



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
CURSO DE OCEANOGRAFIA

FRANCISCO THIAGO FRANCA PARENTE

DISPERSÃO DE MATERIAIS NA REGIÃO COSTEIRA DE FORTALEZA, CE -
BRASIL

FORTALEZA
2013

FRANCISCO THIAGO FRANCA PARENTE

**DISPERSÃO DE MATERIAIS NA REGIÃO COSTEIRA DE FORTALEZA, CE -
BRASIL**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

FORTALEZA

2013

FRANCISCO THIAGO FRANCA PARENTE

**DISPERSÃO DE MATERIAIS NA REGIÃO COSTEIRA DE FORTALEZA, CE -
BRASIL**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Prof. Dr. Maria Oziléa Bezerra Menezes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

AGRADECIMENTO

À minha família, pelo apoio prestado em todos os momentos da minha vida, inclusive durante a minha graduação.

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, pela excelente orientação, buscando sempre passar seus conhecimentos de forma clara e concisa, sempre estando disponível quando solicitado.

Aos professores participantes da banca examinadora Maria Oziléa Bezerra Menezes e Antônio Geraldo Ferreira pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À professora Maria Oziléa Bezerra Menezes por ter me orientado nos primeiros anos de curso, me mostrando o caminho a seguir na graduação.

À Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do projeto “TRANSAQUA – Gestão e Segurança da Navegação e do Transporte Aquaviário: Desenvolvimento Ambientamente Sustentável de Sistemas Marítimos e Fluviais” pela estrutura computacional disponível para realização dos trabalhos.

Aos colegas da turma de graduação, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

À minha namorada, Patrícia Machado, pelo apoio prestado durante todo o período de faculdade.

“Tenho esperança de que um maior conhecimento do mar, que há milênios dá sabedoria ao homem, inspire mais uma vez os pensamentos e as ações daqueles que preservarão o equilíbrio da natureza e permitirão a conservação da própria vida.” Jacques Cousteau

RESUMO

O conhecimento da circulação costeira e dos processos de transporte e dispersão de materiais e contaminantes é importante para diversas áreas. Neste trabalho, o modelo numérico Delft3D na sua versão barotrópica é empregado para estudar o efeito do vento, marés e ondas na dispersão de materiais e substâncias pela circulação costeira do estado do Ceará. Para tanto, foram utilizados três cenários: simulação forçada apenas por maré, simulação forçada por maré e vento e, finalmente, simulação forçada por maré, vento e onda. Estas simulações foram realizadas para condições de verão e inverno. Neste estudo mostramos que a maré é o principal forçante da variabilidade total da circulação de Fortaleza, o vento é mais importante para os padrões de dispersão de materiais e as ondas possuem pouca influência no campo de velocidade local. No inverno, o campo de velocidade local e os padrões de dispersão de materiais são mais intensos na região costeira de Fortaleza. Observou-se ainda a influência das obras de engenharia costeira nestes fatores. O estudo mostrou que o modelo Delft 3D é capaz de reproduzir a circulação na região e que o mesmo pode ser utilizado em estudos de transporte langrageano, sendo uma importante ferramenta para a determinação do efeito de obras costeiras ao longo da orla de Fortaleza.

Palavras-chave: Circulação Costeira. Delft3D. Modelagem Numérica. Plataforma Continental do Ceará.

ABSTRACT

The study of the coastal circulation and the transport and dispersion of waste material and contaminants is important to many areas. In this work, the barotropic version of the Delft3D model is used to understand the effects of winds, tides and waves on the dispersion of waste materials and substances by coastal circulation in state of Ceará. In order to do that, we used simulation with a constructive approach: the first simulation is forced only by tides; in the second simulation, winds are included and finally in the third simulation waves are included. The simulations were performed using wind and summer conditions. In this study we show that the tides are the main forcing of the total variability of the coastal circulation in Fortaleza and the winds are more important to the dispersion of waste materials and substances. The waves shown little influence on the velocity field and on the dispersion patterns. During winter, the currents and dispersion of materials are more intense. We also observed the influence of coastal structures in the current and dispersion fields. We have showed that the Delft 3D model is able to reproduce the circulation in the region and that it can be used in studies of langragean transport. The model can be used as an important tool for the determining the effects of coastal constructions along the edge of Fortaleza.

