momentos bons vividos e por todos os ruins compartilhados e superados. Agradeço pelas felicidades, pelo companheirismo, pelas viagens, risadas, congressos, brincadeiras, ajudas nas cadeiras, apoio, abraços, conselhos, desabafos... Quero que saibam que eu nunca me esquecerei desses anos maravilhosos, que, com certeza, estarão sempre entre os melhores da minha vida.

Deixo aqui também o meu ‘muito obrigada’ às minhas amigas que não fazem Oceanografia, principalmente pela paciência quando eu sumia por causa da faculdade (hahaha) e, mesmo assim, sempre me apoiavam e tornaram esses anos incríveis.

Agradeço à Isabela, a todos os professores, mestrandos e doutorandos que me fizeram chegar até aqui, me deram oportunidades e sempre estiveram dispostos a tirar dúvidas e ajudar no que fosse possível.

Agradeço também a UFC pelas duas bolsas de monitoria, a todos do Laboratório de Biogeoquímica Costeira pela oportunidade de trabalhar voluntariamente e pela ajuda na confecção do Glossário, ao professor Eduardo Sávio pela bolsa de iniciação científica na FUNCEME e ao CNPq e a CAPES pela bolsa de graduação sanduíche na Espanha.

Obrigada à associação Atlantis e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do projeto “TRANSAQUA – Gestão e Segurança da Navegação e do Transporte Aquaviário: Desenvolvimento Ambientalmente Sustentável de Sistemas Marítimos e Fluviais” pela estrutura computacional disponível para realização dos trabalhos e pelas oportunidades de bolsa.

Agradeço especialmente ao meu orientador, Carlos, pela ajuda, dedicação e paciência, sem o qual nada disso seria possível.

Aos professores participantes da banca examinadora, Oziléa e Geraldo pelo tempo e pelas valiosas colaborações e sugestões.

O tempo e a maré não esperam por ninguém.

Robert Frost.

RESUMO

O estudo das marés e dos ventos é necessário para conhecer melhor os ambientes costeiros e vem sendo aprimorado nos últimos anos através da modelagem hidrodinâmica. O principal objetivo deste trabalho foi estudar a variabilidade espacial e sazonal da circulação barotrópica na plataforma continental do Ceará (PCCE). Pela primeira vez, a conectividade e os processos de dispersão de materiais provenientes dos sete principais estuários da região (Acará, Curú, Ceará, Cocó, Pacoti, Pirangi e Jaguaribe) são estudados através de traçadores passivos. O trabalho foi realizado através do uso do modelo ROMS. Foi confeccionada uma grade de alta resolução, que compreende o domínio entre 35,7° e 42° de longitude oeste e 1° e 5° de latitude sul. Foram realizados três experimentos, simulados durante 1 ano: o PCCE-1, forçado pelos dados de maré do modelo global TPXO 7.2, o PCCE-2, forçado pelos dados da média histórica mensal de ventos do satélite QuikScat e o PCCE-3, forçado com as duas forçantes. Para cada experimento, foi realizado o estudo da interconexão através da liberação de flutuadores na entrada de cada estuário da região. O modelo foi validado através de dados de nível do mar coletados nas estações do IBGE e do IHO (Porto do Mucuripe, Acará, Camocim e Timonha). Os valores de elevação variaram entre -1,7 e 1,6 m na sizígia e entre -0,8 e 0,7 m na quadratura. Os maiores foram encontrados na plataforma continental e a oeste do domínio. As correntes de maré variaram entre 0,005 e 0,78 m/s e apresentaram fluxo perpendicular à costa, apresentando movimentos cíclicos durante a vazante-enchente. As maiores intensidades estão a oeste do domínio e próximo à quebra da plataforma. As correntes residuais de maré variaram entre 0,0005 e 0,006 m/s e não apresentaram sentido predominante, sendo maiores a oeste e próximo à quebra da plataforma. As elevações devido ao vento variaram entre 0,0001 e 0,0015 m, sendo maiores no inverno devido a maior intensidade do vento. As correntes devido ao vento variaram entre 0,002 e 0,04 m/s, sendo também maiores no inverno. Não houve diferença significativa entre as elevações e as correntes nos experimentos PCCE-2 e PCCE-3, uma vez que a elevação e as correntes residuais são muito pequenas. As correntes geradas por vento e por maré residual e vento apresentaram sentido predominante para noroeste. A maré sozinha não é importante no transporte dos flutuadores na PCCE, enquanto que os resultados para vento e maré residual e vento mostraram a eficiência do vento no transporte na área de estudo, o que mostra que este é a principal forçante na conectividade entre os estuários. A conectividade se dá principalmente na direção leste-oeste. Apesar de mais intensas, as correntes de maré são cíclicas, o que torna a interação entre o vento e as correntes residuais de maré o principal agente transportador na PCCE.

Palavras-chave: correntes, nível do mar, plataforma continental do Ceará, modelagem hidrodinâmica.

ABSTRACT

The study of tides and winds, major forcing of the circulation within the continental shelf, has been improved in the last few years due to hydrodynamic modelling techniques. The objective of this study is to understand the spatial and seasonal barotropic circulation on the continental shelf of Ceará (PCCE). For the first time, the connectivity and dispersion processes of materials from the seven major estuaries in the region (Acaraú, Curú, Ceará, Cocó, Pacoti, Pirangi and Jaguaribe) is performed using passive floats. This study was done by using the ROMS model. A high-resolution grid between 35.7 ° and 42 ° W and 1 ° and 5 ° S is used in our studies. Three experiments were performed: PCCE-1, forced by tidal data from the global model TPXO 7.2; PCCE-2, forced by monthly climatology of winds data from the satellite QuikScat; and PCCE-3, with both forcings. For each experiment the model was ran for one year and the interconnection of estuaries is studied releasing floats in the entrance of each estuary. The model was validated using sea level data collected at IBGE and IHO stations (Porto do Mucuripe, Acaraú, Camocim and Timonha). The elevation values ranged from -1,7 to 1,6 m in the spring tide and between -0,8 and 0,7 m in neap tide. The largest values were found on the continental shelf and the western area. Tidal currents varied between 0,005 and 0,78 m/s and showed flow normal to the coast, presenting cyclic movements during the ebb-flood cycles. Higher intensities are in the west and near the shelf break. The residual tidal currents varied between 0,0005 and 0,006 m/s and showed no predominant direction, being higher in the west and near the shelf break. The elevation due to wind varied between 0,0001 and 0,0015 m, being higher in the winter due to increased wind speed. The wind driven currents varied between 0,002 and 0,04 m/s and are also higher during winter time. There was no significant difference between the elevations and the currents in the experiments PCCE-2 and PCCE-3, since the residual elevation and residual tidal currents are very small. The currents generated by wind and by wind and residual tide showed predominant northwesterly direction. The tide alone is not important in the transport of the floats in the PCCE when compared with the results for wind and wind and tides showing that the wind driven currents are the main forcing to the connectivity between the estuaries. The connectivity is mainly in east-west direction. Although more intense, tidal currents are cyclic, which makes the interaction between wind and residual tidal currents the main transport agent in PCCE.

Keywords: currents, sea level, Ceará continental shelf, hydrodynamic modelling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa da costa cearense e a região de estudo em destaque (PCCE). As linhas azul e vermelha demarcam as isóbatas de 100 m e 1000 m, respectivamente.	19
Figura 2. Mapa batimétrico da área de estudo com base nos dados do ETOPO5. As cores correspondem à profundidade, em metros.	20
Figura 3. Sistema anfidrômico do oceano Atlântico Sul.	21
Figura 4. Localização das estações disponibilizadas pelo IBGE e pelo IHO.	24
Figura 5. Grade numérica utilizada na área de estudo. As cores correspondem à profundidade, em metros.	25
Figura 6. Localização dos estuários dos rios Acaraú, Curú, Ceará, Cocó, Pacoti, Pirangi e Jaguaribe na costa cearense.	28
Figura 7. Comparação das médias históricas mensais das componentes meridional (v) e zonal (u), em m/s, do vento, obtidas com base nos dados do NCEP (em azul), do QuikScat (em vermelho) e dos dados das estações do INMET e da FUNCEME (em preto).	29
Figura 8. Direção e intensidade média do <i>stress</i> do vento (em Pa) durante os meses de verão (janeiro a março).	30
Figura 9. Direção e intensidade média do <i>stress</i> do vento (em Pa) durante os meses de inverno (junho a agosto).	30
Figura 10. Nível do mar (em metros) devido à maré durante a maré alta e a maré baixa, em sizígia e em quadratura.	36
Figura 11. Máxima corrente de vazante devido à maré durante a sizígia (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.	38
Figura 12. Máxima corrente de enchente devido à maré durante a sizígia (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.	38
Figura 13. Máxima corrente de vazante devido à maré durante a quadratura (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.	39
Figura 14. Máxima corrente de enchente devido à maré durante a quadratura (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.	39
Figura 15. Máxima corrente residual de vazante devido à maré durante a sizígia (em cm/s).	41
Figura 16. Máxima corrente residual de enchente devido à maré durante a sizígia (em cm/s).	42
Figura 17. Máxima corrente residual de vazante devido à maré durante a quadratura (em cm/s).	43
Figura 18. Máxima corrente residual de enchente devido à maré durante a quadratura (em cm/s).	44
Figura 19. Nível do mar (em metros) devido ao vento durante o verão.	46
Figura 20. Nível do mar (em metros) devido ao vento durante o inverno.	46
Figura 21. Velocidade média das correntes devido ao vento durante o verão. As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.	48
Figura 22. Velocidade média das correntes devido ao vento durante o inverno. As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.	49
Figura 23. Série temporal de elevação observada (em cm) devido à maré residual na estação do IBGE para o ano de 1955.	50
Figura 24. Série temporal de elevação modelada (em cm) devido à maré residual (vermelho), à maré residual e ao vento (azul) e ao vento (preto) nas quatro estações. A linha preta mais fina representa a elevação devido ao vento multiplicada por dez, para se observar a sazonalidade.	50
Figura 25. Comportamento dos flutuadores dos rios Acaraú (à esquerda) e Curú (à direita) forçados por maré. As cores representam a profundidade, em metros.	52
Figura 26. Comportamento dos flutuadores dos rios Ceará (à esquerda), Cocó e Pacoti (à direita) forçados por maré. As cores representam a profundidade, em metros.	52
Figura 27. Comportamento dos flutuadores dos rios Pirangi (à esquerda) e Jaguaribe (à direita) forçados por maré. As cores representam a profundidade, em metros.	53
Figura 28. Comportamento dos flutuadores dos rios Ceará (azul), Curú (preto) e Acaraú (vermelho), a	

- oeste do domínio, forçados por vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias. 54
- Figura 29.** Comportamento dos flutuadores dos rios Jaguaribe (verde), Pirangi (azul), Pacoti (preto) e Cocó (vermelho), a leste do domínio, forçados por vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias. 55
- Figura 30.** Comportamento dos flutuadores dos rios Ceará (azul), Curú (preto) e Acaraú (vermelho), a oeste do domínio, forçados por maré e vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias. 56
- Figura 31.** Comportamento dos flutuadores dos rios Jaguaribe (magenta), Pirangi (azul), Pacoti (preto) e Cocó (vermelho), a leste do domínio, forçados por maré e vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias. 57
- Figura 32.** Comportamento dos flutuadores liberados no estuário rio Acaraú forçados por maré (vermelho), por vento (magenta) e por maré e vento (azul). A linha preta representa isóbata de -15 m. 59
- Figura 33.** Série temporal das velocidades médias mensais (em m/s) em u e v devido à maré residual (azul), à maré residual e ao vento (vermelho) e ao vento (preto) para as quatro estações analisadas. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coordenadas das estações disponibilizadas pelo IBGE e pelo IHO.	24
Tabela 2. Características da grade implementada neste estudo.	26
Tabela 3. Significado e período das quatro principais constituintes harmônicas de maré. Fonte: Brown <i>et al.</i> (1999).	31
Tabela 4. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IBGE e modelados (mod) para a estação do Porto do Mucuripe.	32
Tabela 5. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação do Porto do Mucuripe.	32
Tabela 6. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação de Acaraú.	33
Tabela 7. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação de Camocim.	33
Tabela 8. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação de Timonha.	33
Tabela 9. Comparação entre a conectividade dos flutuadores forçados por vento e por maré e vento, em dias.	58

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	18
2.1. Objetivo geral	18
2.2. Objetivos específicos	18
3. ÁREA DE ESTUDO	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. O modelo <i>Regional Ocean Modelling System</i> (ROMS)	22
4.2. Conjunto de dados	22
4.3. Modelagem numérica e computacional	24
4.4. Experimentos	26
4.5. Análise crítica da forçante	28
4.6. Validação	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.4. Validação	32
5.5. Experimento PCCE-1: Circulação forçada por maré	35
5.6. Experimento PCCE-2: Circulação forçada por vento	44
5.7. Experimento PCCE-3: Circulação forçada por vento e maré residual	49
5.8. Estudo da interconexão entre os estuários (flutuadores)	51
6. CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

As áreas costeiras são de extrema importância para as populações, tanto no que diz respeito à economia, desempenhando papel fundamental como via de troca entre mercados, como por oferecer uma gama de recursos naturais e serviços vitais aos seres humanos (MOBERG; RÖNNBÄCK, 2003). Também merecem especial atenção por apresentarem altas taxas de produtividade, estando entre os mais ricos repositórios de organismos marinhos, e por serem as áreas que mais sofrem com impactos antrópicos sobre os estoques pesqueiros e com a poluição oriunda dos centros urbanos litorâneos (DAS, 1998).

Atividades humanas, como a pesca, as indústrias, a navegação e a recreação, estão centradas próximas às linhas de costa, onde o conhecimento da circulação oceânica torna-se necessário como suporte útil para o controle da poluição, a estimativa de intrusões salinas nos corpos d'água costeiros, o dimensionamento de obras e a contenção da erosão costeira, entre outros (DAS, 1998).

No aspecto físico, a zona costeira e a plataforma continental são ambientes bastante energéticos, nos quais as variações de temperatura da água, salinidade, correntes e nível do mar são mais expressivas do que em oceano aberto. As condicionantes hidrodinâmicas que regem a circulação da plataforma podem ser ranqueadas por vento, marés astronômicas, marés meteorológicas, campo de densidade, contribuição continental e ondas (e.g. BOWDEN, 1983; BROWN *et al.*, 2001). As escalas de tempo associadas a estes fenômenos estão relacionadas com a localização geográfica, o que determinará o regime de marés, o sistema de ventos e o aporte fluvial; a morfologia da plataforma continental e fisiografia da linha de costa, o que influenciará na interação com processos oceânicos de escala maior; e a proximidade de desembocaduras de estuários, o que afetará nos gradientes de densidade horizontais e verticais.

As correntes sobre a plataforma continental e as oscilações do nível do mar associadas a elas são manifestações da resposta das águas a diferentes forçantes. Em geral, estas forçantes atuam diretamente na plataforma, como os ventos e as variações espaciais de densidade, ou se comunicam desde o talude, tais como marés e gradientes de pressão (DIAS, 2011). Posto isto, torna-se importante conhecer a ligação entre as forçantes e os fenômenos oceanográficos para compreender melhor os ambientes costeiros e realizar um gerenciamento ambiental eficaz.

O estudo do movimento das marés como resultante do sistema de forças astronômicas é de grande importância, pois estas podem produzir correntes intensas, principalmente em regiões costeiras e estuarinas. O movimento oscilatório da maré pode ocasionar dois tipos principais de correntes: as

correntes de maré propriamente ditas e as correntes residuais de maré. Ambas representam alguns dos principais agentes dispersantes de poluentes, fitoplâncton, zooplâncton e nutrientes, atuando como algumas das mais importantes formas de entrada e saída de massa e energia para ecossistemas marinhos de alta produtividade (DE JESUS, 2011), além de poder causar o aumento da concentração de nutrientes nas camadas mais superficiais do oceano através da mistura (PEREIRA *et al.*, 2005).

As correntes de maré são causadas devido à subida e à descida do nível do mar, que fazem a água avançar em áreas fechadas através das correntes de enchente e recuar através das correntes de vazante, respectivamente (GARRISON, 2010). Apesar de normalmente apresentar velocidades elevadas, este movimento oscilatório de entrada e saída das correntes de maré não é o principal responsável pelo transporte de partículas e organismos no ambiente, papel este realizado pelas correntes residuais de maré.

Devido à diferença de batimetria, o fluxo mareal pode gerar correntes residuais causadas por interações não lineares (ZIMMERMAN, 1978) e estas normalmente exercem papel importante na circulação média local (JAROSZ; MURRAY; INONE, 2005), uma vez que nem sempre as correntes residuais apresentam o movimento cíclico, de vai-e-vem, característico das correntes de maré, o que faz com que sejam mais significantes no transporte em determinada área.

Tão significativa quanto à maré, o estudo do vento como forçante na zona costeira também é de fundamental importância. Quando o vento sopra sobre o oceano, energia é transferida para as camadas superficiais, podendo gerar ondas de gravidade e correntes. Além disso, o vento pode influenciar na elevação no nível do mar na costa e causar fenômenos de ressurgência ou subsidência que afetam a circulação local e influenciam a vida dos organismos.

A necessidade da melhor compreensão do movimento de massas d'água no oceano, principalmente em regiões costeiras, levou ao desenvolvimento e ao aprimoramento das técnicas de modelagem hidrodinâmica (LEMOS, 2006). A modelagem numérica de processos hidrodinâmicos no oceano tem como objetivo resolver as equações hidrodinâmicas básicas, como a equação de estado da água do mar, a equação da continuidade e a equação da conservação do movimento, através de métodos numéricos, a fim de simular processos em computador (HARARI; CAMARGO, 1994).

Diversos modelos hidrodinâmicos bidimensionais e tridimensionais foram criados e estão capacitados para aplicação de estudos de hidrodinâmica em mares e estuários. Estes modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente se consegue uma visão dinâmica dos processos complexos que ocorrem nestes ambientes costeiros (ROSMAN, 2001). Entre os modelos atualmente utilizados para o estudo da circulação hidrodinâmica costeira e oceânica, podem ser citados o *Princeton*

Ocean Model (POM); o *Advanced Circulation Model for Oceanic Coastal and Estuarine Waters* (ADCIRC); o *Navy Coastal Ocean Model* (NCOM); o *Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling* (OCCAM); e o *Regional Ocean Modelling System* (ROMS), entre outros, sendo o último a principal ferramenta de estudo utilizada neste trabalho.

Apesar da sua considerável importância, é fundamental a associação da modelagem numérica com a aquisição de dados oceanográficos obtidos *in situ*, pois estes servem como instrumento de calibração e de validação dos modelos, além de serem importantes por mostrarem as principais forçantes físicas que atuam na área de estudo (CIRANO, 2002).

Devido à importância no clima, no transporte e na circulação geral das propriedades, a região oceânica equatorial a oeste do Oceano Atlântico tem sido foco de diversos experimentos internacionais de Meteorologia e Oceanografia, como o TOGA (*Tropical Ocean Global Atmosphere*), SEQUAL (*Seasonal Response of Equatorial Atlantic*) e o FOCAL (*Français Ocean et Climat dans l'Atlantique Equatorial*). Porém, a região costeira equatorial do Oceano Atlântico localizada ao longo da costa da América do Sul é uma das menos estudadas do globo (SOARES; CASTRO, 1996), de forma que ainda há muito a ser feito para a adequada compreensão dos mecanismos de circulação na região.

Ao longo da extensão da plataforma continental do Ceará (PCCE), existem diversos atributos morfológicos, fisiográficos e oceanográficos que a tornam cientificamente interessante para a Oceanografia Física, como, por exemplo, a proximidade da Corrente Norte do Brasil, mudanças na orientação da costa, largura reduzida da plataforma, presença de vários estuários, entre outros. Embora seja evidente a importância científica, socioeconômica e ambiental e, ainda, à suscetibilidade a impactos ambientais da PCCE, existem poucas publicações na literatura especializada versando sobre a Oceanografia Física nesta região, tais como: Signorini e Miranda (1983); Vianna e Menezes (2006); Dias, Castro e Lacerda (2011); Schettini, Maia e Trucollo (2011). Estes trabalhos mostraram que a circulação na direção normal à costa é dominada pela forçante de maré semidiurna e modulada pela brisa marinha, enquanto que na direção paralela à costa a circulação é geralmente unidirecional e forçada principalmente pelo vento.

Apesar de a modelagem computacional ter se tornado importante para estudos de hidrodinâmica, apenas dois estudos utilizando esta ferramenta foram publicados sobre a circulação da PCCE. Nestes estudos, Soares e Castro (1996) estudaram a resposta barotrópica das águas da PCCE à forçante do vento estacionária e transiente através de um modelo numérico hidrodinâmico durante março de 1979, e Dias (2011) utilizou o modelo ROMS para o estudo da circulação sazonal das águas da PCCE ao largo da desembocadura do rio Jaguaribe em resposta ao vento forçante e à ação das marés, e a

influência da descarga fluvial do rio Jaguaribe na plataforma continental interna.

Neste contexto, o presente projeto visa preencher importantes lacunas sobre a dinâmica barotrópica da circulação na PCCE, ampliando a geração e a disseminação de conhecimentos sobre a região. A justificativa para o uso de modelo barotrópico é devido a observações do campo termohalino e pelo campo de correntes, que exibiram características quase-barotrópicas para a região (SOARES; CASTRO, 1996).

Tais conhecimentos servirão de subsídios para melhor gerenciamento costeiro e ambiental, consolidando as diversas atividades econômicas que garantem o desenvolvimento da economia do Estado e ajudando na preservação deste importante ecossistema.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudo da variabilidade espacial e da sazonalidade da circulação barotrópica da plataforma continental do Ceará (PCCE), quantificando e qualificando a conectividade entre os sistemas estuarinos da região, através da utilização do modelo *Regional Ocean Modelling System* (ROMS).

2.2. Objetivos Específicos

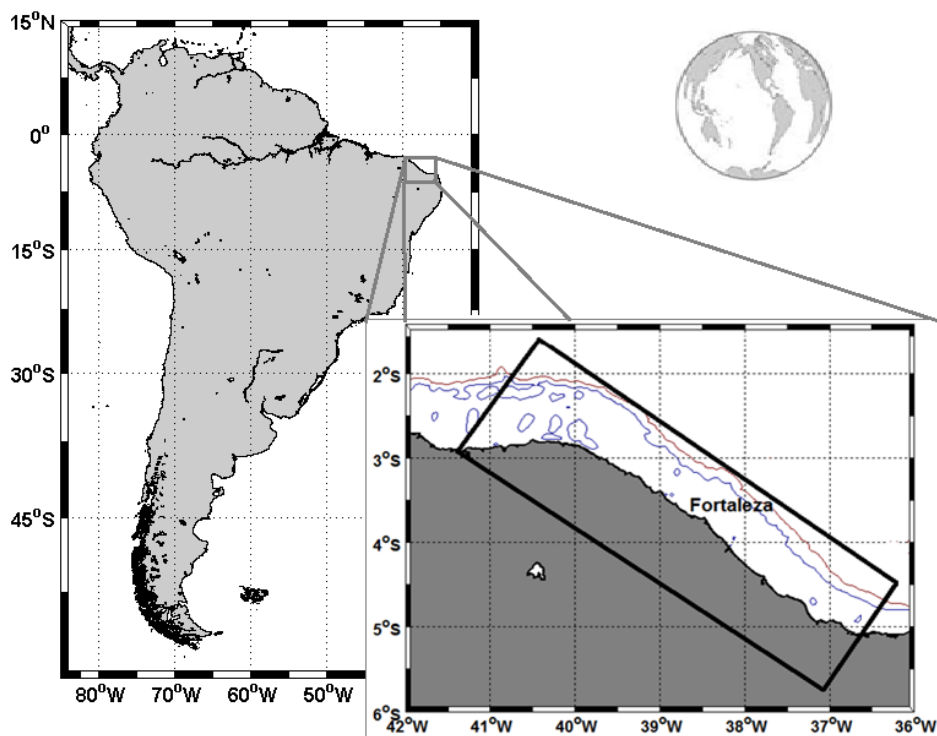
Determinar:

- A variabilidade espaço-temporal das circulações residual de maré, de maré e devido ao vento;
- A conectividade entre os principais sistemas estuarinos presentes na região, onde estão inclusos os estuários dos rios Acaraú, Curú, Ceará, Cocó, Pacoti, Pirangi e Jaguaribe;
- Os processos de transporte e de dissipação dos materiais provenientes de cada tributário da PCCE e a sua sensibilidade a diferentes forçantes, como a tensão de cisalhamento do vento e as marés.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada ao longo dos 578 km de área costeira do Estado do Ceará, que apresenta grande e importante diversidade de ecossistemas costeiros. Especificamente, a região da PCCE (Figura 1) possui reconhecida importância ecológica e socioeconômica para o Estado e para o País. A riqueza natural e a presença de ecossistemas com alta biodiversidade, como a significativa extensão de estuários, praias arenosas e cordões de dunas selecionadas por planícies flúvio-marinhas revestidas por manguezais (SEMACE, 1997) fazem da zona costeira cearense um ambiente particular e de extrema significância ecológica.

Figura 1. Mapa da costa cearense e a região de estudo em destaque (PCCE). As linhas azul e vermelha demarcam as isóbatas de 100 m e 1000 m, respectivamente.



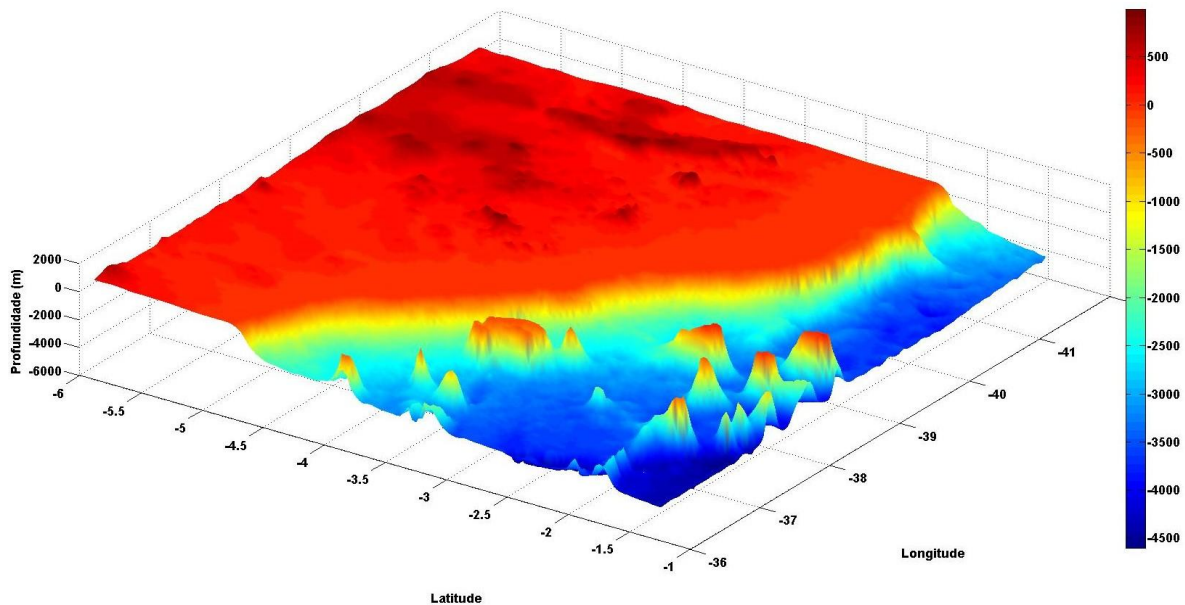
Fonte: o autor, 2013.

Algumas das principais atividades econômicas do estado estão relacionadas à região costeira, como, por exemplo, indústrias do turismo, carcinicultura, atividades porto-industrial e pesca predominantemente artesanal (SILVA; LIMA, 2011). A presença destas atividades na região a torna susceptível a diversos impactos ambientais, como à descarga de esgotos domiciliares e industriais sem tratamento, à poluição por resíduos sólidos, ao despejo de efluentes da carcinicultura, à liberação de

hidrocarbonetos pelas atividades portuárias, ao transporte de espécies exóticas através de água de lastro, às atividades de dragagem, entre outros.

A PCCE está localizada no nordeste do Brasil, na Margem Equatorial Atlântica, comumente denominada de Costa Semi-Árida, entre 36° e 42° O e 1° e 6° S, no Estado do Ceará. Apresenta profundidades variando entre 10 e 100 m e declividade média de 2 m.km⁻¹, sendo o relevo caracterizado pela presença de fundos relativamente planos, alternada com partes onduladas e feições irregulares de recifes de algas (DIAS, 2011). Sua largura máxima é encontrada a oeste, na altura da praia de Camocim, com 101 km de extensão, e a mínima na praia de Tremembé, no extremo leste, com 41 km, apresentando largura média em torno de 63 km (FREIRE, 1985). Nesta região, é possível observar algumas elevações no assoalho oceânico, tais como o terraço do Ceará e várias elevações crustais entre 2° 50' e 4° 30'S, normalmente associadas ao vulcanismo ocorrido na região (ZEMBRUSKI, 1979). O mapa batimétrico da região de estudo pode ser visualizado na Figura 2.

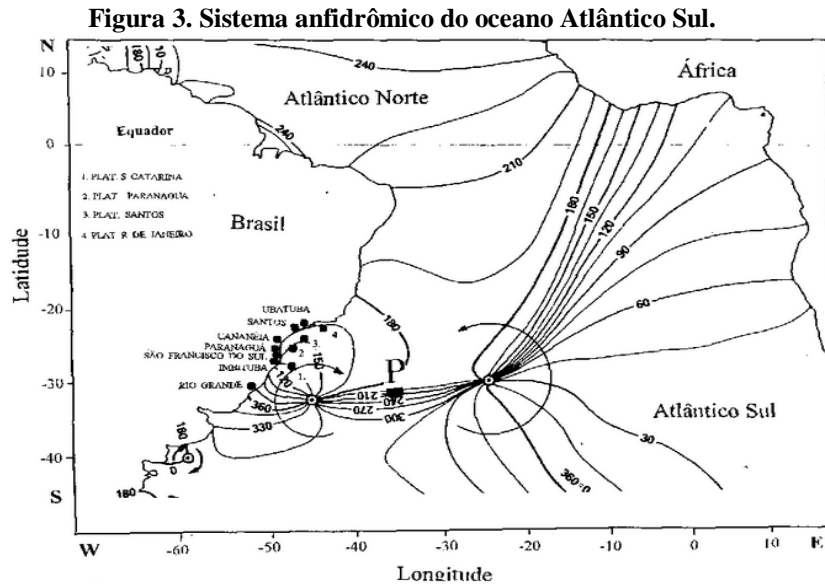
Figura 2. Mapa batimétrico da área de estudo com base nos dados do ETOPO5. As cores correspondem à profundidade, em metros.



Fonte: o autor, 2013.

As marés atuantes na costa estudada são do tipo semidiurna com amplitudes máximas verificadas de 3,3 m entre os anos de 1999 e 2001 (PINHEIRO; MORAIS; MEDEIROS, 2001). Pela análise integrada de levantamentos históricos, o regime de marés pode ser classificado como de mesomarés com alturas variando de 2 a 4 m. A costa cearense está sob influência do ponto anfidrômico do Atlântico Sul (Figura 3) e os principais constituintes harmônicos de maré e de correntes de maré na PCCE estão

representados pelas constituintes principais lunar semi-diurna (M2) e solar semi-diurna (S2), a principal lunar diurna (O1) e a lunar-solar diurna (K1) (DIAS, 2011).



Fonte: Mesquita e França (1998).

Medições realizadas no porto do Mucuripe pelo Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) demonstraram que as ondas apresentam tendência de distribuição de suas componentes em três direções: E, E-NE e E-SE. As correntes costeiras paralelas à costa possuem velocidades variando entre 0,24 e 0,31 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ próximo ao Porto do Mucuripe, enquanto as componentes normais à costa possuem velocidades entre 0,23 e 0,58 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, fluindo com direção preferencial para noroeste (MAIA, 1998).

Quanto ao regime de ventos, a zona costeira cearense é influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), formada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério norte com os ventos alísios do hemisfério sul (OLIVEIRA, 2009). Climatologicamente, a PCCE pode ser caracterizada por regime de ventos alísios de leste, cuja intensidade aumenta do verão para o inverno e a direção média é de 110° (RIEHL, 1965), podendo ocorrer variações sazonais devido à interação entre o fluxo médio e o sistema de ventos locais (KOUSKY, 1980), ou podendo variar na escala de tempo sinótica devido à penetração de frentes frias (KOUSKY, 1979).

A Corrente Norte do Brasil flui ao longo da quebra da plataforma, numa direção média de leste-sudeste para oeste-noroeste e, juntamente com a influência dos ventos alísios, promovem fluxo submareal médio sobre a plataforma em direção noroeste, mais intenso no inverno devido a maior intensidade dos ventos alísios de sudeste (OLIVEIRA, 2009).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 O modelo *Regional Ocean Modelling System* (ROMS)

O trabalho foi realizado através de abordagem climatológica através do uso de um modelo numérico barotrópico. O modelo escolhido foi o ROMS, um modelo comunitário com código aberto que está em contínuo processo de aperfeiçoamento e que conta com o suporte de diversos pesquisadores ao redor do mundo.

O ROMS é um modelo tridimensional de equações primitivas, de superfície livre, amplamente utilizado para estudos de águas costeiras (HAIDVOGEL *et al.* 2000), como, por exemplo: Maccready e Geyer (2001), Haidvogel *et al.* (2008), Powell *et al.* (2009), Teixeira (2010), Oliveira (2010), Dias (2011), entre outros.

Este é um modelo que resolve as equações fundamentais de conservação para a água do mar, sob as aproximações de águas rasas e de Boussinesq, principalmente. Utiliza coordenadas curvilíneas ortogonais no plano beta, onde os contornos costeiros podem também ser especificados como uma grade discretizada finita via máscara terra/mar (HAIDVOGEL *et al.*, 2000).

As condições de contorno para o ROMS são apropriadas para topografia e linha de costa irregular, para a superfície livre do mar e contornos oceânicos abertos. Inclui também forçantes, como o estresse do vento, fluxo de calor e aporte fluvial, e apresenta várias parametrizações de escala de subgrade (HAIDVOGEL *et al.*, 2000).

Informações mais detalhadas sobre o modelo ROMS podem ser obtidas em Shchepetkin e McWilliams (2005).

4.2 Conjunto de dados

4.2.1 Dados de ventos

O modelo foi forçado em superfície através de médias mensais climatológicas do vento fornecida pela média histórica dos dados do satélite SeaWinds/QuikScat, que foi obtida junto ao banco de dados da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), no *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC), para os anos de 1992 a 2011. O SeaWinds é um escaterômetro acoplado ao satélite QuikScat, utilizado como ferramenta para medir a direção e a velocidade do vento à 10 m da superfície do oceano, que opera na faixa de micro-ondas e apresenta resolução espacial de 25 km. Entre 3 e 20 m/s, a precisão sobre a intensidade do vento é de 2 m/s e a precisão sobre a direção é de 20 graus.

Vale ressaltar que os dados mensais climatológicos do QuikScat foram comparados com os dados

provenientes do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) Reanalysis-2 e apresentaram maior representatividade em relação aos dados *in situ*, sendo escolhidos como forçante do modelo, como será mostrado mais adiante (página 29).

O NCEP Reanalysis-2 fornece dados observados através de modelos globais que apresentam cobertura espacial de 2,5° de latitude X 2,5° de longitude e são disponibilizados de 6 em 6 h desde o ano 1979.

Os dados *in situ* utilizados na comparação foram obtidos de três estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas em Fortaleza, Acaraú e Jaguaruana para os anos de 1961 a 2012, e da estação da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) no aeroporto de Fortaleza para os anos 2000 a 2011.

4.2.2 Dados de maré

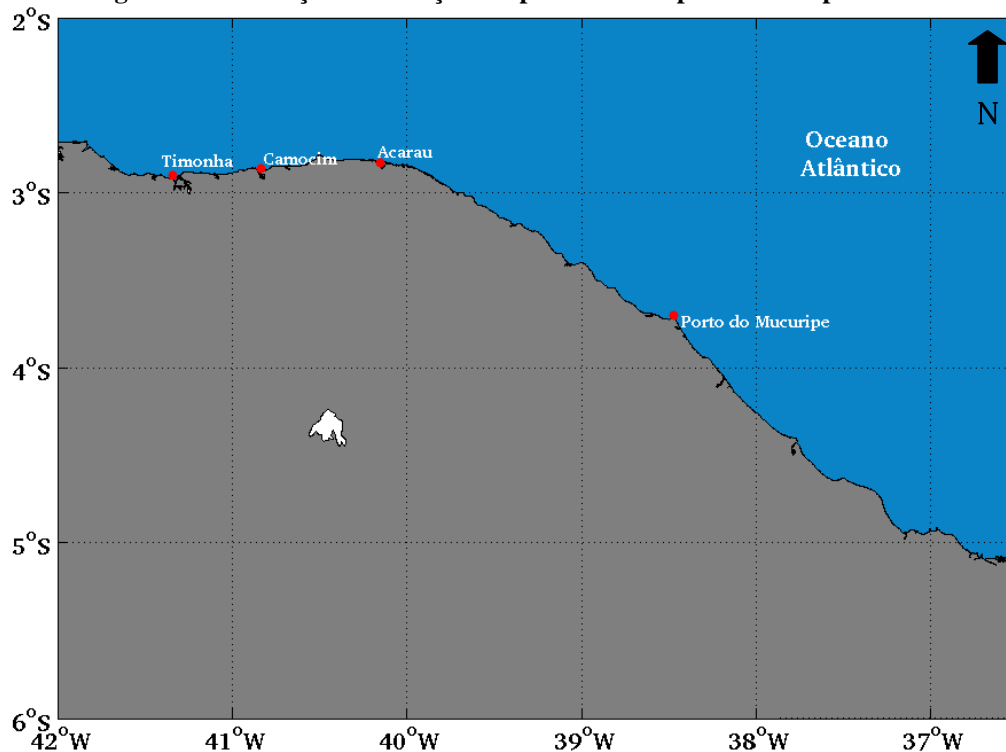
O modelo foi forçado nos contornos laterais pelos dados de maré do modelo global TPXO 7.2 (EGBERT; BENNET; FOREMAN, 1994) obtidos juntos ao OSU *Tidal Data Inversion*. Este modelo é uma versão atual de um modelo global de marés oceânicas baseado nos dados médios dos satélites TOPEX/Poseidon e Jason. O TPXO 7.2 foi obtido através de modelagem inversa de dados altimétricos da superfície do oceano e observações costeiras, e fornece amplitudes e fases de oito constituintes harmônicos primários (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 e Q1), mais dois de longo período e três não lineares com resolução de 0,25° (EGBERT; EROFEEVA, 2013).

Os harmônicos de marés utilizados para calibração e validação do modelo foram obtidos do banco de dados da *International Hydrographic Organization* (IHO) para as estações: Porto do Mucuripe, Acaraú, Camocim e Timonha. O outro banco de dados *in situ* utilizado foi da estação maregráfica do Porto do Mucuripe, fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), também para os anos de 1955 a 1968. Esse período foi escolhido por apresentar o maior registro contínuo de dados e por serem mais confiáveis. As características das estações podem ser visualizadas na Tabela 1 e suas localizações na Figura 4. Devido à proximidade entre as coordenadas das estações do Porto do Mucuripe do IBGE e do IHO, estas estão representadas pelo mesmo ponto no mapa.

Nos resultados apresentados posteriormente, o Porto do Mucuripe será utilizado como referência para dividir o domínio em leste e oeste.

Tabela 1. Coordenadas das estações disponibilizadas pelo IBGE e pelo IHO.

Estações	Latitude	Longitude
Porto do Mucuripe (IBGE)	3.71° S	38.48° O
Porto do Mucuripe (IHO)	3.70° S	38.47° O
Acaraú (IHO)	2.83° S	40.15° O
Camocim (IHO)	2.88° S	40.83° O
Timonha (IHO)	2.93° S	41.30° O

Figura 4. Localização das estações disponibilizadas pelo IBGE e pelo IHO.

Fonte: o autor, 2013.

4.3 Modelagem numérica e computacional

4.3.1 Confeção da grade

A grade numérica utilizada no modelo (Figura 5) foi confeccionada através do pacote de rotinas *easygrid*, que confecciona grades para o ROMS e arquivos de inicialização. Para a confeção da grade através do *easygrid*, foram necessários dados da linha de costa e da batimetria da área de estudo, que cobre toda a região da PCCE, entre 1° e 5° de latitude sul e 35,7° e 42° de longitude oeste.

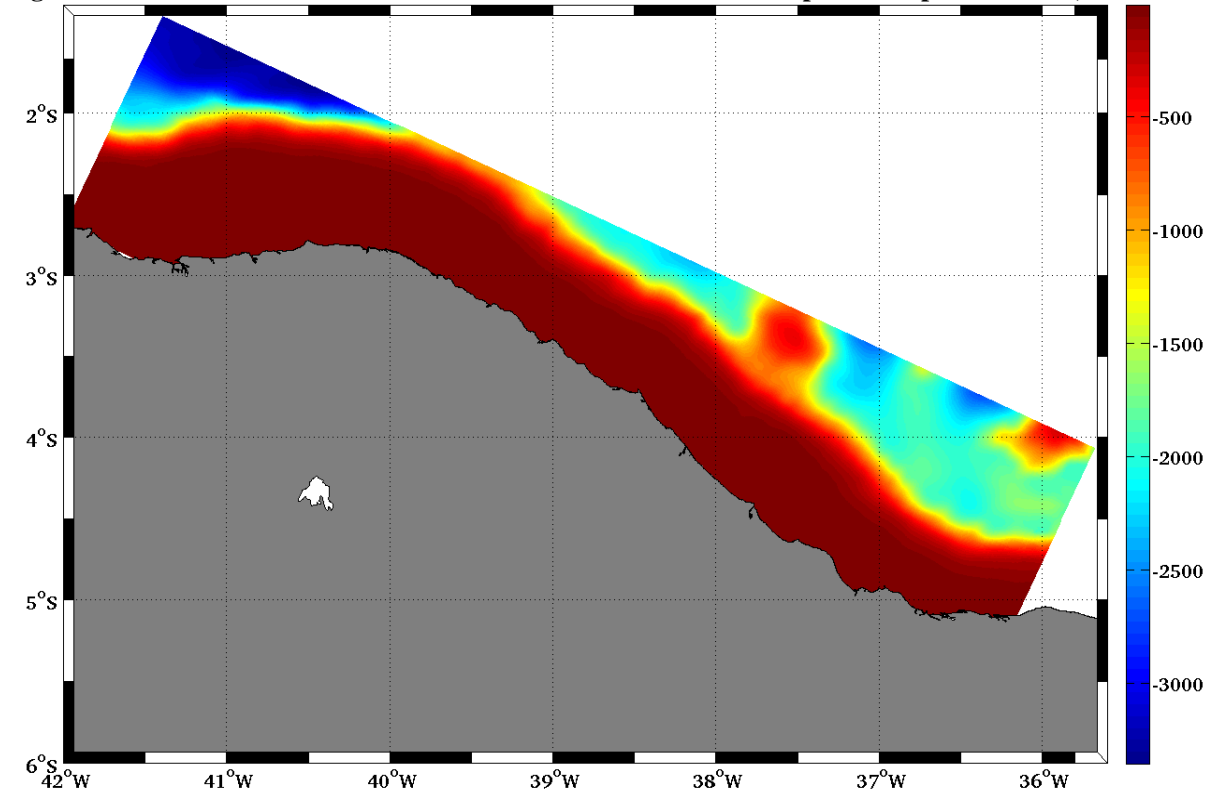
A linha de costa utilizada para a confeção da grade foi obtida através do banco de dados *Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shorelines (GSHHS)* da *National Geophysical Data Center (NGDC)*, que faz parte da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. O

GSHHS é um banco de dados de linha de costa de alta resolução, formado a partir de duas bases de dados de domínio público: o *World Data Bank II* (WDBII) da *Central Intelligence Agency* (CIA) e o banco de dados *World Vector Shoreline*.

A batimetria utilizada para a confecção da grade foi obtida a partir do conjunto de dados do ETOPO5 (*Earth Topography 5-minute*), fornecidos pela NOAA. O ETOPO5 é um banco de dados de elevação (em terra) e de batimetria (fundo do mar) definidos para toda a Terra em um espaçamento de grade de 5 minutos.

A grade foi rotacionada em 25° no sentido horário em relação ao paralelo, seguindo o procedimento usualmente adotado em estudos de hidrodinâmica da plataforma continental, orientando o eixo x paralelo à direção média das isóbatas e o eixo y normal a esta direção média (DIAS, 2011). O domínio tem 700 km de comprimento e 160 km de largura. A grade numérica é composta por 12636 pontos, sendo 234 na direção x e 54 na direção y , e apresenta alta resolução de 3×3 km, a fim de se resolver espacialmente os processos envolvidos na circulação e a complexa batimetria e morfologia da região.

Figura 5. Grade numérica utilizada na área de estudo. As cores correspondem à profundidade, em metros.



Fonte: o autor, 2013.

As características da grade implementada neste estudo podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da grade implementada neste estudo.

Propriedades da grade	Valores
Latitude	1 a 5° S
Longitude	35.7 a 42° O
Profundidade mínima	4 m
Profundidade máxima	3353 m
Pontos da grade na direção Y	54
Pontos da grade na direção X	234
Número de níveis	1

4.3.2. Configuração do modelo

O período de simulação de todos os experimentos foi de 1 ano, utilizando como condição inicial os campos de elevação e velocidade nulos.

Foram usadas as condições de contorno de radiação de Chapman e Flather (FLATHER, 1976; CHAPMAN, 1985; MARCHESIELLO, MCWILLIAMS e SHCHEPETKIN, 2001) para a elevação e o campo externo de velocidade, respectivamente, em todos os limites. O campo de densidade foi mantido constante e o passo de tempo foi de 10 segundos.

4.4 Experimentos

4.4.1. Implementação do experimento PCCE-1

O experimento PCCE-1 foi forçado apenas com a componente de maré com o uso dos harmônicos extraídos do TPXO 7.2. Este experimento tem o intuito de investigar a variabilidade espaço-temporal da circulação de maré e de sua componente residual. Para determinação da componente residual, foi realizada análise harmônica (PAWLOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002) nos campos de velocidade e de elevação, filtrando os dados e fornecendo diretamente a circulação residual de maré.

Para efeito de comparação, foram analisados os valores de nível do mar, de correntes de maré e de corrente residual durante a preamar e a baixa-mar das máximas sizígia e quadratura encontradas durante o período estudado, utilizando o porto do Mucuripe como referência. Também foram realizadas séries temporais da elevação e da velocidade em u e em v .

4.4.2. Implementação do experimento PCCE-2

Para avaliação da variabilidade espacial e temporal da circulação e do campo de elevação devido ao

vento e para comparação com a circulação residual de maré na PCCE, o modelo foi forçado pela média histórica mensal dos dados do satélite QuikScat.

Para efeito de comparação, foram analisadas a elevação média e as correntes médias durante o verão e o inverno. Também foram realizadas séries temporais da elevação e da velocidade em u (componente x) e em v (componente y).