Keywords: Coastal Circulation. Delft3D. Numerical Modeling. Ceará Continental Shelf.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem da orla de Fortaleza e suas obras de engenharia oceânica.....	16
Figura 2 - Grade utilizada na modelagem e ponto (PONTO 1) de extração dos dados para validação dos resultados do modelo.	23
Figura 3 - Pontos de análise dos dados de Velocidade.	25
Figura 4 – Elipses de maré da componente M2 (<i>principal lunar semidiurna</i>).	27
Figura 5 – Elipses de maré da componente S2 (<i>principal solar semi-diurna</i>).	28
Figura 6 – Elipses de maré da componente N2 (<i>larger elliptical lunar semidiurna</i>).	29
Figura 7 – Elipses de maré da componente K1.....	30
Figura 8 – Elipses de maré da componente O1.	31
Figura 9 - Componente u de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de verão (m/s).	32
Figura 10 - Componente v de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de verão (m/s).	33
Figura 11 - Componente u de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de inverno (m/s).	34
Figura 12 - Componente v de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de inverno (m/s).	34
Figura 13 - Dados de velocidade na componente u em diferentes pontos para a simulação ONDA durante condições de inverno (m/s). Ver figura 3 para a disposição espacial dos pontos.....	35
Figura 14 - Dados de velocidade na componente v em diferentes pontos para a simulação ONDA durante condições de inverno (m/s). Ver figura 3 para a disposição espacial dos pontos.....	36
Figura 15 - Residual no verão para o ponto 3.	37
Figura 16 - residual no inverno para o ponto 3.....	38
Figura 17 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição MARÉ durante os meses de verão. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.	39
Figura 18 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição VENTO durante os meses de verão. As setas e as	

cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.Campo de velocidade média para a condição VENTO no verão.....	40
Figura 19 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição ONDA durante os meses de verão. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.	41
Figura 20 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição VENTO durante os meses de inverno. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.	42
Figura 21 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição ONDA durante os meses de inverno. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.	43
Figura 22 – Detalhe da região próxima ao porto do Mucuripe para a condição ONDA durante a simulação nas condição de verão, onde pode-se observar a formação de um vórtice na circulação local.....	44
Figura 23 - Ponto de descarte do traçador para todas as situações.	46
Figura 24 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição MARÉ, 05 dias após o descarte durante os meses de verão.	47
Figura 25 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição MARÉ, 10 dias após o descarte durante os meses de verão.	48
Figura 26 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição VENTO, 05 dias após o descarte durante os meses de verão.	49
Figura 27 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição VENTO, 10 dias após o descarte durante os meses de verão.	50
Figura 28 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição ONDA, 05 dias após o descarte durante os meses de verão.	51
Figura 29 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição ONDA, 10 dias após o descarte durante os meses de verão.	52
Figura 30 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição VENTO, 02 dias após o descarte durante os meses de inverno.	53