4.4.3. Implementação do experimento PCCE-3

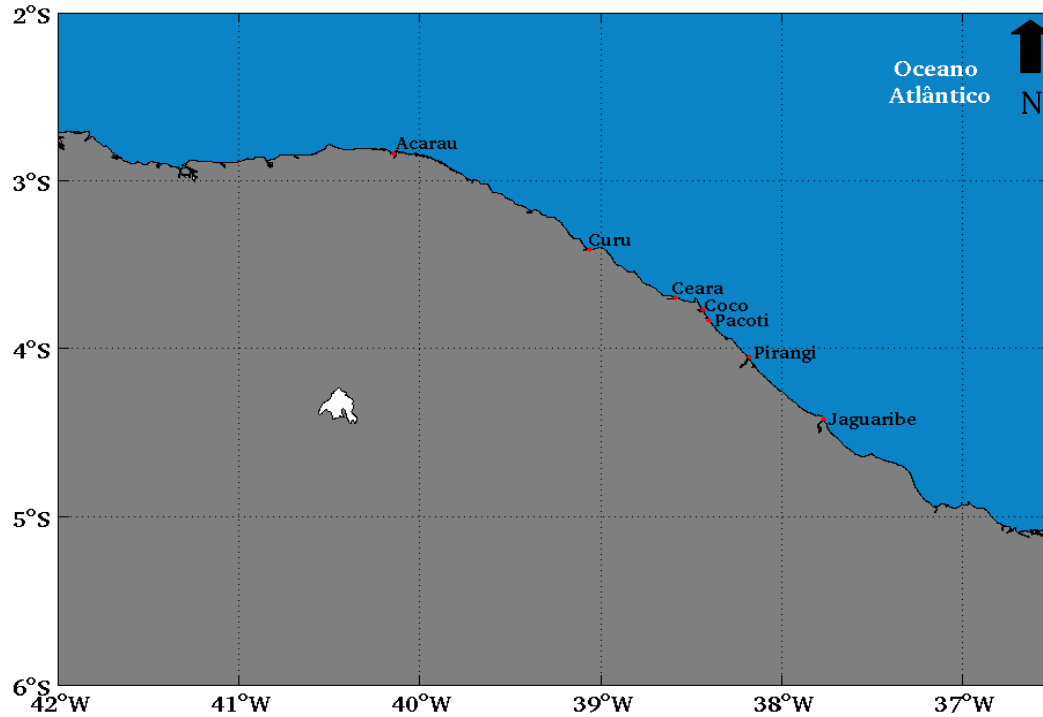
Para a análise da variabilidade espacial e temporal da circulação devido à maré e ao vento na área de estudo, o modelo foi forçado utilizando as constituintes harmônicas do modelo global TPXO 7.2 e a média histórica mensal dos dados do QuikScat. Os dados residuais maré-vento (componente de maré retirada) foram obtidos filtrando os dados através da análise harmônica nos campos de velocidade e de elevação.

Para efeito de comparação, foram analisados os valores de elevação e de correntes residual maré-vento durante as preamares e as baixa-mares das máximas sizígia e quadratura durante o período estudado, utilizando o porto do Mucuripe como referência. Também foram realizadas séries temporais da elevação e da velocidade em u e em v .

4.4.4. Estudo da interconexão entre os estuários

A interconexão entre os sete principais estuários do Ceará, os dos rios Acaraú, Curú, Ceará, Cocó, Pacoti, Pirangi e Jaguaribe (Figura 6), foi estudada através da liberação de 30 flutuadores no ponto de grade mais próximo ao local de descarga destes rios. Os primeiros flutuadores foram liberados no quinto dia e os outros foram liberados novamente a cada 30 dias durante 1 ano de simulação. Através do acompanhamento da trajetória dos flutuadores, foi determinada a conectividade entre os estuários e a dispersão de materiais provenientes destes tributários.

Figura 6. Localização dos estuários dos rios Acaraú, Curú, Ceará, Cocó, Pacoti, Pirangi e Jaguaribe na costa cearense.



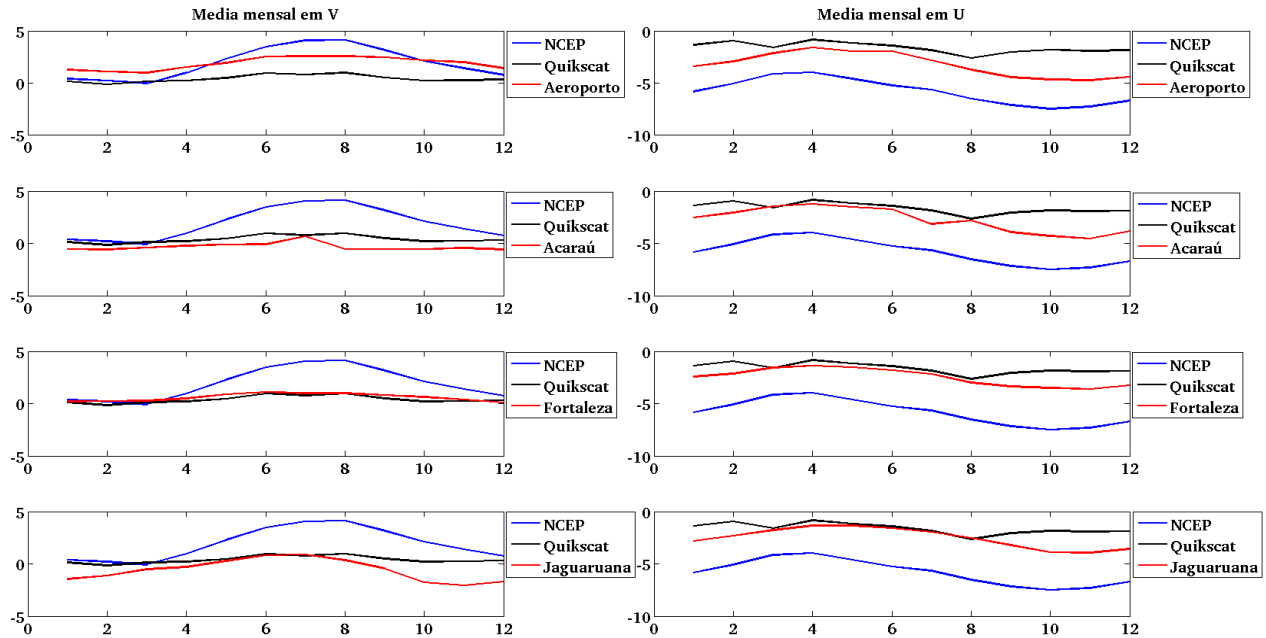
Fonte: o autor, 2013.

4.5. Análise crítica da forçante

Os dados de ventos fornecidos pelo NCEP, QuikScat, INMET e FUNCEME foram tratados com a finalidade de se obter as velocidades médias mensais das componentes horizontal (u) e vertical (v) do vento e a consequente média histórica para cada um. Para determinação do melhor forçante das simulações as médias históricas do NCEP e do QuikScat foram comparadas com as do INMET e da FUNCEME.

De forma geral, os dados do NCEP superestimaram os valores reais observados (Figura 7), enquanto a média histórica do QuikScat apresentou maior semelhança com os dados *in situ* fornecidos pelas estações do INMET e da FUNCEME. Assim, os dados mensais do QuikScat foram usados para calcular a tensão de cisalhamento do vento (*stress*) utilizada como forçante de superfície nas simulações.

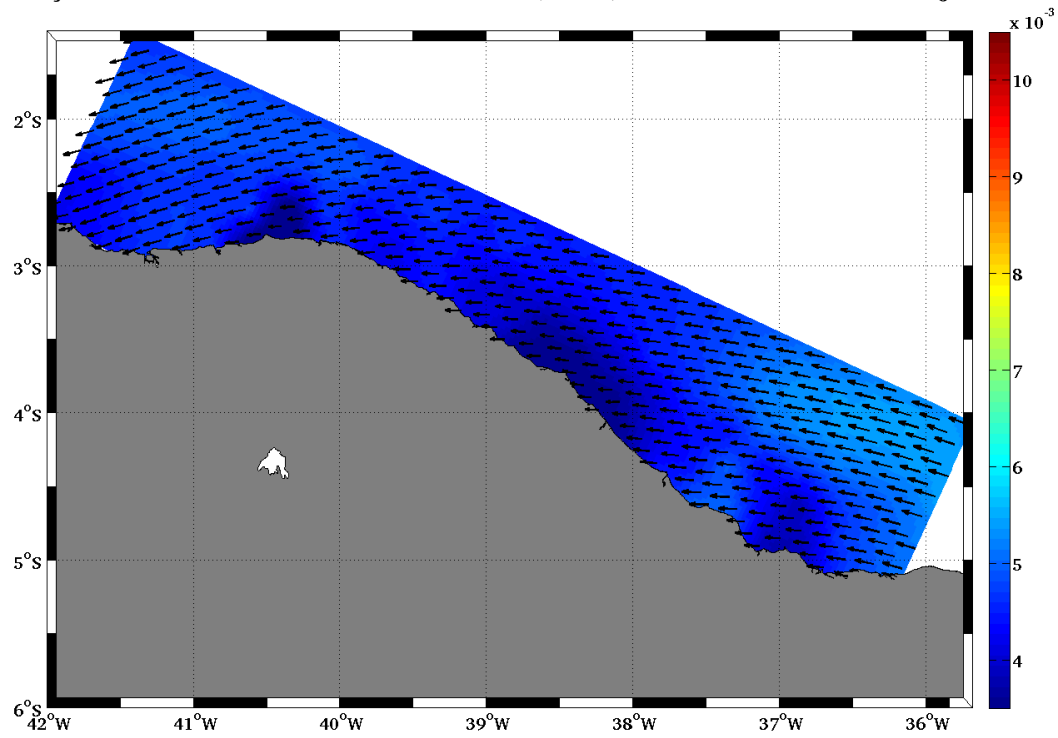
Figura 7. Comparação das médias históricas mensais das componentes meridional (v) e zonal (u), em m/s, do vento, obtidas com base nos dados do NCEP (em azul), do QuikScat (em vermelho) e dos dados das estações do INMET e da FUNCEME (em preto).



As figuras 8 e 9 mostram as médias mensais do *stress* do vento para os meses de verão (janeiro, fevereiro e março) e inverno (junho, julho e agosto), respectivamente. Nota-se que, durante o verão (Figura 8), a direção média dos dados utilizados foi de nordeste, com valores médios entre 0,004 e 0,007 Pa. Já para o inverno (Figura 9), a direção média dos dados de *stress* do vento foi de leste, com valores médios variando entre 0,006 e 0,01 Pa, de forma geral maiores que os valores durante o verão. Os valores de velocidade correspondentes aos *stress* mínimo e máximo utilizados na simulação são 1,7 e 3 m/s, respectivamente.

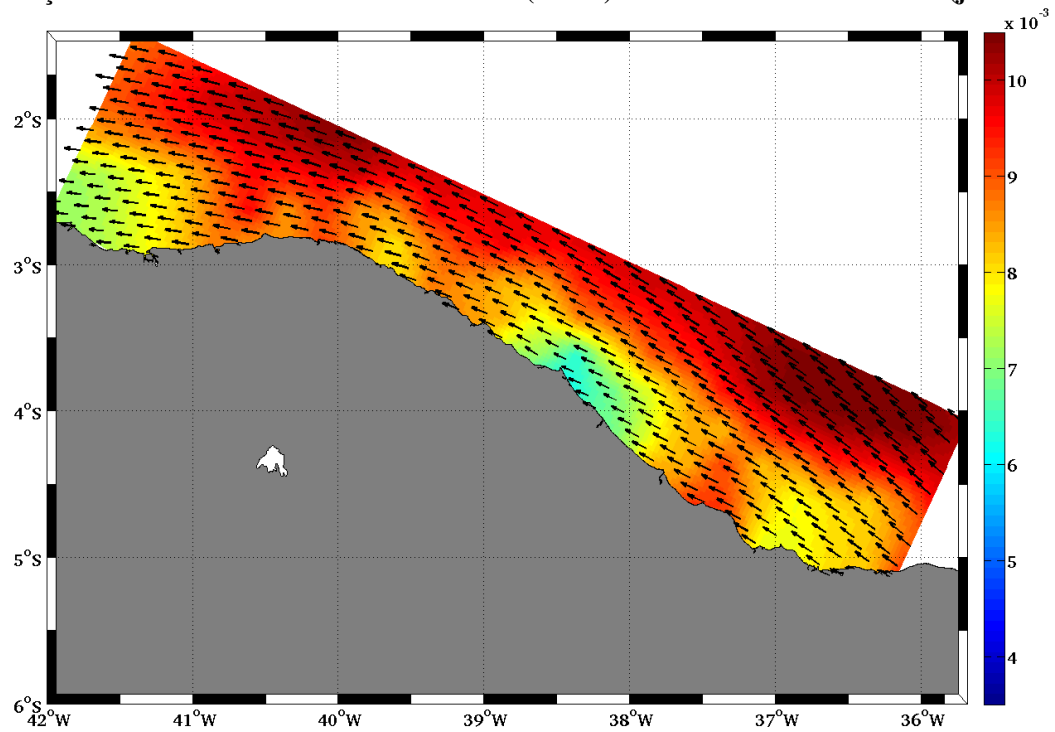
O *stress* do vento foi obtido através do pacote de rotinas *stresslp*, que se baseia em Large e Pond (1981) para fornecer os valores de *stress* do vento a partir dos dados de velocidade (em m/s) e da altura da superfície do mar a qual o vento foi medido.

Figura 8. Direção e intensidade média do *stress* do vento (em Pa) durante os meses de verão (janeiro a março).



Fonte: o autor, 2013.

Figura 9. Direção e intensidade média do *stress* do vento (em Pa) durante os meses de inverno (junho a agosto).



Fonte: o autor, 2013.

4.6. Validação

Para validação dos resultados da simulação PCCE-1, forçada apenas por marés, foram usados os resultados de elevação do modelo obtidos nos pontos da grade mais próximos às quatro estações do IHO e à estação do IBGE (Tabela 1). Foram realizadas análises harmônicas destes dados de elevação através do pacote de rotinas T_TIDE (PAWLOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002) e as amplitudes e as fases das principais constituintes harmônicas (M2, S2, K1 e O1) (Tabela 3) foram comparadas com os valores fornecidos pelo IHO e IBGE.

Tabela 3. Significado e período das quatro principais constituintes harmônicas de maré. Fonte: Brown *et al.* (1999).

Constituinte Harmônica	Significado	Período (h)
M2	Principal lunar semi-diurna	12,42
S2	Principal solar semi-diurna	12,00
K1	Lunar-solar diurna	23,93
O1	Principal lunar diurna	25,82

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4. Validação

As tabelas abaixo mostram a comparação entre as amplitudes e as fases das principais constituintes harmônicas modeladas e observadas na estação do IBGE (Tabela 4) e nas quatro estações do IHO (Tabelas 5 a 8). O sinal negativo indica que os dados modelados foram menores que os observados.

Tabela 4. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IBGE e modelados (mod) para a estação do Porto do Mucuri.

Porto do Mucuri								
Constituintes	Amp.obs. (cm)	Amp. mod. (cm)	Δ Amp. (cm)	Erro amp. (%)	Fase obs. (°)	Fase mod. (°)	Δ Fase (°)	Erro de fase (%)
M2	91,47	97,54	6,07	6,64	332,95	328,10	-4,85	-1,46
S2	30,25	31,76	1,51	4,99	358,09	356,36	-1,73	-0,48
K1	7,42	7,15	-0,27	-3,64	324,73	327,27	2,54	0,78
O1	6,78	6,32	-0,46	-6,78	278,73	278,00	-0,73	-0,26

As amplitudes observadas para a estação do IBGE e as amplitudes modeladas foram bastante similares. O maior erro de amplitude foi de 6,78% para a constituinte O1, que representa variação de amplitude de 0,46 cm, enquanto que o menor foi de 3,64% para a constituinte K1, com variação de 0,27 cm.

Assim como as amplitudes, as fases mostraram alta similaridade de valores entre os dados do IBGE e os modelados, o que mostra o grau de representatividade da hidrodinâmica simulada. Todas as constituintes apresentaram erros de fase menores que 1,50%, sendo que o maior foi de 1,46% para a constituinte M2, com variação de fase de 4,85°, enquanto que o menor foi para a constituinte O1, que representou variação de 0,73°.

Os valores de amplitude modelados para M2 foram similares aos encontrados por Castro (1996), que apresentou amplitudes de, aproximadamente, 90 cm na região do talude norte-nordeste do Brasil.

Tabela 5. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação do Porto do Mucuri.

Porto do Mucuri								
Constituintes	Amp.obs. (cm)	Amp. mod. (cm)	Δ Amp. (cm)	Erro amp. (%)	Fase obs. (°)	Fase mod. (°)	Δ Fase (°)	Erro de fase (%)
M2	71,14	97,76	26,62	37,42	251,95	210,02	41,93	16,64
S2	24,32	31,76	7,44	30,55	274,22	236,48	37,74	13,76
K1	6,70	7,18	0,48	7,16	290,03	258,24	31,79	10,96
O1	6,00	6,34	0,34	5,67	249,04	233,06	15,98	6,42

Foram observados maiores valores de amplitude nos harmônicos obtidos com base nos dados de elevação fornecidos pelo IBGE (Tabela 4) comparados aos harmônicos fornecidos pelo IHO (Tabela 5) para o Porto do Mucuripe. Comparando-se com os resultados da simulação, houve maior discrepância de amplitudes e de fases em relação ao IHO e alta similaridade com os do IBGE. Posto isto, os dados do IHO devem ser utilizados com cautela, uma vez que, por estarem subestimados em relação aos do IBGE, não foi possível afirmar se os mesmos são precisos para a região.

Apesar disto, os dados do IHO foram utilizados por serem os únicos disponíveis para outras regiões do Estado do Ceará.

Tabela 6. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação de Acaraú.

Acaraú								
Constituintes	Amp.obs. (cm)	Amp. mod. (cm)	Δ Amp. (cm)	Erro amp. (%)	Fase obs. ($^{\circ}$)	Fase mod. ($^{\circ}$)	Δ Fase ($^{\circ}$)	Erro de fase (%)
M2	97,43	106,07	8,64	8,87	233,87	213,08	-20,79	8,89
S2	24,71	34,29	9,58	38,77	258,33	239,70	-18,63	7,21
K1	8,58	7,90	-0,68	-7,93	311,36	254,87	-56,49	18,14
O1	4,19	7,05	2,86	68,26	238,11	236,98	-1,13	0,47

Tabela 7. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação de Camocim.

Camocim								
Constituintes	Amp.obs. (cm)	Amp. mod. (cm)	Δ Amp. (cm)	Erro amp. (%)	Fase obs. ($^{\circ}$)	Fase mod. ($^{\circ}$)	Δ Fase ($^{\circ}$)	Erro de fase (%)
M2	113,14	120,78	7,64	6,75	231,17	215,76	-15,41	6,67
S2	35,72	39,33	3,61	10,11	261,53	242,63	-18,9	-7,23
K1	7,29	8,38	1,09	14,95	273,97	254,11	-19,86	7,25
O1	7,80	7,45	-0,35	-4,49	234,05	238,38	4,33	1,85

Tabela 8. Comparação dos dados de amplitude (cm), fase (graus), a diferença entre eles (Δ) e os erros percentuais para os dados observados (obs) fornecidos pelo IHO e modelados (mod) para a estação de Timonha.

Timonha								
Constituintes	Amp.obs. (cm)	Amp. mod. (cm)	Δ Amp. (cm)	Erro amp. (%)	Fase obs. ($^{\circ}$)	Fase mod. ($^{\circ}$)	Δ Fase ($^{\circ}$)	Erro de fase (%)
M2	115,43	121,35	5,92	5,13	236,16	216,72	-19,44	8,23
S2	36,72	39,33	2,61	7,11	263,53	243,49	-20,04	7,60
K1	12,27	8,52	-3,75	-30,56	284,06	253,52	-30,54	10,75
O1	8,30	7,54	-0,76	-9,16	241,74	238,74	-3,00	1,24

Os resultados para Acaraú, Camocim e Timonha apresentaram maiores diferenças de amplitudes e fases que o Porto do Mucuripe. Estas diferenças chegam a 38,77 e 68,26% para as componentes S2 e

O1 na estação de Acaraú (respectivamente), 14,95% para K1 na estação de Camocim e 30,56% K1 na estação de Timonha. Porém, para a maioria das outras constituintes em todas as estações, os erros foram menores que 11%, estando os menores erros relacionados às constituintes M2 e S2, que representam a maior parte da variabilidade do nível do mar da região. Além disto, nota-se que, com exceção das componentes diurnas, o modelo está sempre superestimando as amplitudes do IHO, e as amplitudes do IHO observadas para o Porto do Mucuripe estão subestimadas em relação ao IBGE.

Todas as fases modeladas e observadas pelo IHO apresentaram erros de fase menores que 20%, sendo o maior de 18,14% para a constituinte K1 na estação de Timonha, com variação de 56,4°, e o menor de 0,47% para a constituinte O1 na estação de Acaraú, com variação de 1,13°.

As diferenças de fase entre as principais constituintes (M2 e S2) são similares quando se compara os dados modelados e os dados observados nas estações do IHO, o que indica que o erro de fase do modelo é aceitável.

Nos dois bancos de dados *in situ* e na modelagem, os maiores valores de amplitude estão associados à constituinte M2, seguida pelas constituintes S2, K1 e O1 para todas as estações analisadas, corroborando com os resultados apresentados por Dias (2011). A partir das constituintes harmônicas calculadas, foi determinado o número de forma (Equação 1), que caracteriza o tipo de maré, definido como a razão entre a soma das amplitudes das principais constituintes diurnas e semidiurnas (DEFANT, 1961), onde:

$$F = (K1 + O1)/(M2 + S2) \quad (1)$$

Em todas as estações, F apresentou valores menores que 0,25, o que mostra o domínio das constituintes semidiurnas (M2 e S2) na área de estudo, caracterizando a maré da região como semi-diurna, resultado também encontrado por Freire (1985).

As maiores amplitudes observadas e modeladas para todas as constituintes foram encontradas na estação em Timonha, seguida por Camocim, Acaraú e Porto do Mucuripe, com exceção da amplitude observada da constituinte O1, que foi menor em Acaraú. Uma justificativa para esta maior amplitude em direção a oeste do domínio pode ser devido a maior distância do ponto anfifrômico do Atlântico Sul, uma vez que, quanto mais distante deste, maior é a amplitude da maré (MESQUITA; FRANÇA, 1998).

5.5. Experimento PCCE-1: Circulação forçada por maré

Nesta seção, serão apresentados os resultados da simulação forçada pela componente de maré com o uso dos harmônicos extraídos do TPXO 7.2.

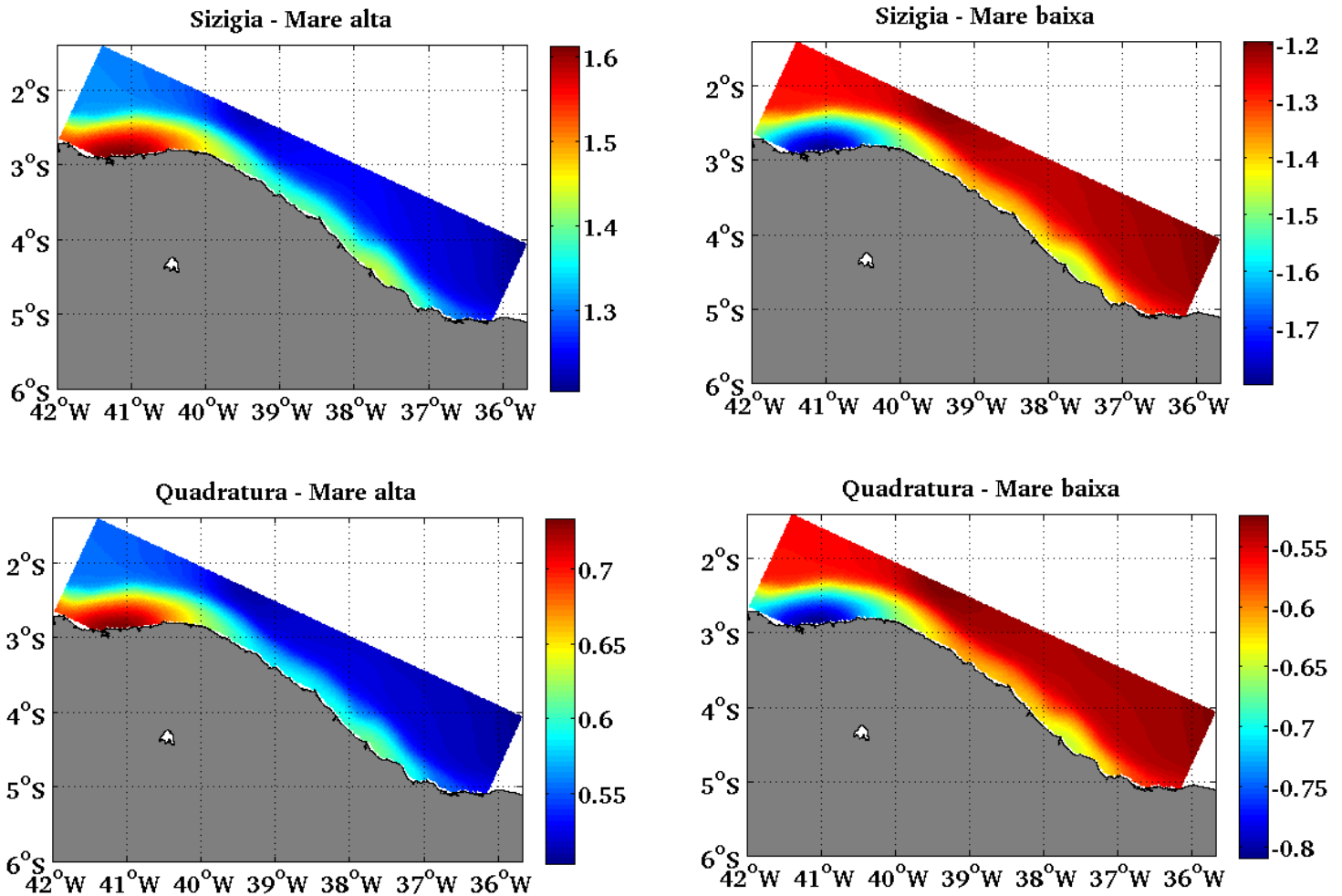
a) Nível do mar

As maiores elevações de nível do mar (Figura 10) foram encontradas na plataforma continental, devido às menores profundidades, com destaque para extremos de elevação a oeste. Os maiores valores foram encontrados durante a preamar de sizígia, variando entre 1,3 e 1,6 m, e os menores durante a baixa-mar de sizígia, entre -1,7 e -1,2 m.

Os maiores valores para a quadratura também foram encontrados na plataforma continental, com destaque para extremos de elevação a oeste. Os valores são menores que os encontrados na sizígia, entre 0,55 e 0,7 m na maré alta e -0,8 e -0,55 m na maré baixa.

Este resultado era esperado, posto que os maiores valores de elevação do nível do mar estão relacionados às marés de sizígia, quando os astros (Sol e Lua) estão alinhados e têm seu efeito potencializado, incrementando a elevação causada pelas marés. Além disto, a região a oeste do domínio apresenta maiores valores devido a maior distância do ponto anfidrômico do Atlântico Sul.

Figura 10. Nível do mar (em metros) devido à maré durante a maré alta e a maré baixa, em sizígia e em quadratura.



A altura máxima da maré, que corresponde à diferença entre uma máxima preamar e uma máxima baixa-mar consecutivas, na área de estudo foi de, aproximadamente, 3,3 m, o que a considera como mesomaré segundo a classificação de Davies (1964). Este resultado corrobora com a classificação proposta por Davies (1980) para o litoral cearense, com alturas máximas em torno de 3,1 m, e com os estudos realizados por Morais (1980); Maia (1998); Pinheiro, Morais e Medeiros (2001); e Schettini, Maia e Trucollo (2011), que também encontraram máximos em torno de 3 m.

b) Correntes de maré

As figuras abaixo representam as máximas correntes durante a vazante de sizígia (Figura 11), a enchente de sizígia (Figura 12), a vazante de quadratura (Figura 13) e a enchente de quadratura (Figura 14).

No geral, as correntes apresentam intensidades menores que 0,8 m/s, estando os maiores associados

à sizígia e os menores à quadratura. As correntes de enchente durante a sizígia apresentaram valores entre 0,045 e 0,78 m/s e foram um pouco mais intensas que as de vazante, com valores entre 0,042 e 0,7 m/s. O mesmo foi observado durante a quadratura, com as correntes de enchente apresentando valores entre 0,016 e 0,38 m/s, e as de vazante entre 0,005 e 0,34 m/s.

Em todas as ocasiões, as maiores intensidades de corrente são encontradas próximos à quebra da plataforma, com destaque para os extremos a oeste do domínio, aproximadamente entre 39,5 e 41,5° O, estando os menores fluxos associados à parte central. Através da análise dos mapas de elevação devido à maré (Figura 10, página 36), é possível observar maiores gradientes de elevação próximos à quebra da plataforma e a oeste da área de estudo, o que poderia justificar os maiores valores das correntes.

Resultados similares foram apresentados por Dias (2011), onde as maiores elipses de maré estavam localizadas na plataforma média e a orientação do eixo principal das elipses na direção normal às isóbatas acompanhou intensificação das correntes de maré na região da quebra da plataforma na porção leste da PCCE; e por DiMarco e Reid (1998) na plataforma continental de Texas-Louisiana, que encontraram maiores valores de corrente devido às constituintes semidiurnas na plataforma média e atribuíram este comportamento a processos de amplificação da largura da plataforma.

Os valores encontrados na região ao largo do rio Jaguaribe são similares aos coletados por Dias (2011) para o período de 13 de junho a 14 de outubro de 2009, com valores entre -0,34 e 0,31 m/s (estação de seca), e entre -0,36 e 0,34 m/s (estação de chuva).

Também houve similaridade entre os valores encontrados aqui e os apresentados por Signorini e Miranda (1983), com as correntes de maré apresentando valores entre 30 e 40 cm/s (0,3 e 0,4 m/s) durante maré de sizígia equinocial.

As correntes de vazante tanto na sizígia, como na quadratura, apresentaram fluxo perpendicular à costa e às isóbatas em direção à plataforma continental, não havendo fluxo preferencial para leste ou oeste. As correntes de enchente na sizígia e na quadratura também apresentaram fluxo perpendicular à costa e às isóbatas, em direção ao continente. Estes resultados estão de acordo com as elipses de maré (não mostradas aqui) encontradas para o Porto do Mucuripe. Para a constituinte M2, o eixo maior (perpendicular à costa) é, aproximadamente, oito vezes maior que o eixo menor (paralelo à costa), com valores de 0,0589 e 0,0069 m, respectivamente. Já para a constituinte S2, o eixo maior foi cerca de quatro vezes maior que o eixo menor, com valores de 0,0197 e 0,0048 m, respectivamente.

Figura 11. Máxima corrente de vazante devido à maré durante a sizígia (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.

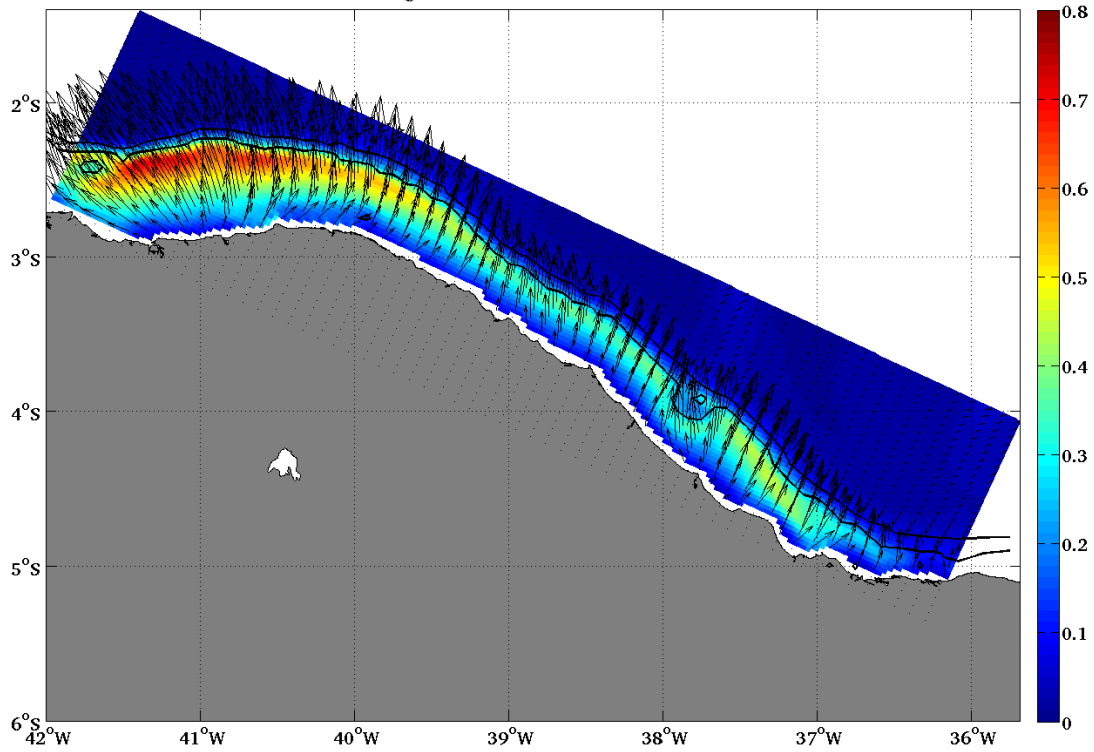


Figura 12. Máxima corrente de enchente devido à maré durante a sizígia (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.

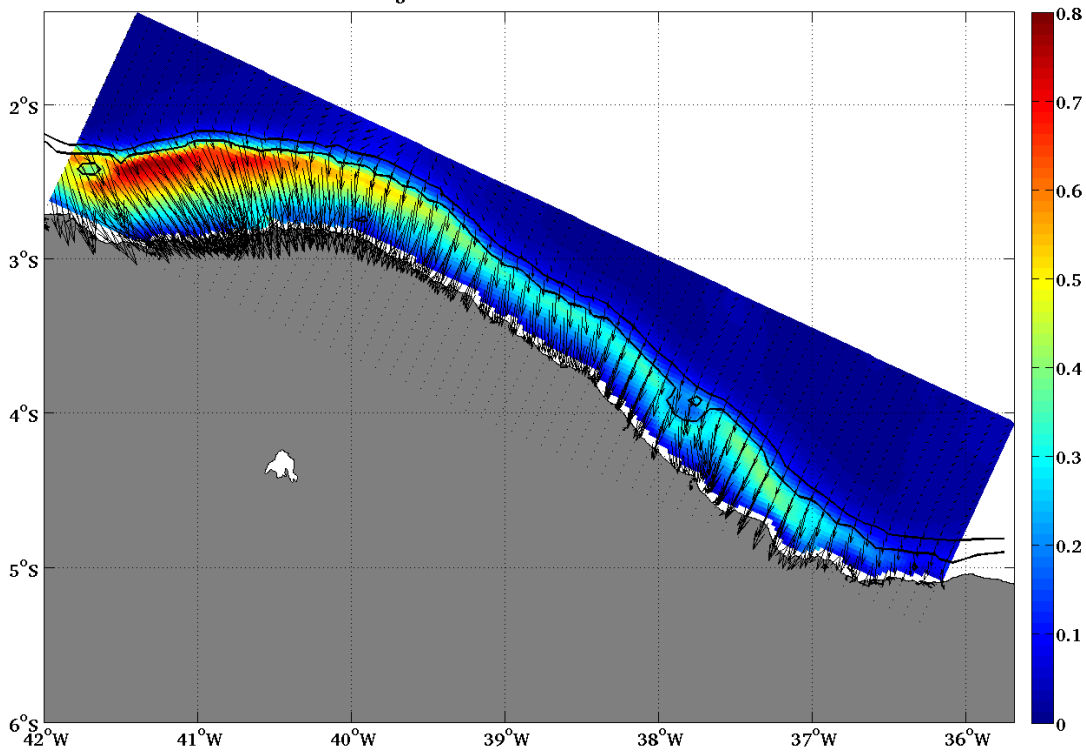


Figura 13. Máxima corrente de vazante devido à maré durante a quadratura (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.

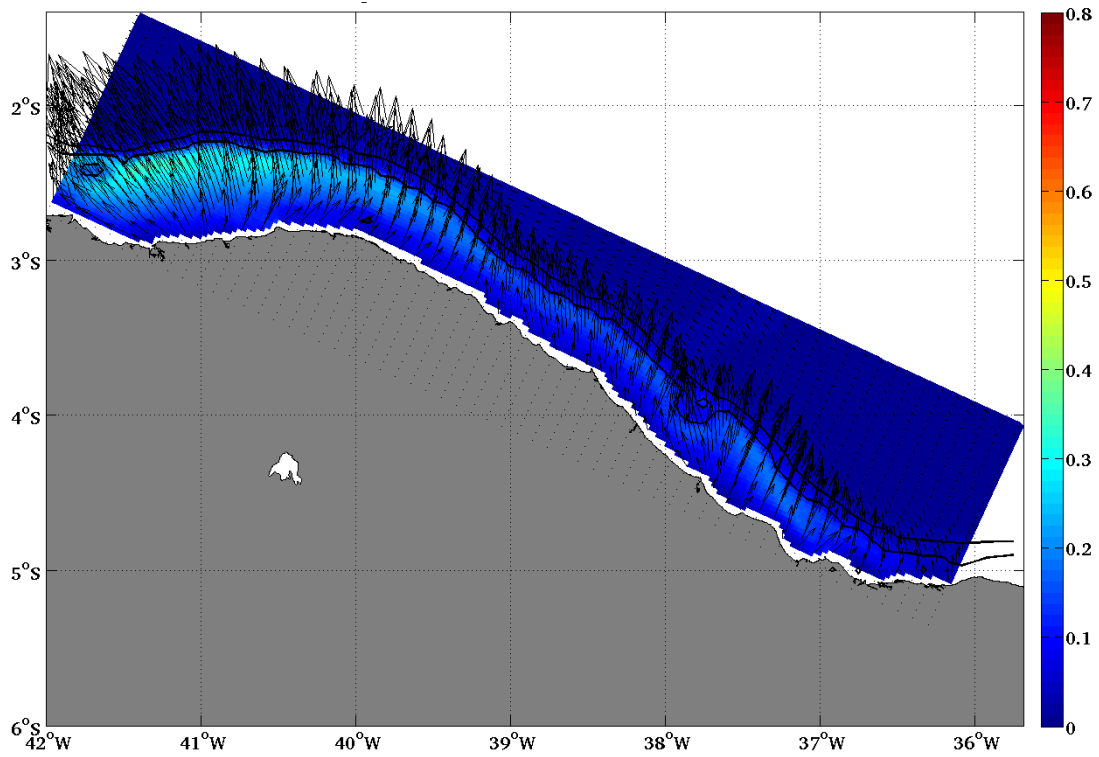
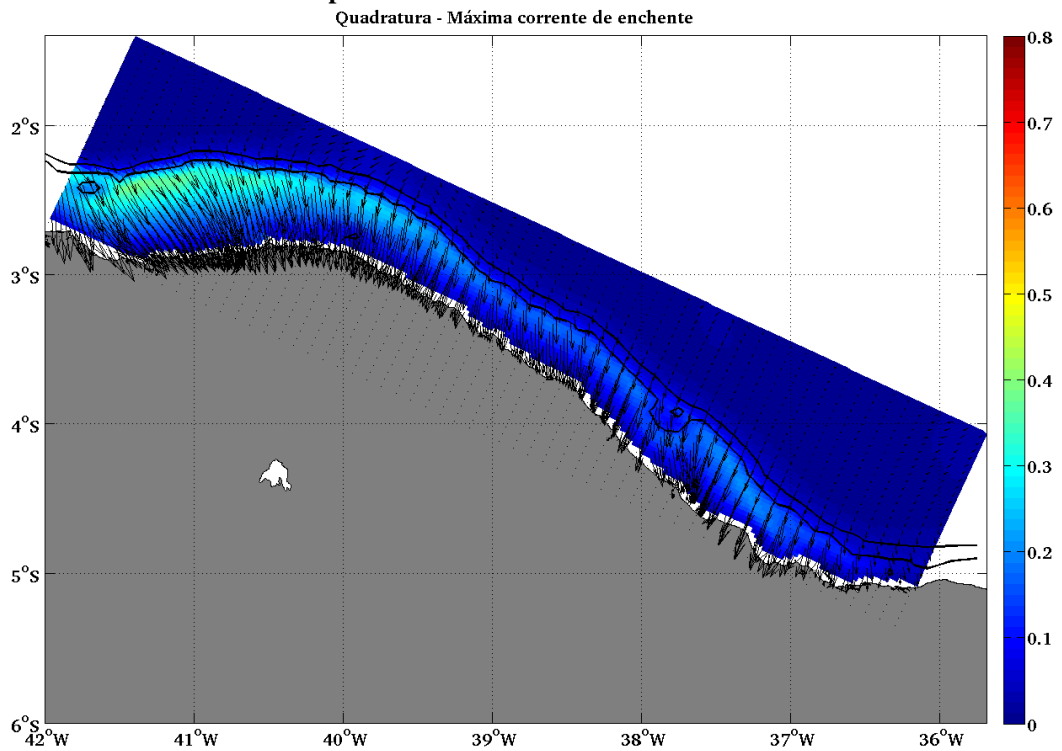


Figura 14. Máxima corrente de enchente devido à maré durante a quadratura (em m/s). As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.



c) Corrente residual

As máximas correntes residuais de maré durante a vazante de sizígia (Figura 15), a enchente de sizígia (Figura 16), a vazante de quadratura (Figura 17) e a enchente de quadratura (Figura 18) estão representadas mais adiante. Diferentemente das figuras anteriores, os resultados apresentados nesta seção estão em cm/s para facilitar a visualização dos dados.

No geral, as correntes residuais de maré apresentam valores menores que 0,6 cm/s, estando os maiores associados às condições de sizígia e os menores às de quadratura. As correntes durante a sizígia apresentaram valores entre 0,1 e 0,6 cm/s durante a vazante, e 0,05 e 0,5 cm/s durante a enchente. Já para a quadratura, as correntes de vazante, com valores entre 0,05 e 0,4 cm/s, foram menores que as de enchente, que apresentou valores entre 0,1 e 0,5 cm/s.

As intensidades das correntes residuais foram maiores a oeste do domínio, tanto na quebra da plataforma quanto na costa. Correntes residuais mais intensas aparecem próximos à quebra da plataforma devido a esta região apresentar valores elevados de correntes de maré.

Para as correntes de vazante na sizígia, houve fluxo perpendicular à costa em direção à plataforma em quase todo o domínio, com direção predominante para noroeste entre 40,5° e 42° O, para nordeste entre 39° e 40° O e para norte-nordeste no restante do domínio. Na quadratura, as correntes de vazante também apresentaram fluxo perpendicular à costa em direção à plataforma em quase todo o domínio, com direção predominante para noroeste-norte entre 40,5° e 42° O e para norte-nordeste no restante do domínio.

Para as correntes residuais de enchente na sizígia, houve fluxo perpendicular à costa e em direção à costa em quase toda a PCCE, com direção predominante para leste-sudeste entre 40° e 42° O e para sudeste no restante do domínio. Na quadratura, as correntes residuais de enchente também apresentaram fluxo perpendicular à costa e em direção à costa em quase toda a PCCE, com direção predominante para leste entre 40,5° e 42° O e para sudeste-sul no restante do domínio.

Como este experimento é barotrópico e por estar sendo analisada somente a maré neste tópico, a formação de correntes residuais na PCCE pode ser atribuída à interação das correntes de maré com a batimetria da plataforma. Provavelmente, não haveria mudanças significativas nas correntes residuais em uma análise anual, uma vez que a interação entre as correntes de maré e a batimetria são muito similares em qualquer período do ano (CHENG; GARTNER, 1985).

Apesar de as correntes residuais serem, em média, duas ordens de grandeza menores que as correntes de maré, estas são as responsáveis pelo transporte de organismos e partículas no ambiente causado pela maré, uma vez que não apresentam movimentos cíclicos.

Figura 15. Máxima corrente residual de vazante devido à maré durante a sizígia (em cm/s).

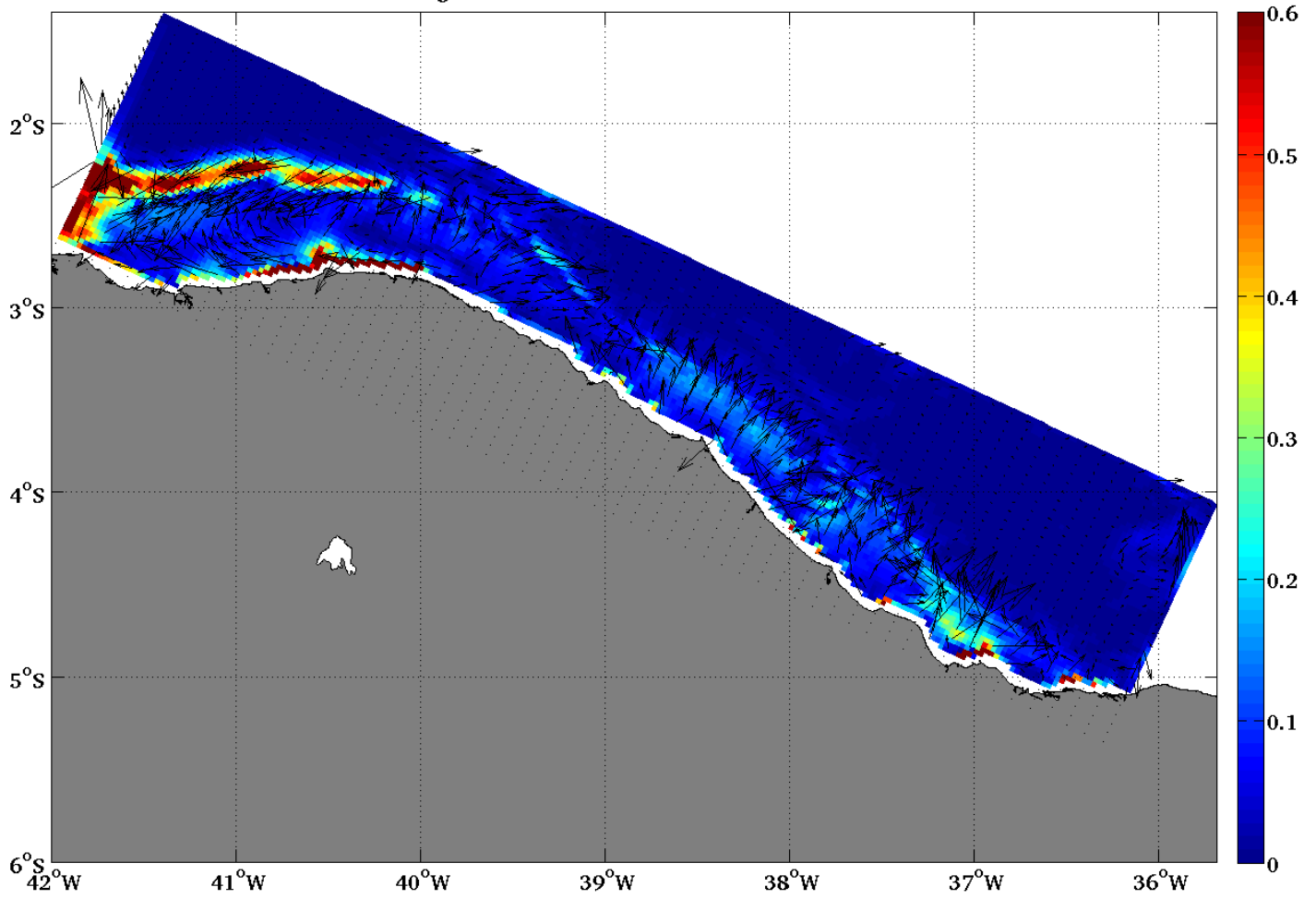


Figura 16. Máxima corrente residual de enchente devido à maré durante a sizígia (em cm/s).