Figura 31 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição VENTO, 04 dias após o descarte durante os meses de inverno.	54
Figura 32 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição ONDA, 02 dias após o descarte durante os meses de inverno.	55
Figura 33 - Dispersão do traçador (kg/m ³) na condição ONDA, 04 dias após o descarte durante os meses de inverno.	56
Figura 34 - Percurso do derivador na condição MARÉ.	57
Figura 35 - Percurso dos derivadores na condição VENTO para o verão e inverno.	58
Figura 36 - Percurso dos derivadores na condição ONDA para o verão e inverno.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características da grade utilizada na modelagem	23
Tabela 2 - Comparação entre as amplitudes (cm) dos harmônicos fornecidos pelo IBGE (Amp. obs.) e modelados (Amp. mod.) para a estação do Mucuripe.	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Área de estudo	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 Objetivo geral	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 O Modelo DELFT3D	20
3.2 Delft Dashboard	21
3.3 A grade	21
3.5 Condição de contorno	24
3.5.1 <i>Contorno lateral</i>	24
3.5.2 <i>Contorno de fundo</i>	25
3.6 Validação do modelo	25
3.7. Tratamento dos dados	25
3.7.1 <i>Pontos de análise temporal dos dados</i>	25
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 Validação	27
4.2 Elipses de maré	27
4.3 Campo de velocidade	32
4.5 Fluxo Residual	37
4.6 Dispersão do Traçador	46
4.7 Derivadores	57
5 CONCLUSÃO	61

1 INTRODUÇÃO

A circulação oceânica costeira possui grande complexidade, devido aos inúmeros processos que a compõe, desde simples processos advectivos até trocas turbulentas. Uma característica distintiva desta circulação é a interação que existe entre as condições do fundo do mar e as camadas sobrepostas de água. (JOHNS, B. 1983)

Em virtude dessa complexidade dos processos dinâmicos que envolvem a circulação costeira, seu estudo necessita de considerações que possibilitem uma melhor análise e conhecimento da interação desses processos.

Em meio às considerações, sabe-se que os principais forçantes que atuam em tal circulação são: o vento, através da sua ação direta na superfície da água; as ondas e as marés, através da interação com o fundo. O acoplamento desses forçantes dá origem às correntes costeiras.

A ação desses forçantes ocorre através da transferência de momento, tendo o vento responsável por transferir momento da atmosfera para o oceano, dando origem as ondas que transportam e dissipam essa energia ao entrarem em contato com o fundo. Essas interações energéticas são responsáveis por criarem processos turbulentos e correntes.

A energia das correntes geradas pelo vento irá depender da relação entre: topografia; intensidade e direção; dimensão da área sobre influência; e a persistência da tensão de cisalhamento do vento. Em regiões costeiras, este tipo de corrente ocorre paralelamente às isóbatas, mantendo o balanço geostrófico na direção perpendicular à costa (CASTRO et al., 1996).

A transferência de momento pela maré, produto da atração gravitacional entre a Terra e a Lua, ocorre pela perda de energia na interação da maré com o fundo oceânico e na interação não linear entre os harmônicos que a compõe. Segundo Dias (2011), dentre os constituintes harmônicos, o M2 é dominante nas oscilações do nível do mar na Plataforma Continental Cearense (PCCE), seguida pelas constituintes S2, K1 e O1.

A circulação induzida pela maré é composta por um fluxo oscilatório (maré pura) e um fluxo residual (maré residual). A maré residual se trata do produto da interação da maré com o fundo e da interação não linear dos harmônicos que a compõem. Embora a maré pura tenha grande influência nas oscilações do nível do mar e das correntes sobre a plataforma, a maré residual é responsável por controlar o transporte significativo de materiais (JOHNS, B., 1983). Isto se deve ao caráter estacionário e cíclico das marés.

Parte da circulação costeira é composta pelo fluxo residual, produto da subtração do fluxo total pelo fluxo gerado pelas oscilações do nível do mar da maré astronômica. Em estudos langrangeanos costeiros, o conhecimento deste componente é importante, pois o mesmo é o grande responsável pela distribuição e transporte.

O conhecimento dos processos de transporte e dispersão na superfície de um sistema é importante para diversas áreas, como: o estudo de estimativas de trajetórias e taxa de espalhamento de manchas de óleo (SOOMER et al., 2010); dispersão de larvas e de outros organismos (CORELL et al., 2011); estudo do transporte em larga escala das propriedades da água; planejamento de operações de resgate ou de busca de objetos (ASSIREU, A. T.; PACHECO, F. S.; PEREIRA, R. R., 2013); e melhor entendimento da hidrodinâmica de um corpo d'água.