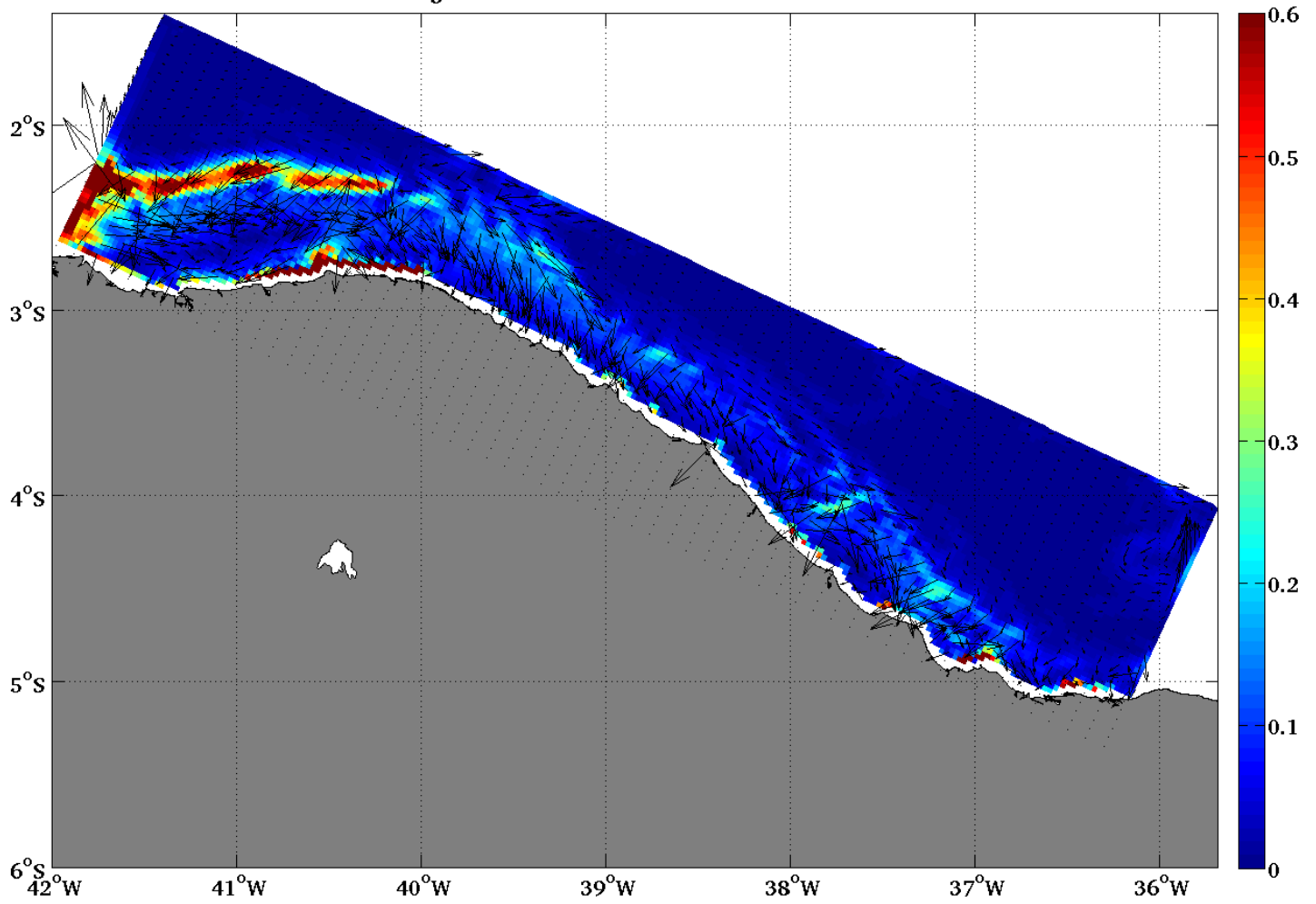


Figura 17. Máxima corrente residual de vazante devido à maré durante a quadratura (em cm/s).

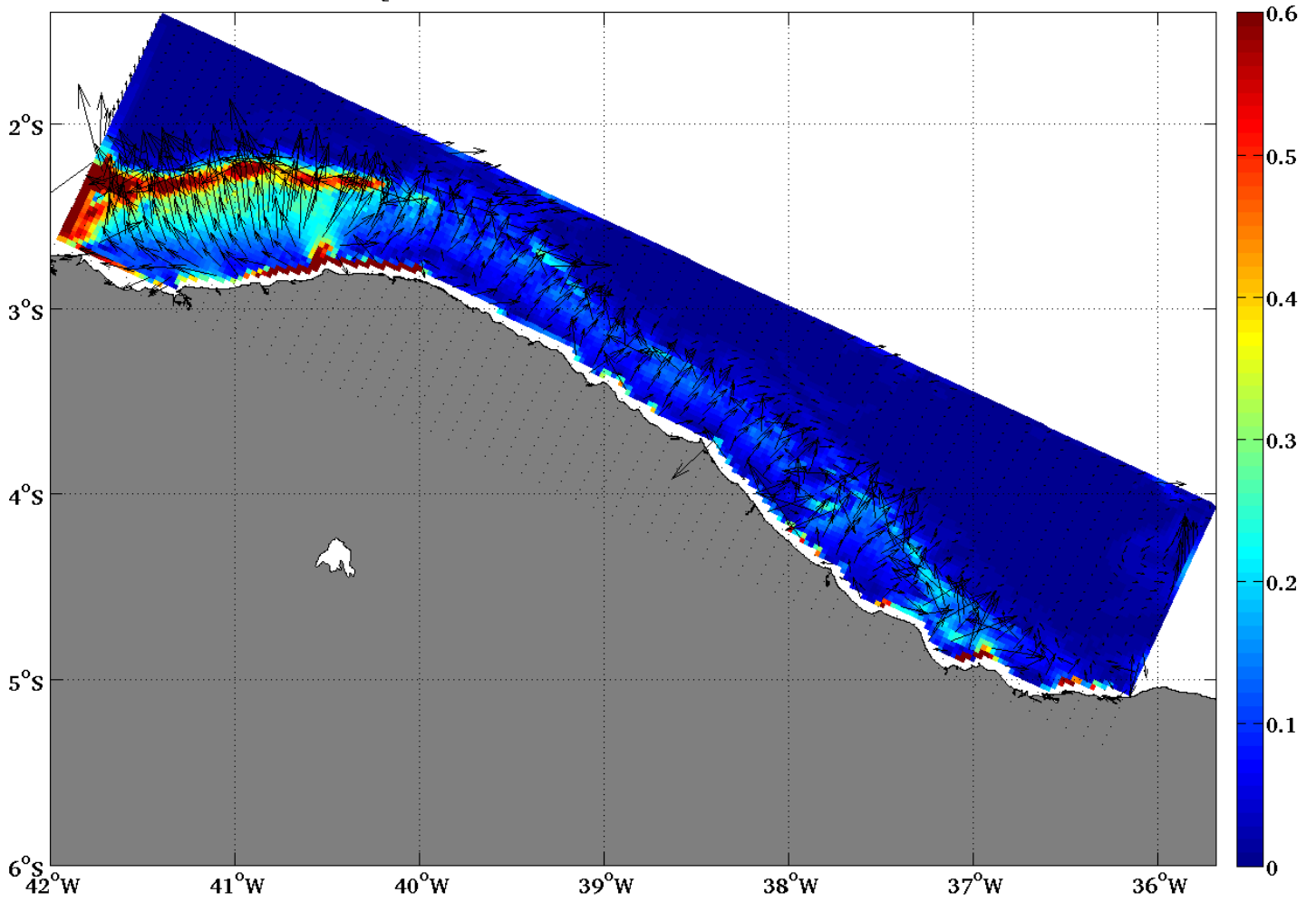
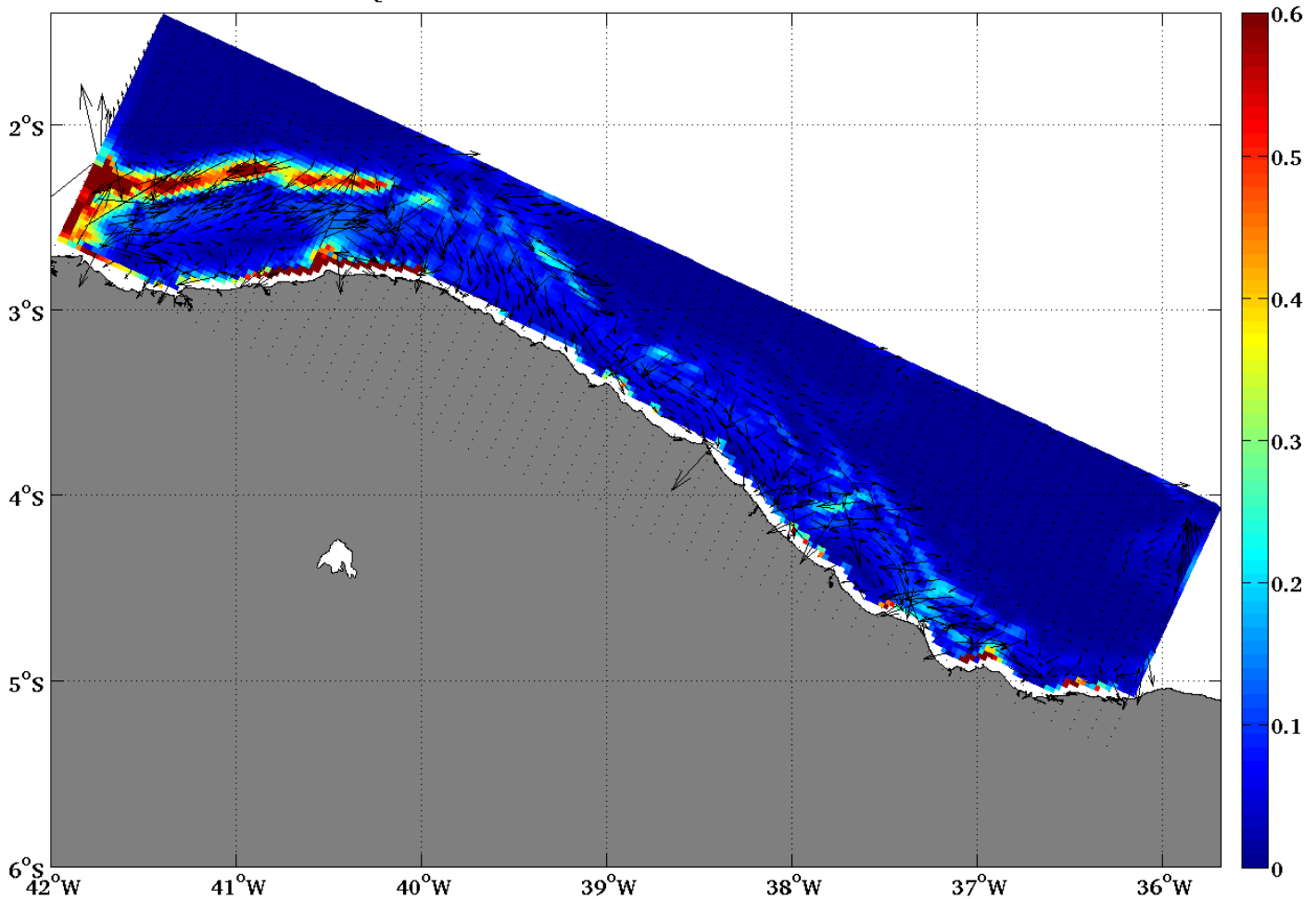


Figura 18. Máxima corrente residual de enchente devido à maré durante a quadratura (em cm/s).



5.6. Experimento PCCE 2 - Circulação forçada por vento

Nesta seção, serão apresentados os resultados da simulação forçada apenas pela média histórica mensal do vento.

5.6.1. Elevação

As figuras abaixo representam as elevações devido ao vento durante o verão (Figura 19) e o inverno (Figura 20). As escalas das figuras estão em metros, mas, para facilitar, os resultados serão discutidos em centímetros.

Os maiores valores foram encontrados durante o inverno, entre 0,01 e 0,15 cm, e os menores para o verão, entre 0,01 e 0,1 cm. Isto pode ser justificado pela maior intensidade do vento durante o inverno na área de estudo (CAMELO *et al.*, 2008), o que causa maior empilhamento de água. Vale ressaltar que os valores para o inverno são menores devido à utilização de vento subestimado nesta época.

Em ambas as estações, os maiores valores foram encontrados na plataforma continental e a leste do domínio, entre 37 e 38,5° O. O extremo de elevação no canto inferior a oeste do domínio é, provavelmente, devido às condições de contorno.

Os valores de elevação ocasionados pelo vento são pequenos devido a maior significância da componente paralela do vento e ao pequeno valor de Coriolis na região, que não é efetivo em realizar o empilhamento de água. Isto corrobora com Soares e Castro (1996), que atribuíram os pequenos valores de nível do mar à baixa latitude da região.

O máximo valor de elevação causado pelo vento foi menor que os encontrados por Soares e Castro (1996) e por Dias (2011). Soares e Castro (1996) utilizaram ventos uniformes de 6,7 m/s de leste para o verão e de 7,5 m/s de sudeste para o inverno e encontraram valor máximo de elevação de 0,02 m. Dias (2001) utilizou vento uniforme de 8 m/s oriundo de nordeste durante o verão e de sudeste durante o inverno e encontrou valor máximo de elevação de 0,05 m próximo à costa.

Ao se analisar os dados de vento entre 2003 e 2009 apresentados por Silva *et al.* (2010), nota-se que as médias mensais variaram entre 3 e 4 m/s no primeiro semestre e entre 4,6 e 5,5 m/s no segundo semestre. Logo, Soares e Castro (1996) e Dias (2011) superestimaram os valores, uma vez que utilizaram ventos constantes e uniformes durante todo o ano de simulação, enquanto que as médias mensais utilizadas neste trabalho estão de acordo com Silva *et al.* (2010) para o primeiro semestre e estão subestimadas para o segundo semestre, além de os valores não serem constantes ao longo do ano de simulação. Isto justifica a menor elevação encontrada aqui para a PCCE.

Figura 19. Nível do mar (em metros) devido ao vento durante o verão.

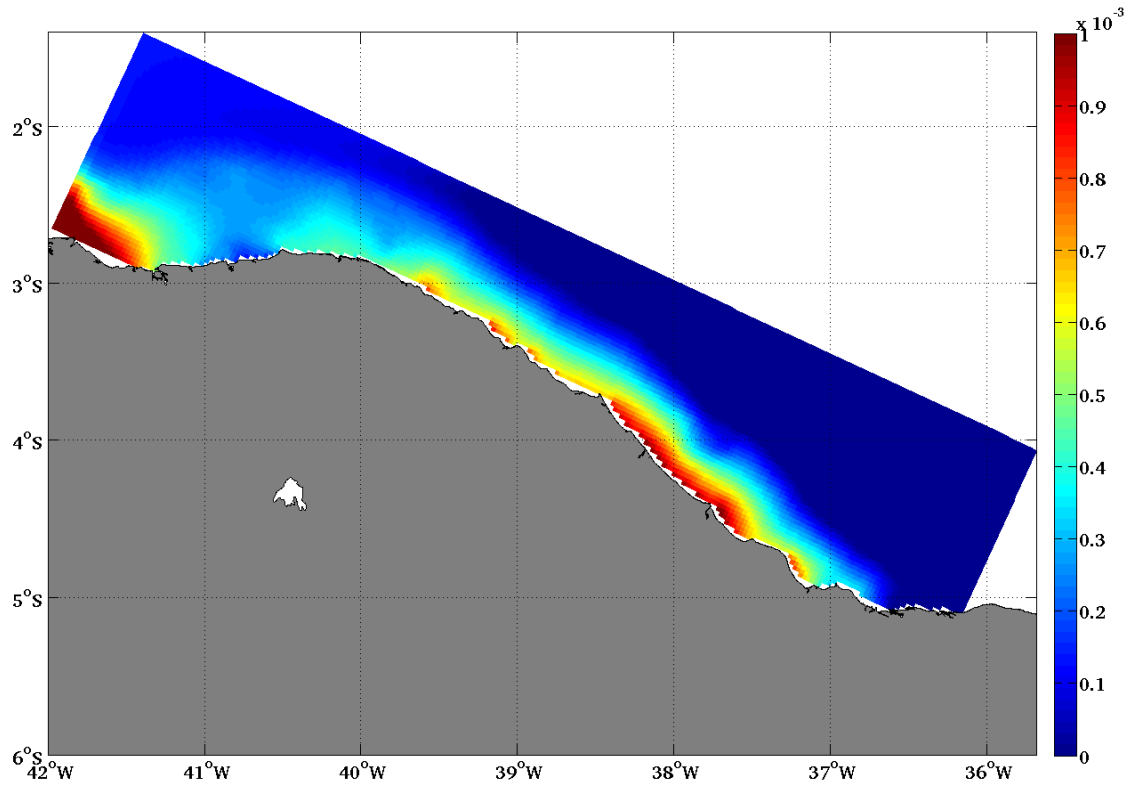
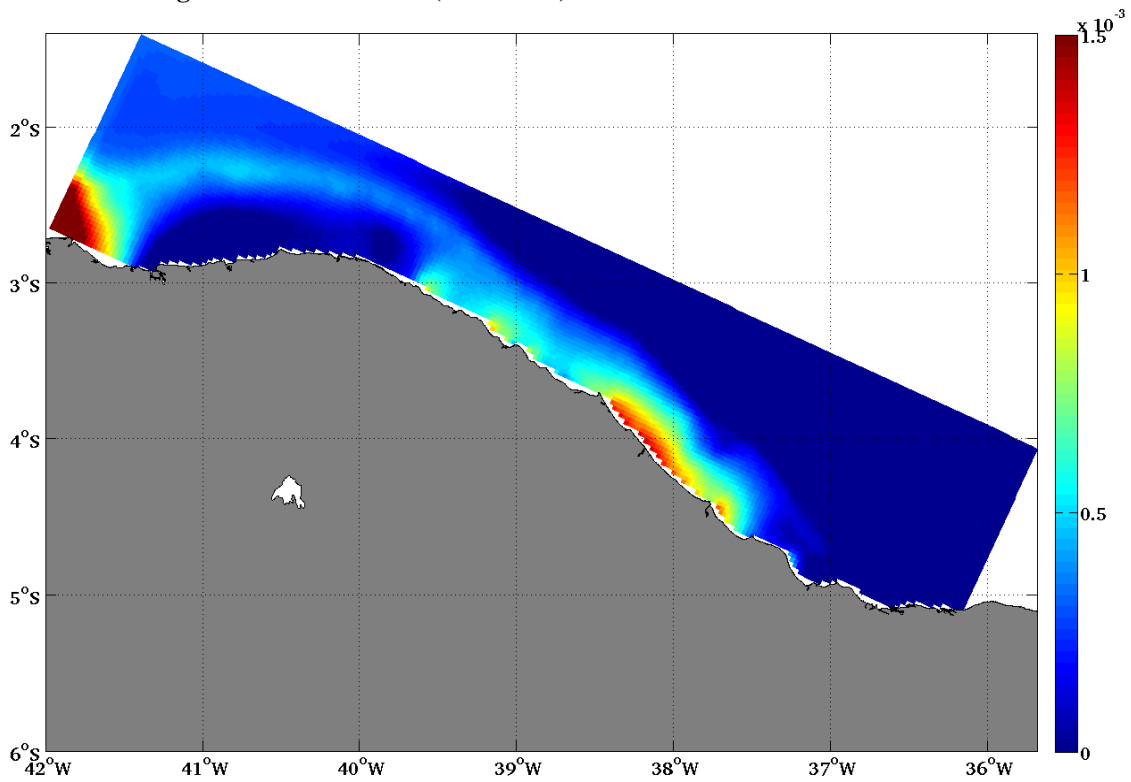


Figura 20. Nível do mar (em metros) devido ao vento durante o inverno.



5.6.2. Correntes integradas na coluna d'água

As maiores intensidades de correntes foram encontradas na plataforma continental, devido a menor profundidade em relação ao oceano profundo, e no inverno (Figura 22), com valores entre 0,005 e 0,04 m/s, o dobro encontrado para o verão (Figura 21), com valores entre 0,002 e 0,02 m/s. Isto era esperado, uma vez que fluxos mais intensos são observados devido a maior intensidade dos ventos alísios de sudeste durante o inverno (OLIVEIRA, 2009).

Em ambas as estações, as correntes acompanharam a batimetria e apresentaram direção praticamente constante, variando entre os quadrantes sudoeste e noroeste. Estes resultados são similares aos apresentados por Freire e Cavalcanti (1998), que encontraram correntes longitudinais na plataforma interna cearense responsáveis por parte do transporte na direção sudeste-noroeste; por Dias (2011), que encontrou fluxos para oeste-noroeste na estação de chuva (verão) e para noroeste na estação de seca (inverno); e por Oliveira (2009), que encontrou fluxos em direção a noroeste durante o inverno.

As correntes apresentaram fluxo praticamente paralelo às isóbatas e à linha de costa, o que era esperado, uma vez que, na plataforma continental, este tipo de corrente costuma ocorrer paralelamente a aquelas (CASTRO, 1996).

Este padrão similar entre as estações, fluindo preferencialmente para noroeste em resposta a ventos praticamente de leste, provavelmente ocorre porque as condições meteorológicas, como direção e intensidade do vento, não são muito diferentes ao longo do ano, apresentando valores médios entre 3 e 4 m/s no primeiro semestre e entre 4,4 e 5,5 m/s no segundo semestre (SILVA *et al.*, 2010) com direção preferencial de leste nas duas estações (CAMPOS, 2003).

Dias (2011), que modelou a PCCE em modo baroclínico, observou que a corrente gerada pelo vento foi essencialmente barotrópica, pois dependeu da inclinação da superfície livre do mar e do fluxo quase unidirecional das correntes de deriva do vento, o que torna o modo barotrópico mais importante da superfície ao fundo na área de estudo.

Como já foi dito, as correntes de maré, apesar de mais intensas, são cíclicas, enquanto que as correntes residuais de maré são menores que as geradas pelo vento. Isto, juntamente com a constância do vento, mostra a maior significância deste na formação de correntes e, conseqüentemente, no transporte na PCCE. Este resultado corrobora com Pereira *et al.* (2011), que, através de medições de correntes em 1998, concluíram que o regime hidrodinâmico na região próxima ao emissário de Fortaleza é primeiramente dirigido pelo vento, com pequeno papel das marés; e com Signorini e Miranda (1983), que mostraram que as correntes submaregráficas na PCCE são localmente impulsionadas pelo vento.

As velocidades máximas para o verão e para o inverno encontradas aqui são condizentes com os valores encontrados por Soares e Castro (1996), que variaram entre 0,03 e 0,14 m/s. Entretanto, o valor máximo encontrado pelos autores foi maior que o encontrado aqui porque eles utilizaram vento superestimado, uniforme e constante, o que transfere mais momento para a água, ocasionando maiores velocidades.

Dias (2011) encontrou valor modelado máximo de corrente ocasionada pelo vento de 0,3 m/s, uma ordem de grandeza maior que o encontrado aqui. Isto também é devido à utilização de vento superestimado, uniforme e constante pelo autor, como já foi dito.

Figura 21. Velocidade média das correntes devido ao vento durante o verão. As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.

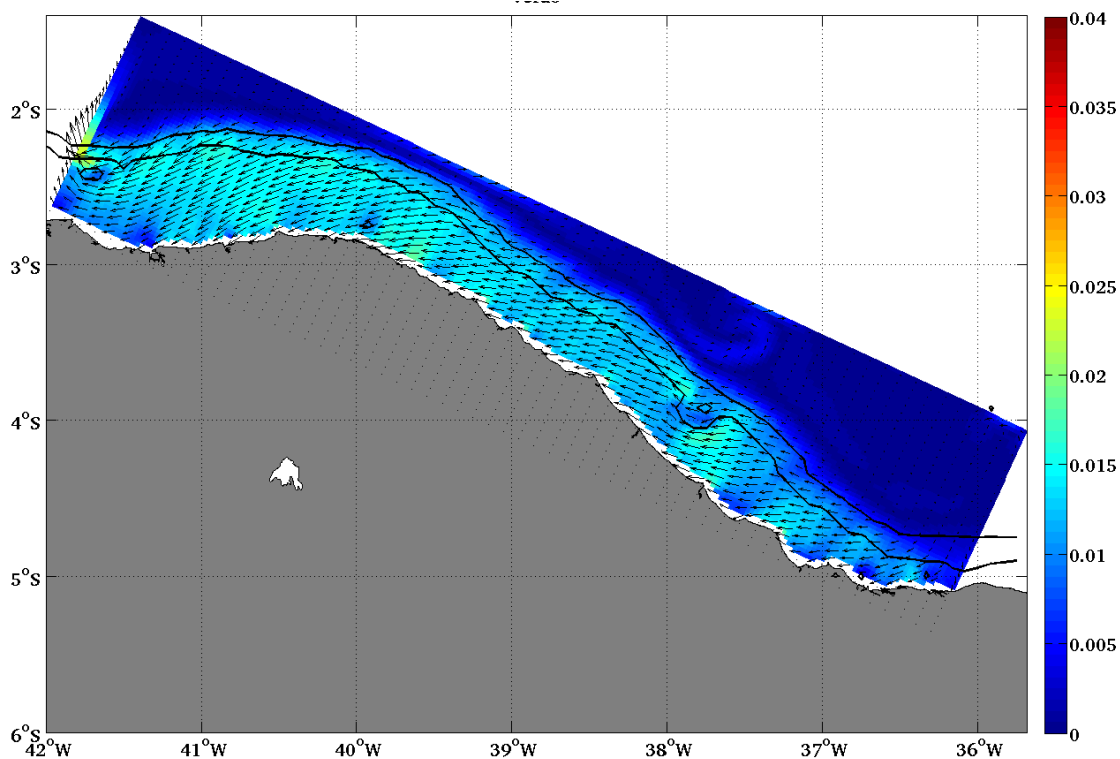
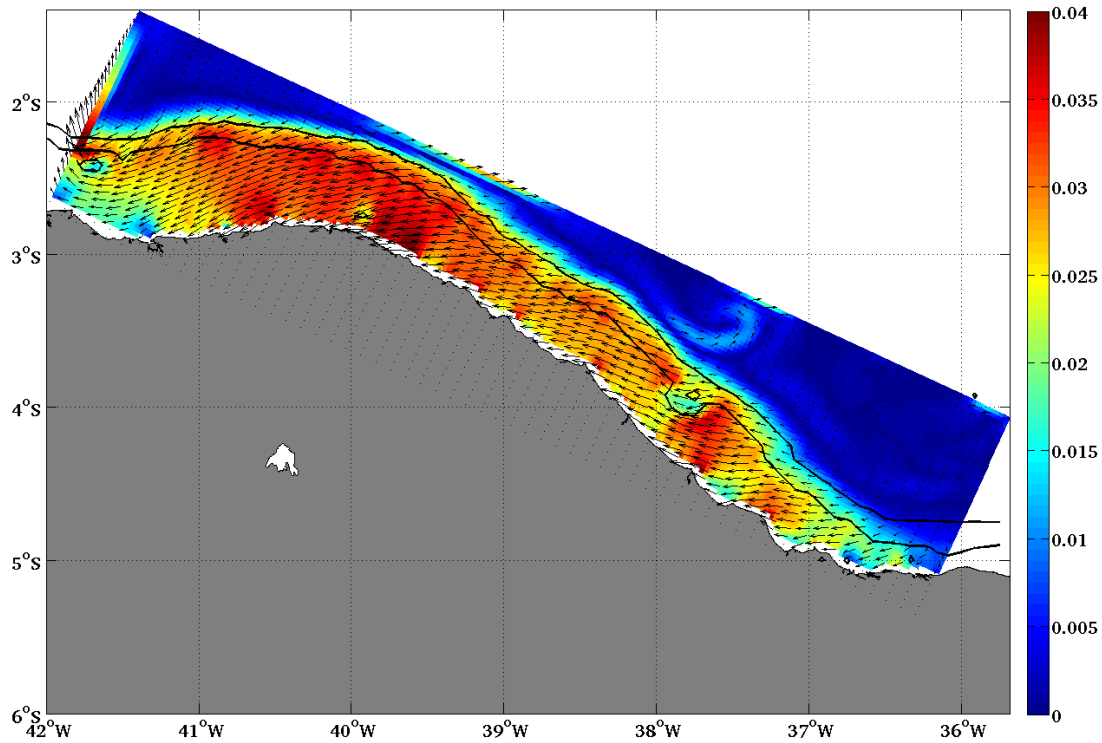


Figura 22. Velocidade média das correntes devido ao vento durante o inverno. As linhas pretas representam as isóbatas de -30 e -100 m.



5.7. Experimento PCCE 3 - Circulação forçada por vento e maré residual

Não houve diferença significativa entre os campos residual de elevação e de correntes integradas na coluna d'água causados por maré e por maré e vento (não representados aqui), uma vez que a elevação residual e as correntes residuais de maré são muito pequenas.

5.7.1. Série temporal de elevação

Na análise temporal de elevação, os valores de elevação modelados no Porto do Mucuri (Figura 24) devido à maré residual e ao vento são subestimados em relação aos dados observados (Figura 23), uma vez que foi utilizado vento subestimado durante o inverno. Isto mostra que o modelo não está adequado para representar a circulação residual de maré.

Figura 23. Série temporal de elevação observada (em cm) devido à maré residual na estação do IBGE para o ano de 1955.

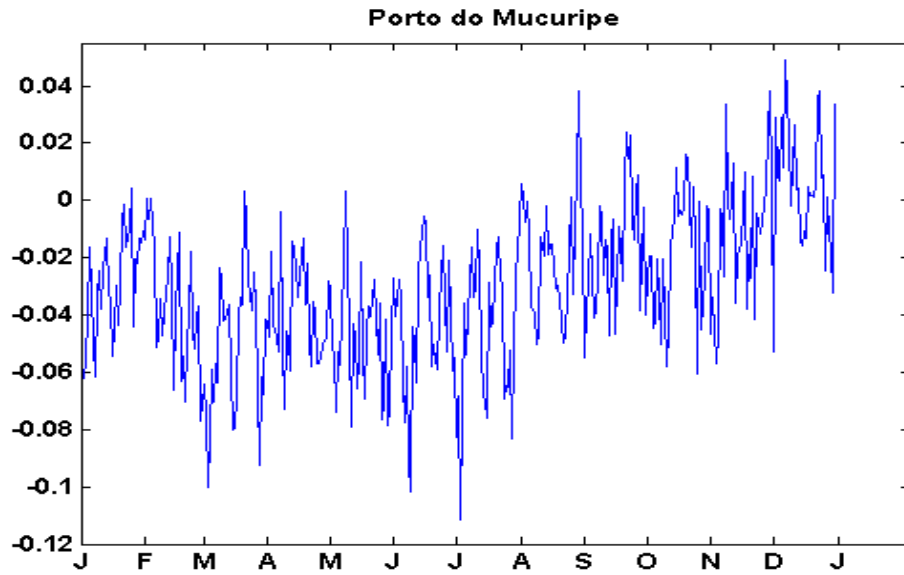
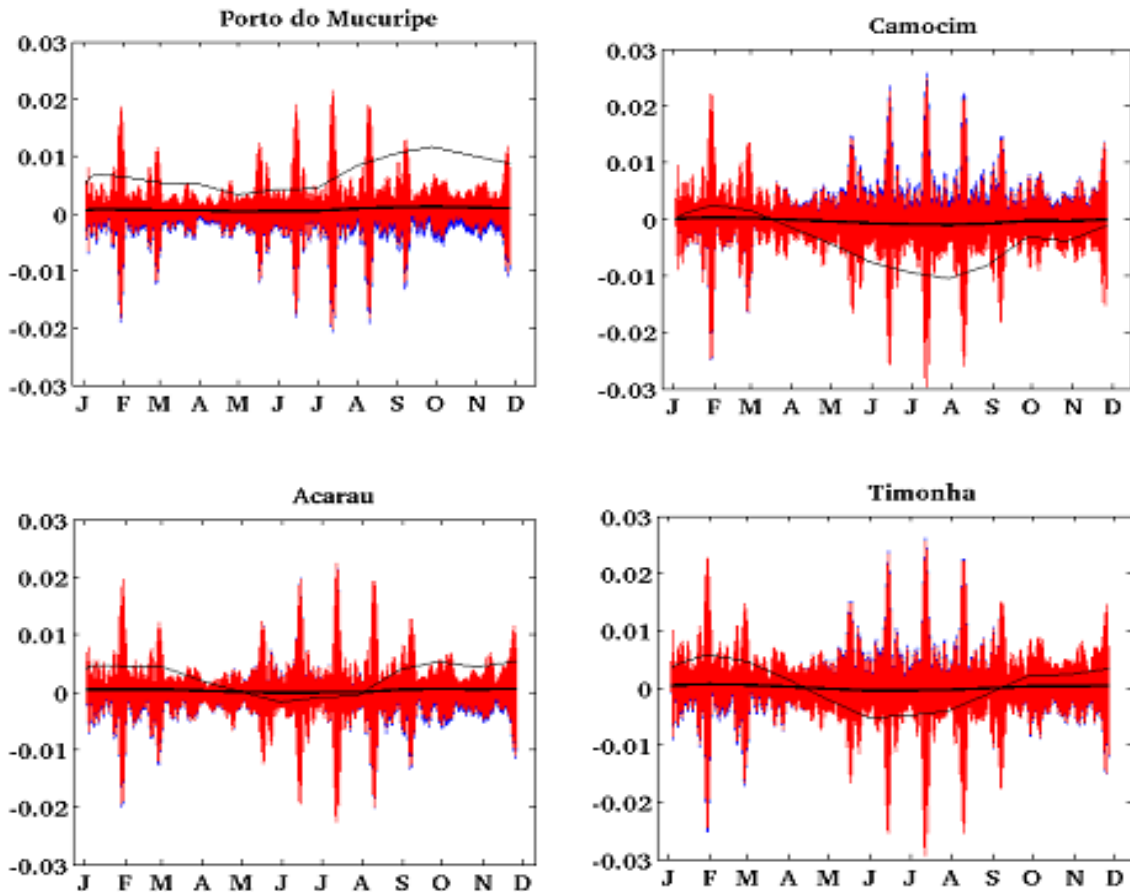


Figura 24. Série temporal de elevação modelada (em cm) devido à maré residual (vermelho), à maré residual e ao vento (azul) e ao vento (preto) nas quatro estações. A linha preta mais fina representa a elevação devido ao vento multiplicada por dez, para se observar a sazonalidade.



5.8. Estudo da interconexão entre os estuários (flutuadores)

O acoplamento do deslocamento langrangeano de partículas com modelos hidrodinâmicos é uma ferramenta eficiente para examinar a importância de diferentes processos físicos na dispersão de materiais e na interconexão entre diferentes áreas (e.g. MILLER *et al.*, 1998; BLANKE *et al.*, 1999; FALCO *et al.*, 2000; LETT *et al.*, 2007) (QIU *et al.*, 2010).

Para analisar a conectividade entre os principais estuários da região de estudo, as trajetórias dos flutuadores liberados na desembocadura de cada um dos sete rios (Jaguaribe, Pirangi, Pacoti, Cocó, Ceará, Curú e Acaraú) para os três experimentos (forçados por maré, por vento e por maré e vento) podem ser visualizadas nos itens abaixo.

Vale a pena ressaltar que os resultados aqui apresentados para os flutuadores são idealizados, uma vez que não há dados *in situ* na região de estudo que possam validá-los, além de a grade não contemplar o Porto do Mucuripe e os espigões na região a oeste, que atuariam como obstáculo para o transporte destes ao longo do domínio, afetando suas trajetórias.

a) Maré como forçante

As Figuras 25 a 27 mostram a propagação por um ano dos flutuadores liberados na desembocadura dos diferentes estuários devido à ação única da maré.

Os flutuadores que apresentaram maior deslocamento dentre os estudados foram os liberados no estuário do rio Acaraú (Figura 25), que se deslocaram de leste para oeste, sofrendo desvio para norte, em direção ao largo da plataforma. Os flutuadores com menor deslocamento foram os liberados no estuário do rio Jaguaribe (Figura 27), que apresentaram trajetória circular em torno do ponto de descarte, não havendo deslocamento norte-sul ou leste-oeste significativo durante a simulação.

Foi possível observar a influência da morfologia da costa (devido a mudanças na direção ou à presença de cabos), que deslocou alguns dos flutuadores em direção ao largo da plataforma, como pode ser visto nos flutuadores dos rios Acaraú e Curú (Figura 25) e Ceará (Figura 26).

Figura 25. Comportamento dos flutuadores dos rios Acaraú (à esquerda) e Curú (à direita) forçados por maré. As cores representam a profundidade, em metros.

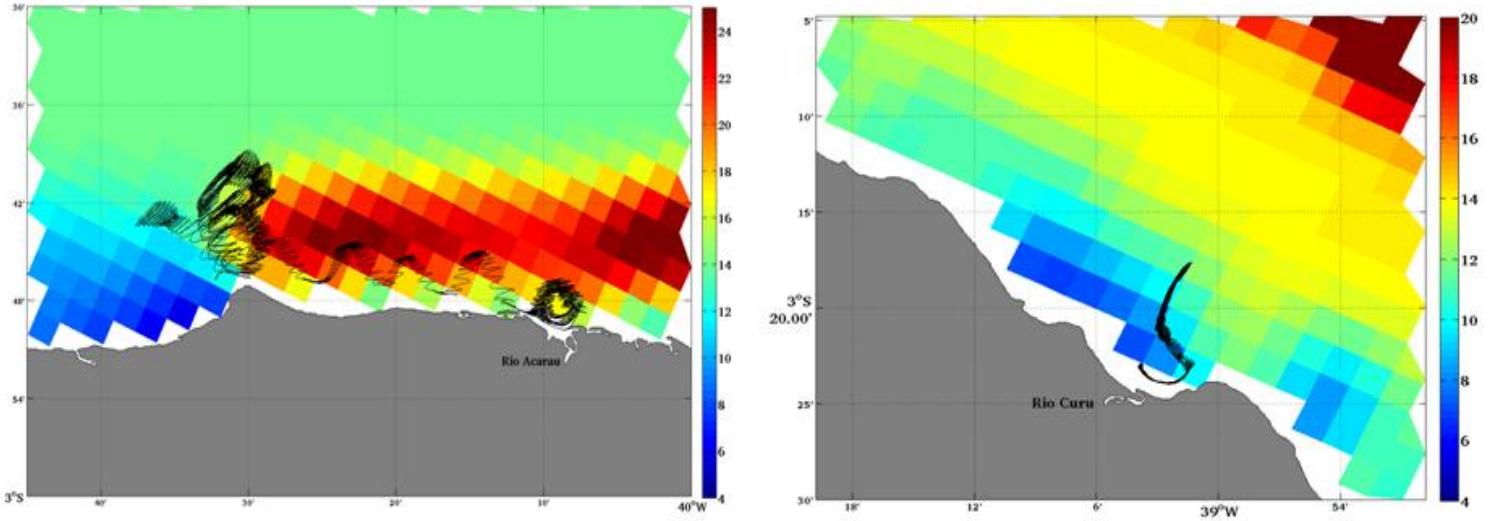


Figura 26. Comportamento dos flutuadores dos rios Ceará (à esquerda), Cocó e Pacoti (à direita) forçados por maré. As cores representam a profundidade, em metros.

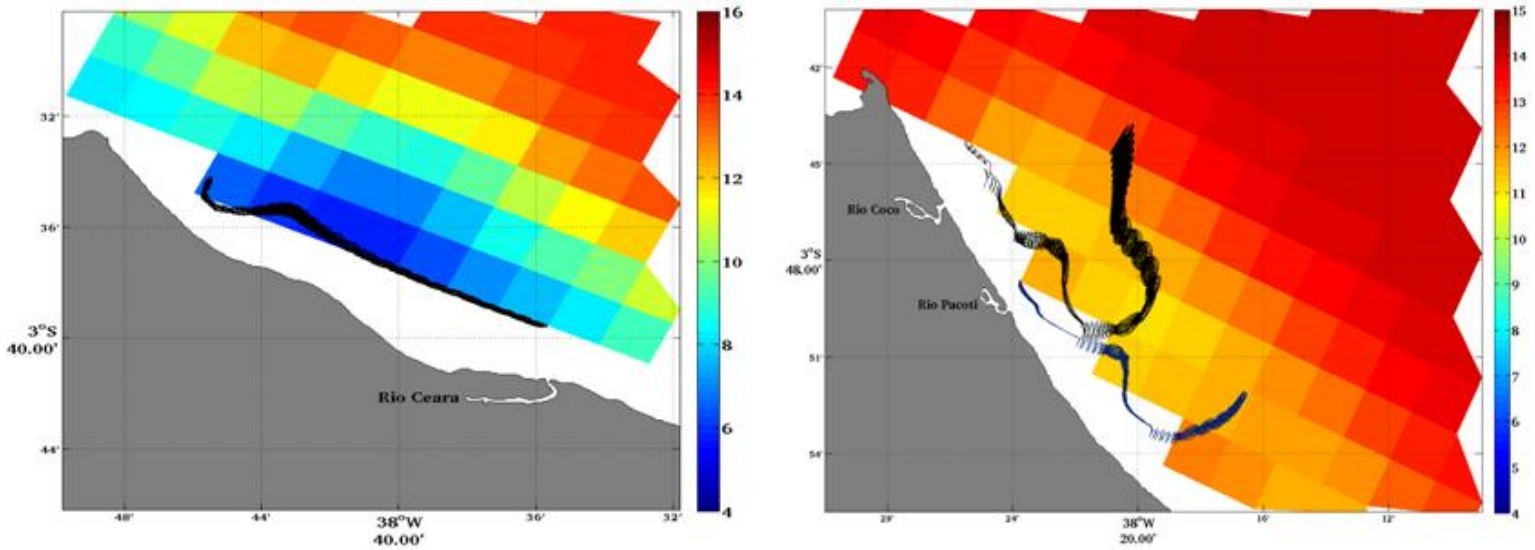
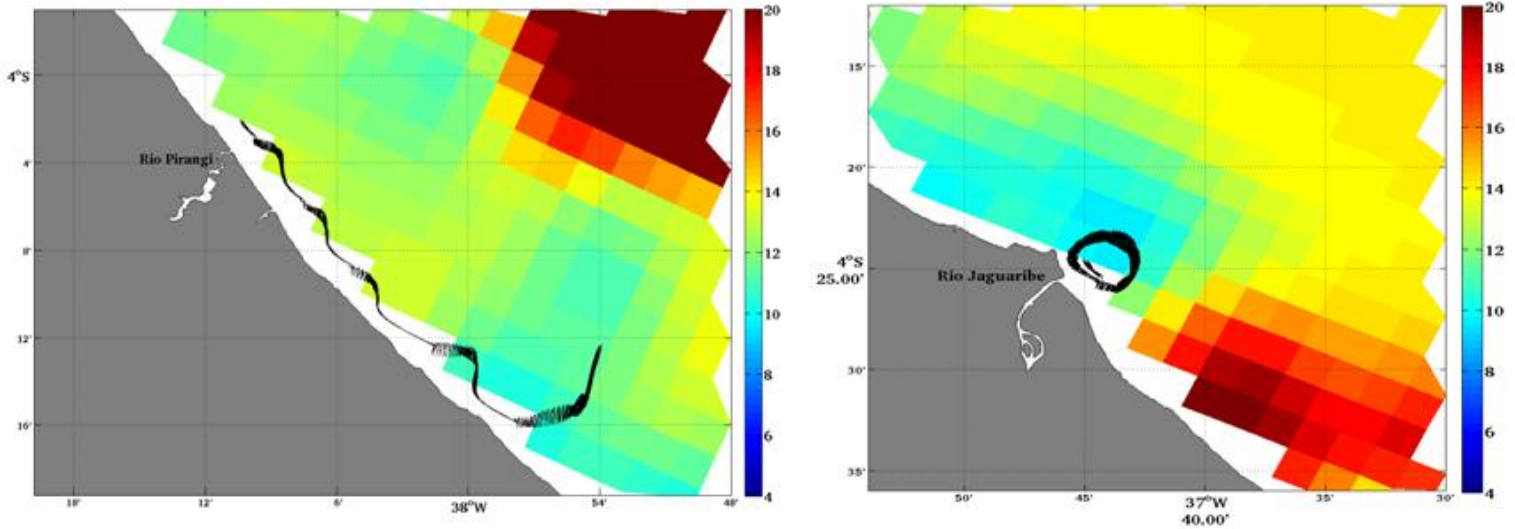


Figura 27. Comportamento dos flutuadores dos rios Pirangi (à esquerda) e Jaguaribe (à direita) forçados por maré. As cores representam a profundidade, em metros.



Com exceção do estuário do rio Curú, que não apresentou deslocamento significativo dos flutuadores, as correntes dirigidas pela maré forçaram os flutuadores a oeste do domínio (Ceará e Acaraú) a deslocarem na mesma direção (leste-oeste). Entretanto, apesar do deslocamento ser em direção ao estuário seguinte, não houve transporte suficiente para realizar a conexão, uma vez que os flutuadores não atingiram outros estuários.

Com exceção do estuário do rio Jaguaribe, que não apresentou deslocamento significativo dos flutuadores, as correntes dirigidas pela maré forçaram os flutuadores a leste do domínio (Cocó, Pacoti e Pirangi) a deslocarem na mesma direção (oeste-leste). Só houve conexão entre os estuários do Cocó e do Pacoti.

Com exceção dos flutuadores liberados no estuário do rio Jaguaribe, todos se distanciaram da costa, sendo levados em direção à quebra da plataforma continental. Não foi observado um padrão similar de transporte devido à maré nos diversos estuários analisados, comportamento que pode ser justificado através da análise das correntes residuais de maré (Figuras 15 a 18, páginas 41 a 44), que apresentaram direções distintas durante as vazantes e as enchentes de sizígia e de quadratura.