Os métodos observacionais langrangeanos, com auxílio de traçadores e derivadores, são precursores dos estudos da circulação oceânica. Segundo Magio (2000), em 20 d.C ocorreu o primeiro relato histórico do uso de traçadores, quando o tetrarca Herodes Antipas utilizou cascas moídas para identificação das fontes do Rio Jordão.

De acordo com Bedmar (1972), traçador é uma substância ou produto que permite estudar seu comportamento em relação a um determinado processo físico ou químico, quando incorporado à massa de outra substância. Há diferentes tipos de traçadores, onde se pode classificá-los em artificiais, quando adicionado intencionalmente pelo homem, e naturais, originados de processos naturais ou de derrames acidentais (ALEXANDER e QUINLAN, 1992).

Os traçadores podem ser diferenciados entre passivo e ativo, sendo chamado de passivo aquele que não modifica a densidade do sistema, conseqüentemente, não afetando dinamicamente as respostas no campo de velocidade do fluído.

Em função do avanço tecnológico-científico houve a expansão do estudo e da aplicabilidade dos traçadores, passando a ser explorado em quase todos os campos da ciência. Vale ressaltar o maior interesse em estudos de processos ambientais, industriais e biológicos (BJ RNSTAD; MAGGIO, 1994), destacando-se a aplicação dos traçadores em estudos de caracterização de reservatórios de petróleo (GIORI, 2011).

Atualmente, a modelagem numérica e o sensoriamento remoto são as ferramentas mais utilizadas e aperfeiçoadas em estudos oceanográficos. Tais técnicas trouxeram maior viabilidade para realização desses estudos, visto que o processo de coleta de informações, bem como os estudos em campo, demanda tempo e investimento financeiro elevado.

Giori (2011) idealizou cenários através de modelagem de dispersão de traçador com o intuito de simular casos de despejo acidental de poluente no rio Guandu, RJ. Tal trabalho se mostrou eficiente na simulação do transporte do poluente solúvel e serviu como um mecanismo de alerta para situações de despejos acidentais, permitindo a determinação aproximada do tempo de residência e da concentração para o lançamento proposto.

Neste trabalho, a dispersão de materiais e substâncias pela circulação na região costeira do estado do Ceará é estudada através do uso de traçadores passivos com a utilização de um modelo numérico barotrópico, tendo como principais forçantes: a maré, o vento e a onda.

Os resultados obtidos pela simulação irão auxiliar no entendimento da hidrodinâmica local, assim como favorecer o estudo da circulação oceânica local, da dinâmica das populações marinhas e da dispersão de poluentes e contaminantes.

1.1 Área de estudo

A Plataforma Continental Nordeste (PCNE) do Brasil está inserida na margem equatorial Atlântica, possuindo profundidade inferiores a 50 m, podendo alcançar 70 m na borda da plataforma. Sua largura varia, de forma geral, de 40 a 50 km ao largo de Salvador até 75 e 80 km ao largo de Fortaleza (SILVA E ALVARENGA, 1994). Nesta região, situa-se a PCCE, situada entre 37° e 41° 20' de longitude oeste e 2° a 5° de latitude sul, possui profundidade variando entre 10 - 100 m e declividade média em torno de 2 m/ km (DIAS, 2011).

As marés características da costa cearense são representadas por ondas semidiurnas com período médio de 12,4 h e amplitude máxima e mínima, em média, de 3 m e 0,5m, respectivamente. Tais valores foram encontrados pelo estudo pioneiro de Morais (1980), quando analisou dados medidos na bacia do Porto do Mucuripe. Segundo Dias (2011), as componentes semidiurnas (M2 e S2) são as mais energéticas dos harmônicos de maré.

Os ventos no nordeste do Brasil apresentam um forte ciclo sazonal em um período anual, tendo maior intensidade entre agosto e outubro e menor intensidade entre março e abril. Isto é controlado pela oscilação meridional da zona de convergência intertropical (ZCIT), que está relacionado com a mudança das estações (MAIA, 1998).

A ZCIT é uma zona de baixa pressão atmosférica na região equatorial do globo terrestre, onde há convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste. Seu deslocamento ocorre de acordo com as mudanças na incidência dos raios solares no globo terrestre, tendo sua posição variando entre os lados do equador.

No verão austral, entre os meses de janeiro e maio, a ZCIT tende a se posicionar mais ao sul, enquanto que durante os meses de junho a dezembro, a ZCIT se incursiona mais ao norte da linha do equador (XAVIER et al. , 2003).

Dias (2011) observou que a tensão de cisalhamento do vento é o principal agente na transferência de momento para as águas da PCCE e que a dinâmica local é dominada pelo sistema barotrópico, onde há geração de correntes na direção do vento como resposta a sua ação.

Maia (1998), observando o padrão de variação dos valores da velocidade média dos ventos, encontrou um ciclo sazonal, tendo maiores valores no segundo semestre.

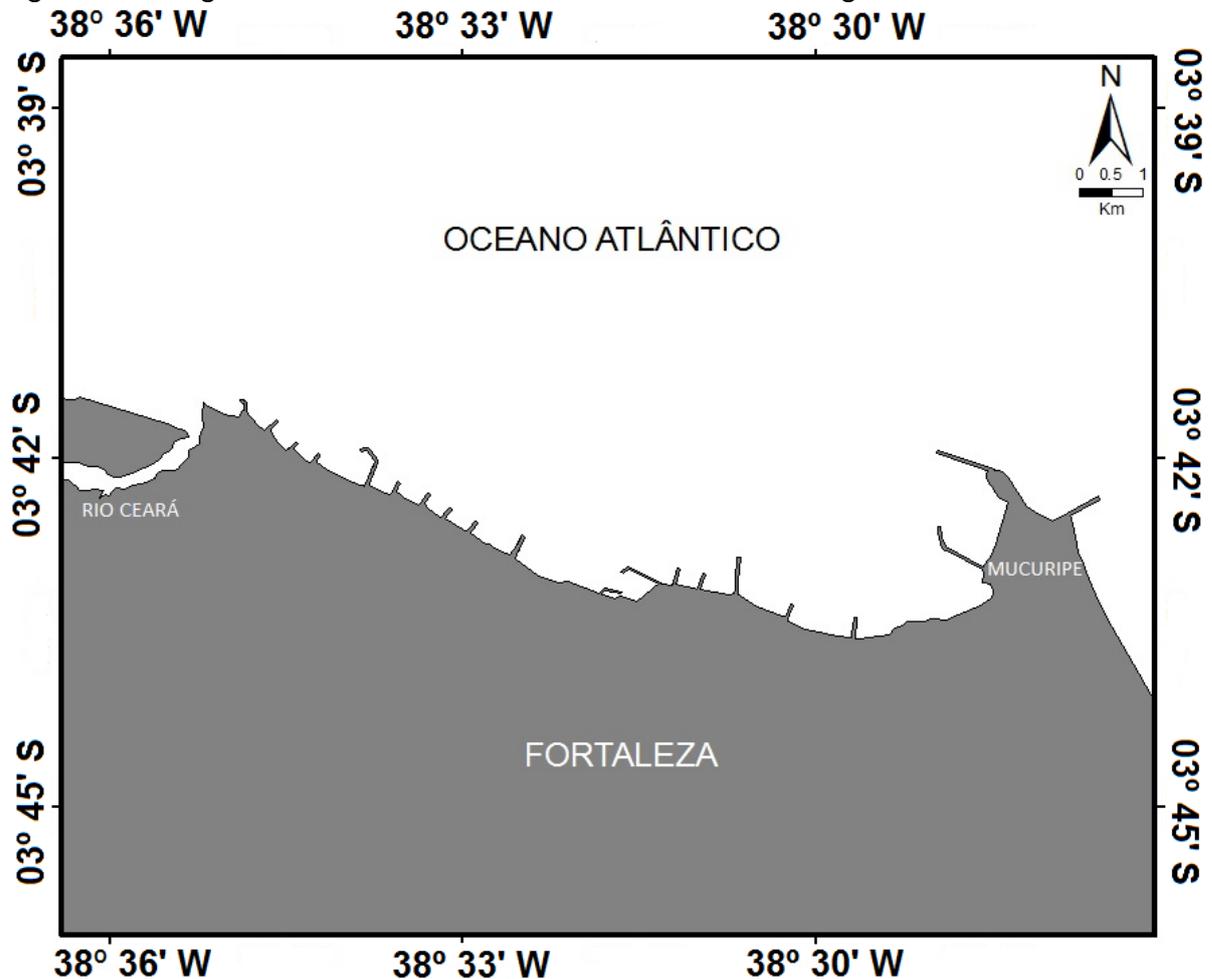
As ondas que banham o estado do Ceará possuem grande relação com o regime de ventos da região, tendo suas direções variando entre os quadrantes E, E-NE e E-SE. Silva et al. (2011) realizou análise das séries históricas de ondas na costa do Ceará e identificou que há predominância no quadrante de 40-60° durante os meses de janeiro a abril e no quadrante de 100-120° durante os meses de junho a novembro. No mesmo estudo, cerca de 80% das ondas apresentaram um período de pico entre 4 e 9 s (ondas sea) e o restantes ~20%, características do primeiro semestre, apresentaram períodos de pico acima de 10 s (ondas swell). Ondas swell que incidem na costa do Ceará são decorrentes de fenômenos meteorológicos extratropicais no oceano Atlântico Norte.