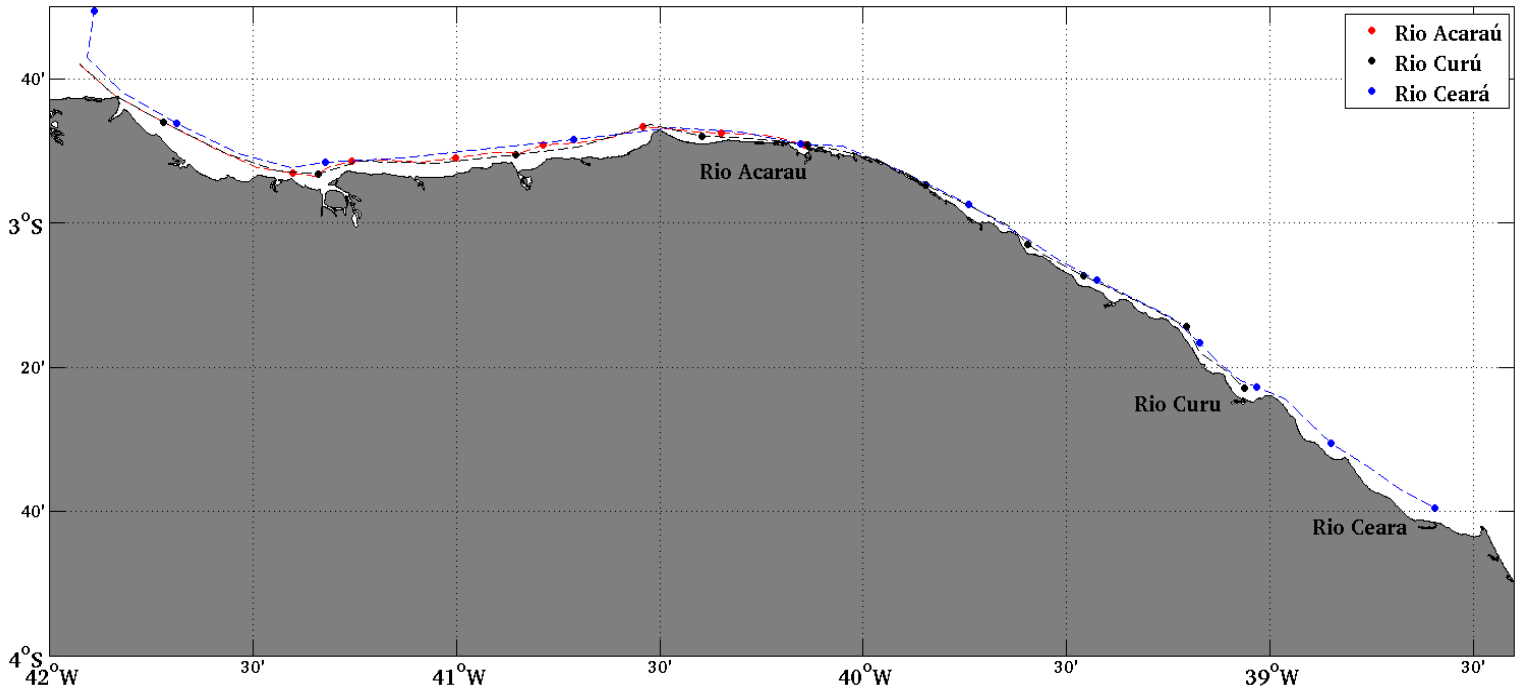
b) Vento como forçante

Para facilitar a observação dos flutuadores forçados pelo vento, estes foram divididos em flutuadores lançados nos estuários a oeste (Figura 28) e a leste do domínio (Figura 29). Cada cor representa um estuário e o primeiro ponto representa o local de lançamento em cada estuário.

Em relação aos estuários a oeste, os flutuadores liberados no rio Curú atingem o rio Acaraú em,

aproximadamente, 150 dias. Já os flutuadores liberados no rio Ceará atingem o rio Curú em 60 dias e o rio Acaraú em 180 dias, aproximadamente.

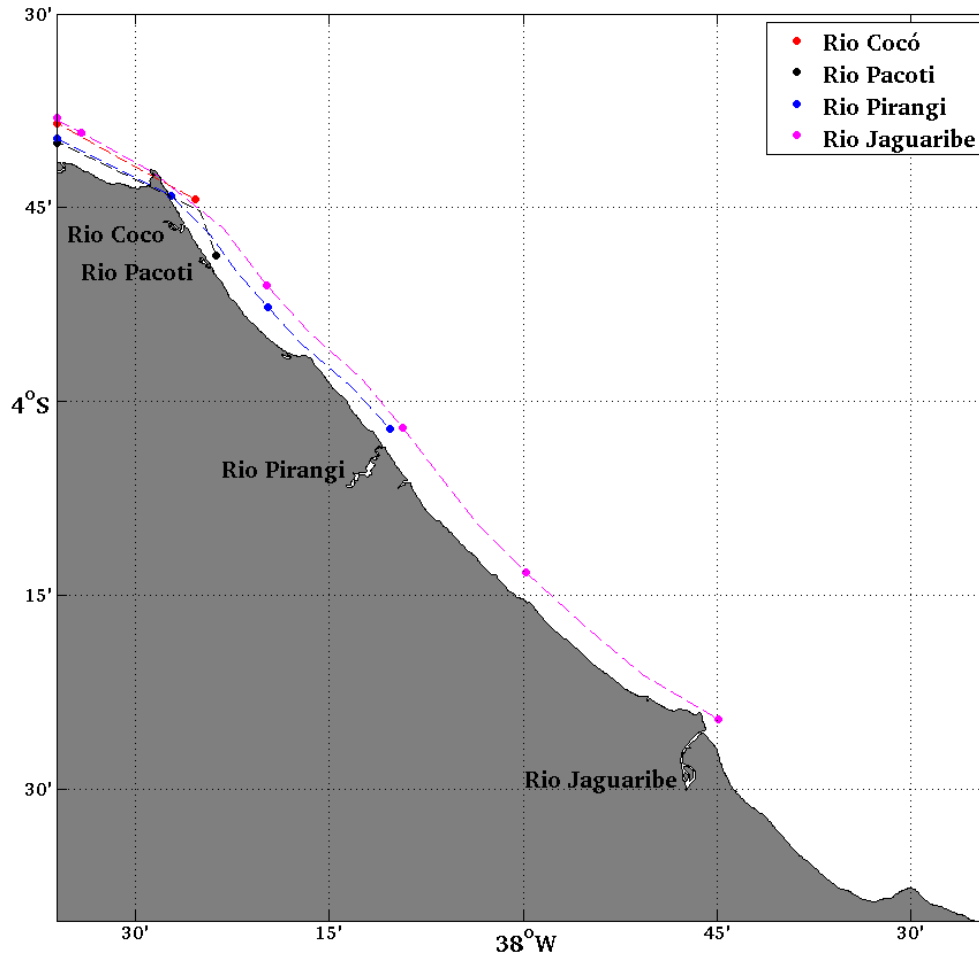
Figura 28. Comportamento dos flutuadores dos rios Ceará (azul), Curú (preto) e Acaraú (vermelho), a oeste do domínio, forçados por vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias.



Em relação aos estuários a leste, os flutuadores liberados no rio Cocó atingem o rio Ceará em 20 dias, o rio Curú em 80 dias e o rio Acaraú em 180 dias, aproximadamente; os liberados no rio Pacoti atingem o rio Cocó em 10 dias, o rio Ceará em 30 dias, o rio Curú em 120 dias e o rio Acaraú em 200 dias, aproximadamente; os liberados no rio Pirangi atingem o rio Pacoti em 40 dias, o rio Cocó em 50 dias, o rio Ceará em 80 dias, o rio Curú em 140 dias e o rio Acaraú em 210 dias, aproximadamente; já os liberados no rio Jaguaribe atingem o rio Pirangi em 60 dias, o rio Pacoti em 90 dias, o rio Cocó em 100 dias, o rio Ceará em 120 dias, o rio Curú em 160 dias e o rio Acaraú em 215 dias, aproximadamente.

Flutuadores liberados em janeiro no estuário mais a leste (rio Jaguaribe) percorrem todo o domínio e são capazes de chegar ao estuário mais a oeste (rio Acaraú) entre julho e agosto.

Figura 29. Comportamento dos flutuadores dos rios Jaguaribe (verde), Pirangi (azul), Pacoti (preto) e Cocó (vermelho), a leste do domínio, forçados por vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias.



No geral, todos os flutuadores liberados apresentaram deslocamento em direção a oeste, percorrendo toda a área desde o descarte até o limite do domínio, e estiveram sempre próximos à costa. Isto ocorre provavelmente devido à forte influência dos persistentes ventos alísios de nordeste e sudeste na PCCE na maior parte do tempo, fazendo com que as correntes dirigidas pelo vento realizem conexão entre os estuários na direção leste para oeste e empurrem os flutuadores em direção à costa. Esta conexão na direção leste-oeste pode ser confirmada através da análise das correntes geradas pelo vento (Figuras 21 e 22, páginas 48 e 49), citadas anteriormente.

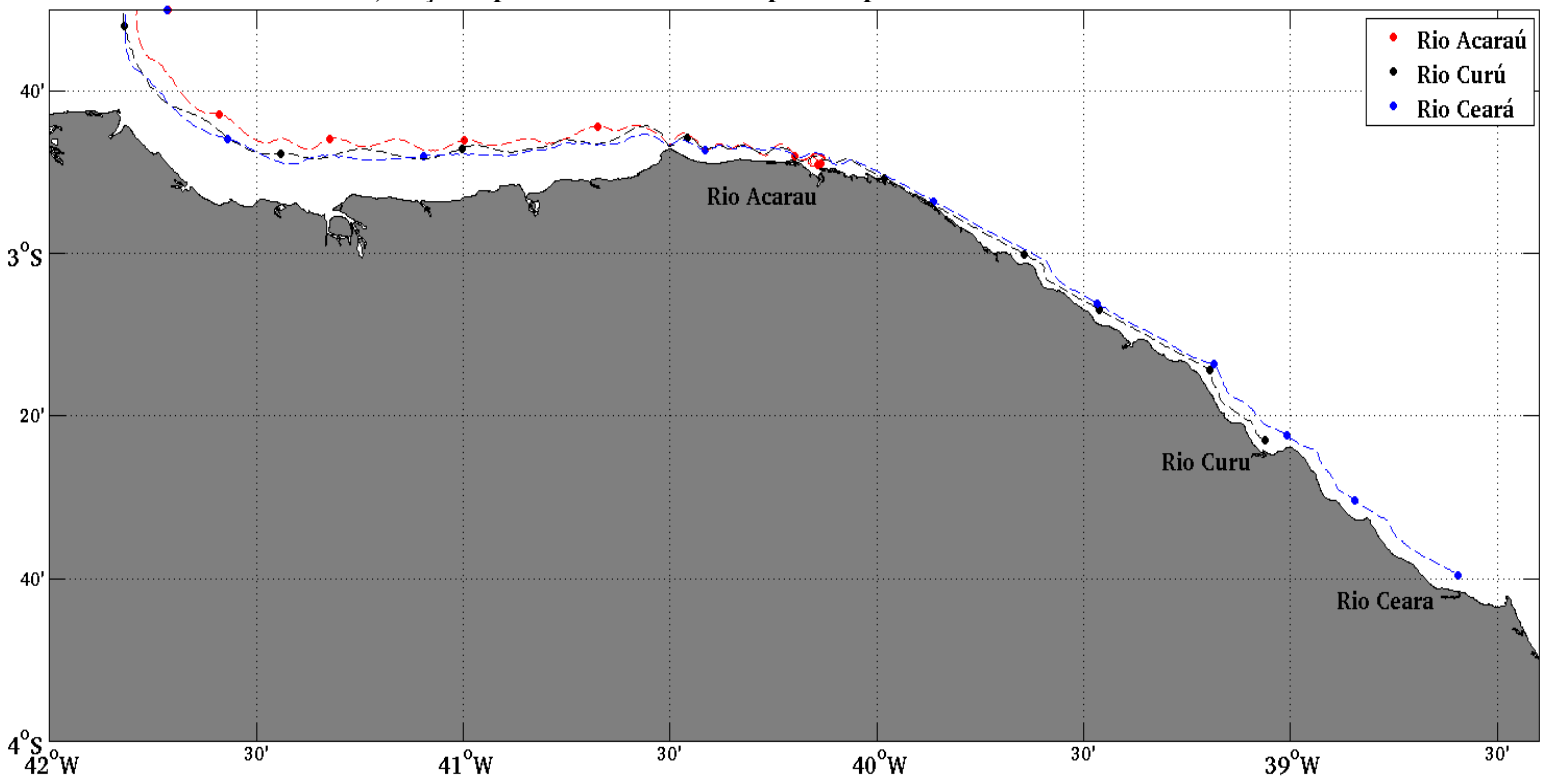
Embora a região apresente fortes correntes de maré, estas são cíclicas, o que mostra que o vento é a forçante mais importante na conectividade entre os estuários do Ceará, uma vez que os flutuadores percorreram todo o domínio.

c) Maré e vento como forçantes

Para facilitar a observação dos flutuadores forçados por maré e vento, estes foram divididos em flutuadores lançados nos estuários a oeste (Figura 30) e a leste do domínio (Figura 31). Cada cor representa um flutuador e o primeiro ponto representa o local de lançamento em cada estuário.

Quando as simulações são forçadas por marés e ventos, nos estuários a oeste, os flutuadores liberados no rio Curú atingem o rio Acaraú em, aproximadamente, 130 dias. Já os flutuadores liberados no rio Ceará atingem o rio Curú em 60 dias e o rio Acaraú em 130 dias, aproximadamente.

Figura 30. Comportamento dos flutuadores dos rios Ceará (azul), Curú (preto) e Acaraú (vermelho), a oeste do domínio, forçados por maré e vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias.

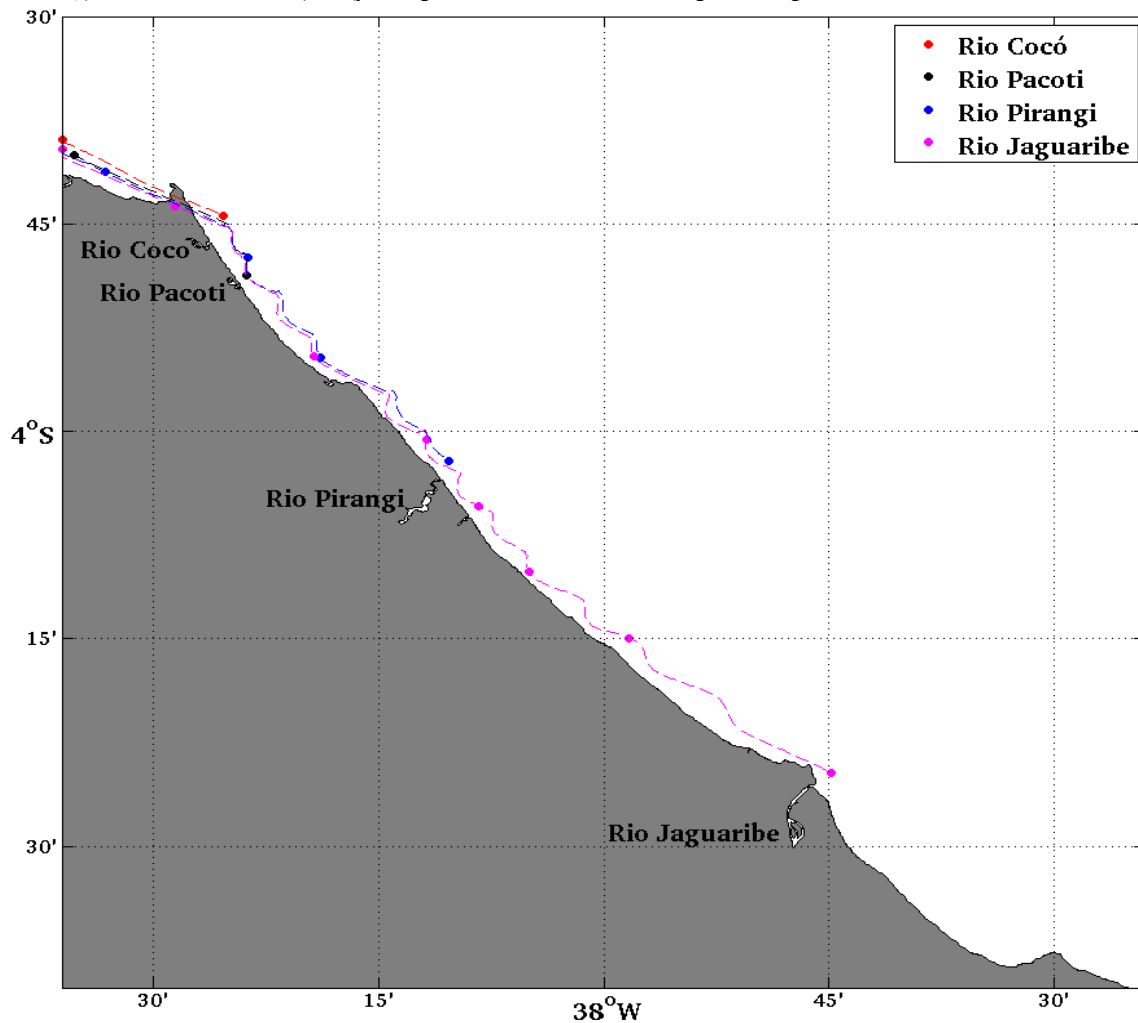


Em relação aos estuários a leste, os flutuadores liberados no rio Cocó atingem o rio Ceará em 20 dias, o rio Curú em 85 dias e o rio Acaraú em 175 dias, aproximadamente; os liberados no rio Pacoti atingem o rio Cocó em 10 dias, o rio Ceará em 30 dias, o rio Curú em 120 dias e o rio Acaraú em 200 dias, aproximadamente; os liberados no rio Pirangi atingem o rio Pacoti em 50 dias, o rio Cocó em 70 dias, o rio Ceará em 90 dias, o rio Curú em 160 dias e o rio Acaraú em 225 dias, aproximadamente; já os liberados no rio Jaguaribe atingem o rio Pirangi em 110 dias, o rio Pacoti em 170 dias, o rio Cocó em 175 dias, o rio Ceará em 190 dias, o rio Curú em 235 dias e o rio Acaraú em 330 dias,

aproximadamente.

Flutuadores liberados em janeiro no estuário mais a leste (rio Jaguaribe) percorrem todo o domínio e são capazes de chegar ao estuário mais a oeste (rio Acaraú) entre novembro e dezembro. Esta conexão na direção leste-oeste pode ser confirmada através da análise das correntes geradas por vento (Figuras 21 e 22, páginas 48 e 49), que foram similares às geradas por vento e maré residual.

Figura 31. Comportamento dos flutuadores dos rios Jaguaribe (magenta), Pirangi (azul), Pacoti (preto) e Cocó (vermelho), a leste do domínio, forçados por maré e vento. Cada ponto representa um intervalo de 30 dias.



Todos os flutuadores liberados apresentaram deslocamento em direção a oeste, percorrendo toda a área desde o descarte até o limite do domínio. Porém, em relação ao experimento forçado pelo vento, os flutuadores forçados por maré e vento se apresentaram mais afastados da costa. Além do transporte de leste para oeste devido à presença dos ventos alísios de nordeste e sudeste, como já foi comentado, os flutuadores são influenciados pelo movimento cíclico da maré, que os afasta da costa e realiza o movimento de vai-e-vem característico desta força.

No geral, quando comparados aos flutuadores forçados pelo vento (Tabela 9), a maior parte dos flutuadores liberados a oeste alcança mais rápido outros estuários, enquanto que a maior parte dos flutuadores a leste tarda mais. Isto provavelmente ocorre porque, nos estuários a leste, a maré agiu por mais tempo e por um espaço maior, retrasando a chegada destes a outros estuários devido ao movimento oscilatório.

Não foi encontrada nenhuma justificativa plausível para o comportamento dos flutuadores forçados por maré e vento liberados a oeste do domínio, que atingiram mais rápido os outros estuários do que os flutuadores forçados somente por vento.

Tabela 9. Comparação entre a conectividade dos flutuadores forçados por vento e por maré e vento, em dias.

Estuários		Vento	Maré e vento
Oeste			
Curú	Acaraú	150	130
Ceará	Curú	60	60
	Acaraú	180	165
Leste			
Cocó	Ceará	20	20
	Curú	80	85
	Acaraú	180	175
Pacoti	Cocó	10	10
	Ceará	30	30
	Curú	120	120
	Acaraú	200	200
Pirangi	Pacoti	40	50
	Cocó	50	70
	Ceará	80	90
	Curú	140	160
	Acaraú	210	225
Jaguaribe	Pirangi	60	110
	Pacoti	90	170
	Cocó	100	175
	Ceará	120	190
	Curú	160	235
	Acaraú	215	330

d) Comparação entre os três experimentos

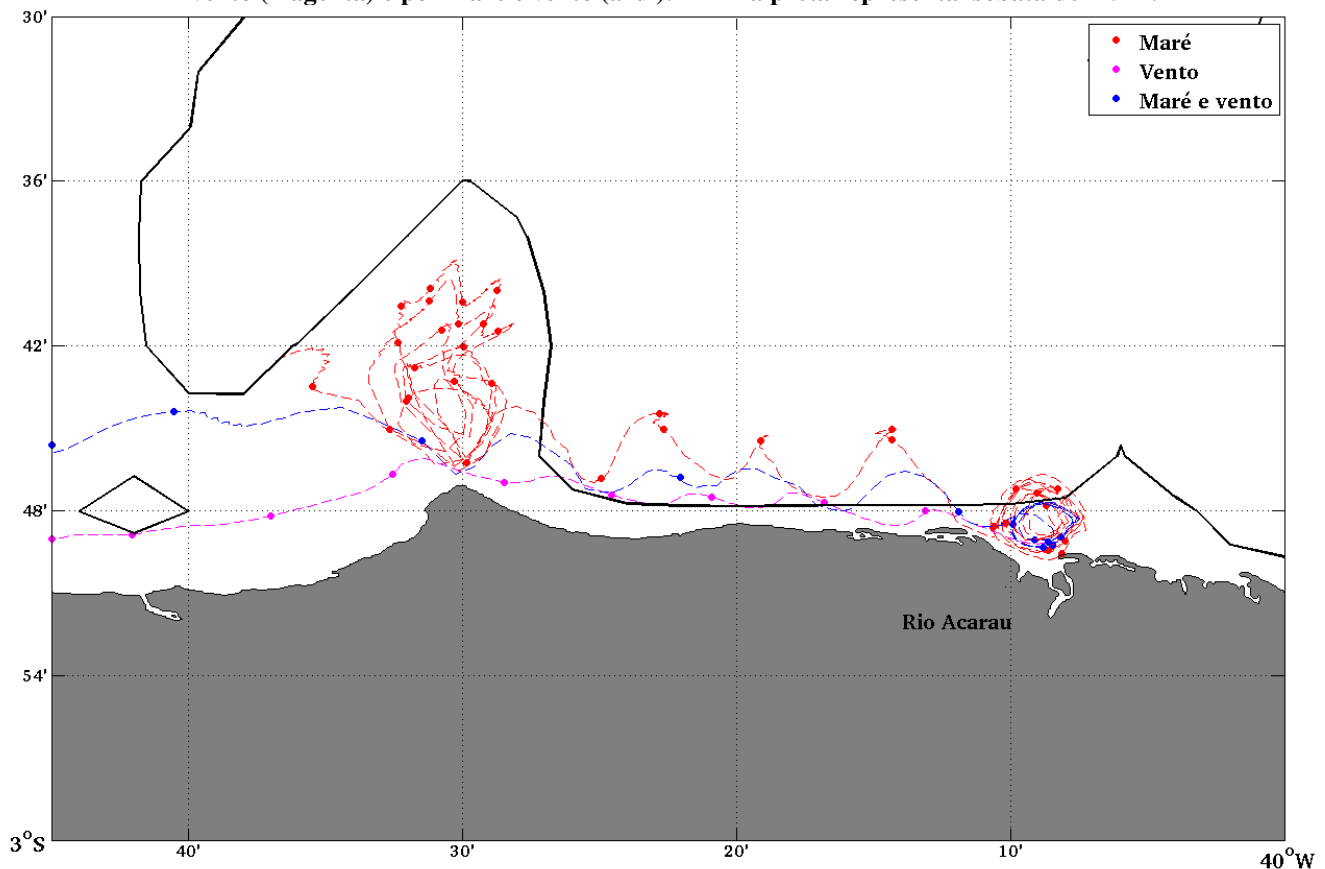
Para observar melhor o movimento gerado durante os três experimentos, os flutuadores do estuário

do rio Acaraú foram representados na Figura 32. O primeiro ponto de cada cor foi o local de lançamento e cada ponto seguinte representa 10 dias percorridos.

Os flutuadores forçados pelo vento (magenta) permaneceram próximo à costa, devido à constância dos ventos, que os empurra em direção à costa. Os flutuadores forçados por maré e vento (azul) apresentaram comportamento similar ao anterior, porém são mais afastados da costa devido ao movimento de vai-e-vem da maré. Os flutuadores forçados somente por maré (vermelho) apresentaram comportamento oscilatório e são os que mais se distanciam em relação à costa, acompanhando a batimetria (como pode ser observado entre $40^{\circ}28''$ e $40^{\circ}35''$ O).

Os flutuadores forçados por vento percorrem o caminho entre $40^{\circ}10'$ e o fim do domínio em 90 dias, enquanto que os forçados por maré e vento percorrem em 110 dias, isto porque a maré leva os flutuadores para regiões mais profundas e de menor velocidade, o que diminui o deslocamento leste-oeste.

Figura 32. Comportamento dos flutuadores liberados no estuário rio Acaraú forçados por maré (vermelho), por vento (magenta) e por maré e vento (azul). A linha preta representa isóbata de -15 m.



e) **Série temporal das componentes u e v das velocidades**

Através da análise das séries temporais das correntes nos três experimentos (Figura 33), pode-se observar a intensidade e a direção predominante para as componentes u e v da velocidade nas quatro estações analisadas.

Para o porto do Mucuripe, as componentes v devido ao vento (azul) e à maré residual+vento (vermelho) foram sempre positivas, o que indica sentido preferencial em direção ao largo da plataforma, enquanto que a devido à maré residual (azul) foi negativa, o que indica direção preferencial para a costa. Já as componentes u devido ao vento e à maré residual+vento foram sempre negativas, o que indica direção preferencial para oeste, enquanto que a devido à maré foi praticamente zero, não apresentando direção preferencial.

Para a estação em Acaraú, todas as componentes v e u apresentaram valores negativos, o que indica sentido preferencial em direção à costa e para oeste.

Para a estação em Camocim, a componente v devido ao vento apresentou valores negativos, em direção à costa, a devido à maré residual+vento variou entre zero e valores negativos, indicando sentido preferencial também em direção à costa, e a devido à maré residual foi sempre positiva, o que indica sentido preferencial em direção ao largo da plataforma. O mesmo comportamento foi observado para as componentes u , o que indica que a direção do vento e da maré residual+vento foram para oeste e a da maré residual foi para leste.

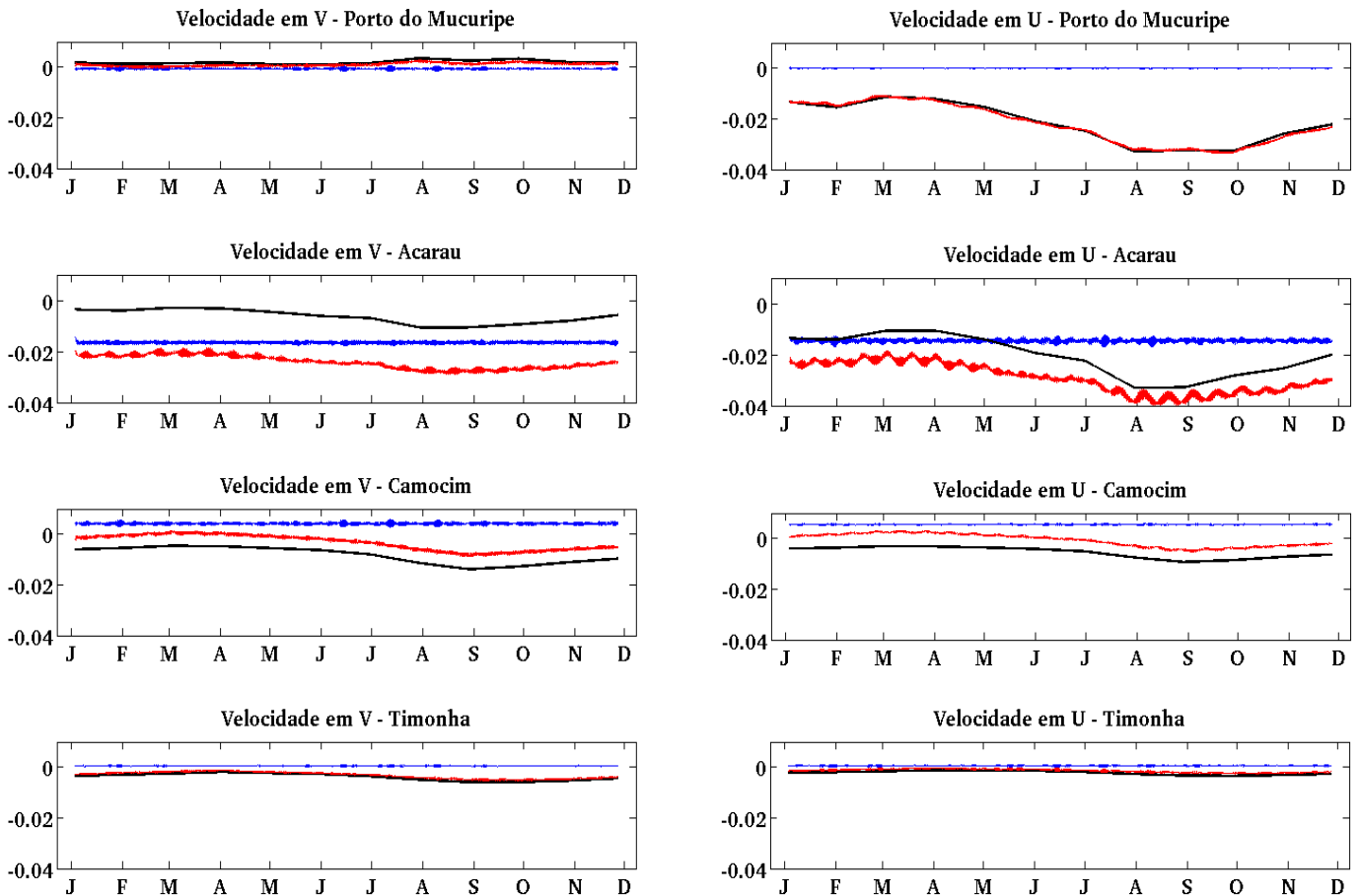
Para a estação em Timonha, as componentes v para o vento e para maré residual+vento foram sempre negativas, indicando sentido preferencial em direção à costa, enquanto que a da maré residual apresentou pequenos valores positivos e sentido em direção ao largo da plataforma. As componentes v devido ao vento e à maré residual +vento também apresentaram valores negativos, o que indica direção preferencial para oeste, enquanto que a devido à maré apresentou pequenos valores positivos e direção preferencial para leste.

No geral, ao se comparar os valores de velocidade, foi possível observar a maior importância da componente paralela (u) das correntes devido à maré e à maré+vento nas estações do Porto do Mucuripe e de Acaraú e a similaridade para as componentes nas estações de Camocim e Timonha, com a componente perpendicular (v) apresentando valores um pouco maiores. Isto justifica o padrão de transporte observado para os flutuadores nos segundo e terceiro experimentos.

Os valores para u e v devido somente a maré nas estações do Mucuripe, Timonha e Camocim oscilaram muito próximo a zero, o que poderia justificar o pequeno transporte sofrido pelos flutuadores durante o primeiro experimento. Entretanto, esta é apenas uma suposição, uma vez que as estações

estão distantes de quase todos os estuários estudados. Já para Acaraú, que apresentou o maior transporte dos flutuadores dentre os estudados, é possível observar maiores valores de u e v devido à maré quando comparados às outras estações, o que justifica o maior deslocamento. Ainda em Acaraú, a componente v apresentou valores negativos e a componente u valores positivos, o que justifica o deslocamento dos flutuadores para oeste e em direção à plataforma.

Figura 33. Série temporal das velocidades médias mensais (em m/s) em u e v devido à maré residual (azul), à maré residual e ao vento (vermelho) e ao vento (preto) para as quatro estações analisadas.



6. CONCLUSÕES

A modelagem numérica através do ROMS se mostrou como uma importante ferramenta na análise da elevação e das correntes geradas por vento e por maré na costa cearense. Entretanto, os resultados obtidos são apenas uma etapa inicial da modelagem hidrodinâmica na PCCE, e as próximas etapas deverão considerar a melhoria da resolução espacial da grade, a utilização de banco de dados de melhor resolução (como o ETOPO2 para a batimetria) e a utilização de modelos em 3D, onde circulações devido a efeitos termohalinos deverão ser incluídas.

Os trabalhos sobre modelagem na PCCE publicados anteriormente estão superestimados e este trabalho é subestimado no segundo semestre, enquanto que os trabalhos com dados observados são pontuais, o que torna necessária a aquisição de dados *in situ* de elevação, correntes e de ventos ao longo da PCCE, a fim de realizar melhor validação do modelo e torná-lo mais eficiente. A maior aquisição de dados *in situ*, que são escassos na área de estudo, levaria a melhora da modelagem, tornando os resultados cada vez mais satisfatórios. Com isto, aumentaria cada vez mais a utilidade da modelagem como suporte para diversas aplicações, como o controle da poluição, o transporte de organismos, a estimativa de intrusões salinas, o dimensionamento de obras, entre outras aplicações para a gestão costeira no Ceará.

Quanto à variabilidade espacial, os campos de elevação e de velocidade em todos os experimentos foram maiores na plataforma continental, devido a sua menor profundidade em relação ao oceano profundo. Os campos de elevação também foram maiores a oeste do domínio, devido a maior distância do ponto anfidrômico do Atlântico Sul.

Quanto à sazonalidade, os maiores valores de elevação e de correntes devido à maré foram encontrados durante a sizígia, devido à potencialização da maré causada pelo alinhamento dos astros, e os maiores campos devido ao vento foram encontrados no inverno, devido a maior intensidade nesta época.

A elevação ocasionada pela maré é maior do que a devido ao vento, o que mostra a maior significância das marés para o nível do mar na área de estudo. Apesar de as correntes de maré apresentaram as maiores velocidades, estas são cíclicas, o que torna o vento o principal responsável pela intensidade e direção das correntes.

A análise espaço-temporal das correntes geradas por vento e por maré residual e vento mostraram correntes com sentido predominante para noroeste e em direção à costa, enquanto que as correntes de maré não apresentaram direção predominante para o transporte de materiais.

A maré sozinha não se mostrou importante no transporte dos flutuadores na PCCE e o contrário

aconteceu em relação aos resultados obtidos para vento e maré, que mostraram a eficiência do vento no transporte dos flutuadores na área de estudo, o que mostra que este é a principal forçante na conectividade entre os estuários.

A conectividade na PCCE se dá apenas na direção leste-oeste em todos os estuários estudados. Biologicamente, isto significa que, por exemplo, uma espécie planctônica ou um poluente presente em um estuário a leste serão transportados pelas correntes em direção a oeste. Espécies planctônicas que estão nos estuários a oeste só apresentam a capacidade de se deslocar para leste em sua fase neotônica.

Em um trabalho futuro, pode ser realizada comparação das trajetórias dos flutuadores durante diferentes estações e adicionar outras forçantes tais como a descarga dos rios e os campos de densidade, para diferenciar o transporte sazonal na área de estudo.

Além disso, devem-se buscar dados que possam validar o modelo e também incluir os espigões e o Porto do Mucuripe, que atuarão como obstáculos na trajetória dos flutuadores.

O ponto principal deste trabalho foi eliminar a visão errada de que as marés são mais importantes devido às grandes intensidades de correntes na PCCE e mostrar, de forma simples, que a influência dessas correntes é menor devido ao seu movimento cíclico e que a interação entre o vento e as correntes residuais de maré é o que realmente causa transporte.

REFERÊNCIAS

- BLANKE, B.; ARHAN, M.; MADEC, G.; ROCHE, S. Warm water paths in the equatorial Atlantic as diagnosed with a general circulation model. **Journal Of Physical Oceanography**, Brest, France, v. 29, n. 11, p.2753-2768, nov. 1999.
- BOWDEN, K. F. **Physical oceanography of coastal waters**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 302 p.
- BROWN, E.; COLLING, A.; PARK, D.; PHILLIPS, J.; ROTHERY, D.; WRIGHT, J.. **Ocean Circulation**. 2. ed. Oxford: Pergamon Press/open University, 2001. 238 p.
- _____. **Waves, tides and shallow-water processes**. 2nd ed. Oxford, England: Butterworth-Heinemann; Milton Keynes, England: Open University, 1999. 227 p.
- CAMELO, H. N.; CARVALHO, P. C. M; LEAL JUNIOR, J. B. V.; ACCIOLY FILHO, J. B. P. Análise estatística da velocidade do vento do estado do Ceará. **Revista Tecnológica**, Fortaleza, v. 29, n. 2, p.211-223, dez. 2008.
- CAMPOS, A. A. **A zona costeira do Ceará: Diagnóstico para a gestão integrada**. Fortaleza, Aquasis, Gráfica e Editora Pouchain Ramos, 2003. 248 p.
- CASTRO, B M. **Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo**. 1996. 245 f. Tese (Doutorado), Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- CHAPMAN, D. C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. **Journal Of Physical Oceanography**, Falmouth, v. 15, n. 8, p.1060-1075, ago. 1985.
- CHENG, R. T.; GARTNER, J. W. Harmonic analysis of tides and tidal currents in South San Francisco Bay, California. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, San Francisco, v. 21, n. 1, p.57-74, jul. 1985.
- CIRANO, M. **Técnicas para a simulação de forçantes remotas em um modelo de circulação oceânica regional**. In: Workshop Interno sobre Modelagem de Derramamento de Óleo no Mar, 2002, Rio de Janeiro. Diretrizes técnicas para a modelagem de derramamento de óleo no mar: acordo de cooperação e apoio técnico científico ANP/IBAMA, 2002.
- DAS, P. **Modelling of Ocean Tides**. 1998. 158 f. Tese (Doutorado) – School of Philosophy, University Of New South Wales, Sydney, 1998.
- DAVIES, J. L. A morphogenic approach to world shorelines, **Zeitschrift für Geomorphology**, 8, Mortensen Sonderheft, p. 127-142, 1964.
- _____. **Geographical Variation in Coastal Development**. 2. ed. London: Longman, 1980.

221 p.

DE JESUS, L. C. **Avaliação da hidrodinâmica forçada pela maré astronômica e vento na plataforma continental do Espírito Santo**. 2011. 45 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2011.

DEFANT, A. **Physical Oceanography**. Oxford: Pergamon Press, 1961. 598 p.

DIAS, F. J. S. **Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações**. 2011. 340 f. Tese (Doutorado) - Curso de Oceanografia, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DIAS, F. J. S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D. Anais do V Simpósio Brasileiro de Oceanografia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 2011, Santos. **Circulação na plataforma continental ao largo do estuário do rio Jaguaribe (Ceará-Nordeste-Brasil) durante a estação chuvosa de 2009**. Santos: Simpósio Brasileiro de Oceanografia, 2011. p. 1 - 6.

DIMARCO, S. F.; REID, R. O. Characterization of the principal tidal current constituents on the Texas-Louisiana shelf. **Journal Of Geophysical Research**, [s. L.], v. 103, n. 2, p.3093-3109, fev. 1998.

EGBERT, G.; BENNET, A.; FOREMAN, M. Topex/poseidon tides estimated using a global inverse model. **Journal Geophysical Research**, [S. l.], v. 99, n. 12, p.24821-24852, dez. 1994.

EGBERT, G; EROFEEVA, A. The OSU TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO. Disponível em: <<http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>>. Acesso em: 20 jul. 2013.

FALCO, P.; GRIFFA, A.; POULAIN, P.M.; ZAMBIANCHI, E. Transport properties in the Adriatic Sea as deduced from drifter data. **Journal Of Physical Oceanography**, [s. L.], v. 30, n. 8, p.2055-2071, ago. 2000.

FLATHER, R. A. A tidal model of the northwest european continental shelf. **Mémoires de La Société Royale Des Sciences Liège**, Liège, v. 10, n. 6, p.141-164, ago. 1976.

FREIRE, G. S. S. **Geologia marinha da plataforma continental do Ceará**. 1985. 132 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1985.

FREIRE, G. S. S.; CAVALCANTI, V. M. M. **A Cobertura sedimentar quaternária da plataforma continental do estado do Ceará**. Brasília: Departamento Natural de Produção Mineral, Vol. 1, 42 p. 1998.

GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2010, 426 p.

HAIKVOGEL, D. B.; ARANGO, H. G.; HEDSTROM, K.; BECKMANN, A.; MALANOTTE-RIZZOLI, P.; SHCHEPETKIN, A. F. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics Of Atmosphere And Oceans**, [s. L.],

v. 32, n. 3-4, p.239-281, ago. 2000.

_____. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. **Journal Of Computational Physics**, [s. L.], v. 227, n. 7, p.3595-3624, mar. 2008.

HARARI, J.; CAMARGO, R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, São Paulo, v. 42, n. 1-2, p.35-54, 1994.

JAROSZ, E.; MURRAY, S. P.; INONE, M. Observations on characteristics of tides in the Bab el Mandab Strait. **Journal Of Geophysical Research**, [s. L.], v. 110, n. 03015, p.1-17, mar. 2005.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, [s. L.], v. 107, n. 9, p.1140-1153, set. 1979.

_____. Rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, [s. L.], v. 108, n. 04, p.488-498, abr. 1980.

LARGE, W. G.; POND, S. Open Ocean Momentum Flux Measurements in Moderate to Strong Winds. **Journal Of Physical Oceanography**, [s. L.], v. 11, n. 3, p.324-336, mar. 1981.

LEMOS, A. T. **Modelagem numérica da maré barotrópica na costa do Espírito Santo**. 2006. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2006.

LETT, C.; VEITCH, J.; VAN DER LINGEN, C.D.; HUTCHINGS, L. Assessment of an environmental barrier to transport of ichthyoplankton from the southern to the northern Benguela ecosystems. **Marine Ecology, Progress Series**, [s. L.], v. 347, p. 247-259, out. 2007.

MACCREADY, P.; GEYER, W. R. Estuarine salt flux through an isohaline surface. **Journal Of Geophysical Research**, [s. L.], v. 106, n. 6, p.11629-11637, jun. 2001.

MAIA, L. P. **Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-BRASIL): implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral**. 1998. 269 f. Tese (Doutorado) - Facultat de Geologia, Departamento de D'estratigrafia I Paleontologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, 1998.

MARCHESIELLO, P.; MCWILLIAMS, J. C.; SHCHEPETKIN, A. F. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. **Ocean Modelling**, [s. L.], v. 3, n. 1-2, p.1-20, 2001.

MESQUITA, A. R.; FRANÇA, C. A. S. Recuperação do Marégrafo pelágico MARK IV lançado no Atlântico Sul (32 S; 36 W) pelo Navio Britânico RRS James Clak ROSS e alguns resultados de

preliminares da análise dos dados coletados. **Pesquisa Naval (SDM), Serviço de Documentação**, [s. L.], v. 11, p.319-334, 1998.

MILLER, C. B.; LYNCH, D. R.; CARLOTTI, F.; GENTLEMAN, W.; LEWIS, C. V. W. Coupling of an individual-based population dynamic model of *Calanus finmarchicus* to a circulation model for the Georges Bank Region. **Fisheries Oceanography**, [s. L.], v. 7, n. 3-4, p.219-234, dez. 1998.

MOBERG, F.; RÖNNBÄCK, P. Ecosystem services of the tropical seascape: interaction, substitutions and restoration. **Ocean & Coastal Management**, [s. L.], v. 46, n. 1-2, p.27-46, 2003.

MORAIS, J. O. Aspectos da **Geologia Ambiental Costeira no Município de Fortaleza – Ceará**. Tese de Professor Titular, 318 pp. ilus., Fortaleza, 1980.

OLIVEIRA, K. S. S. **Comportamento da Maré e das Correntes de Maré em um Sistema Estuarino utilizando o modelo Regional Ocean Modeling System (ROMS)**. 2010. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2010.

OLIVEIRA, P. R. A. **Caracterização morfológica e sedimentológica da plataforma continental brasileira adjacente aos municípios de Fortim, Aracati e Icapuí – CE**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

PAWLOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical Tidal Harmonic Analysis including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. **Computers & Geosciences**, [s. L.], v. 28, n. 8, p.929-937, out. 2002.

PEREIRA, A. F.; BELÉM, A.L.; BELMIRO, M.C.; GEREMIAS, R. Tide-topography interaction along the eastern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research**, São Paulo, v. 25, n. 12-13, p.1521-1539, ago. 2005.

PEREIRA, S. P.; ROSMAN, P.C.C.; ALVAREZ, C.; OLIVEIRA, R.S.; SCHETINI, C.A.F.; VIEIRA, R. H. S. F. **Modeling of Coastal Water Contamination in Fortaleza (Northeast Of Brazil)**. International Symposium on Outfall Systems, Mar del Plata, Argentina, 2011.

PINHEIRO, L. S.; MORAIS, J. O.; MEDEIROS, C. Mudanças da linha de praia e feições morfológicas em Cascavel - Estado do Ceará. **Arquivo de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 34, n. 1, p.117-130, 2001.

POWELL, B. S.; MOORE, A. M.; ARANGO, H. G.; DI LORENZO, E.; MILLIFF, R. F.; LEBEN, R. R. Near real-time ocean circulation assimilation and prediction in the Intra-Americas Sea with ROMS. **Dynamics Of Atmospheres And Oceans**, [s. L.], v. 48, n. 1-3, p.46-68, out. 2009.

QIU, Z. F.; DOGLIOLI, A. M.; HU, Z.Y.; MARSALEIX, P.; CARLOTTI, F. The influence of hydrodynamic processes on zooplankton transport and distributions in the North Western

Mediterranean: estimates from a Lagrangian model. **Ecological Modelling**, [s. L.], v. 221, n. 23, p.2816-2827, nov. 2010.

RIEHL, H. **Meteorologia Tropical**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1965. 426 p.

ROSMAN, P. C. C. Os Modelos para Recursos Hídricos. In: A MAGRINI,; SANTOS, M dos. **Gestão Ambiental em Recursos Hídricos**. Rio de Janeiro: Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, Coppe/ufrrj, 2001. Cap. 2 (Parte III).

SCHETTINI, C. A. F.; MAIA, L. P.; TRUCCOLO, E. L. Análise da variabilidade do nível da água na costa de Fortaleza, Ceará. **Arquivo de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p.27-32, 2011.

SEMACE. **Diagnóstico sócio-ambiental, macrozoneamento costeiro e uso projetado do solo da costa leste do Estado do Ceará**. Fortaleza: Inédito, 1997.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional ocean modeling system: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. **Ocean Modelling**, [s. L.], v. 9, n. 4, p.347-404, 2005.

SIGNORINI, S. R.; MIRANDA, L. B. Tidal and low-frequency currents near the shelf break: Northeastern coast of Brazil. **Journal Of Physical Oceanography**, [s. L.], v. 13, n. 11, p.2107-2115, nov. 1983.

SILVA, D. R. F.; LIMA, M. C. Trabalho de campo na zona costeira do Ceará: por uma interpretação densa no percurso Fortaleza - Fortim. **Revista Discente Expressões Geográficas**, [s. L.], v. 07, p. 253-269, 2011.

SILVA, P. K.; ARAGAO, M. R. S.; MAGALY, M. F.; SILVA, A. B. **Caracterização da variabilidade do vento no aeroporto internacional de Fortaleza, Ceará: Análise de velocidade**. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Universidade Federal do Pará - Belém, 2010. p. 1–4.

SOARES, J. R.; CASTRO, B. M. Numerical Modelling of the Response Of Ceará Continental Shelf Waters To Wind Stress Forcing. **Revista Brasileira de Oceanografia**, São Paulo, v. 44, n. 2, p.135-153, 1996.

TEIXEIRA, C. E. P. **Dynamics of Spencer Gulf: a numerical study**. 2010. 180 f. Tese (Doutorado) - School Of Mathematics and Statistics, University Of New South Wales, Adelaide, 2010.

VIANNA, M. L.; MENEZES, V. V. Singular Spectrum Analysis of Nonstationary Tidal Currents Applied to ADCP Data from the Northeast Brazilian Shelf. **Journal Of Atmospheric And Oceanic Technology**, [s. L.], v. 23, n. 1, p.138-151, jan. 2006.

ZEMBRUSKI, S. **Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes**. In: PROJETO REMAC. Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas

oceânicas adjacentes. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. DIN-TEP (Série REMAC no. 7), 1979. p. 129–177.

ZIMMERMAN, J. T. F. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) current. **Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics**, [s. L.], v. 11, n. 1, p.35-47, 1978.