A porção da PCCE explorada neste trabalho está entre 038° 26' e 038° 51' de longitude oeste e 03°27' e 03°48' de latitude sul, englobando o litoral da região metropolitana de Fortaleza e municípios vizinhos. A profundidade média local varia entre 10 e 30 m, com uma declividade média em torno de 2m/km (DIAS, 2011), apresentando um relevo relativamente plano.

Nesta região está situado o Porto do Mucuripe que teve sua instalação iniciada em 1938. Em virtude de problemas iniciais na instalação do Porto, foi necessária a construção de um molhe de proteção para conter ondulações que causavam avarias aos navios ancorados. Tal molhe, foi implantado no ponto de transição do alinhamento da costa, denominado de Ponta do Mucuripe (PITOMBEIRA, E. S., 1976).

Segundo Paula et. tal (2013), o molhe do Porto do Mucuripe induziu intensos processos de erosão em praias próximas ao porto. Em virtude disto, foram construídos diversas estruturas de contenção ao longo da costa de Fortaleza, com o intuito de mitigar os processos erosivos. De acordo com imagens do satélite *Landsat*, é possível observar 20 dessas estruturas (molhes e espigões) espalhados entre o Mucuripe e a foz do rio Ceará (FIGURA 1).

Figura 1 - Imagem da orla de Fortaleza e suas obras de engenharia oceânica.



Fonte: O autor.

Com a construção do Porto, os interesses econômicos de Fortaleza passaram a se concentrar na região costeira, causando intenso desenvolvimento urbano nessa região (Dantas, 2002). Junto ao aumento da urbanização, ocorreu acréscimo aos impactos antrópicos no ambiente, tornando indispensável o monitoramento desses impactos.

Apesar do potencial desses impactos no meio marinho, não existem observações e modelos numéricos realísticos que possam servir como ferramentas mitigadoras em caso de acidentes. Por exemplo, no ano de 2012 ocorreu o naufrágio do navio *Seawind* próximo ao porto de Mucuripe, o que resultou em um pequeno derrame de óleo combustível. Devido à dimensão do vazamento, o mesmo não resultou em graves problemas ambientais, porém as perguntas a serem feitas são: o que aconteceria hoje em caso de um vazamento em uma plataforma de

exploração na PCCE? O que aconteceria no caso de um vazamento no terminal de combustíveis do porto de Mucuripe?

Este trabalho visa contribuir para tais problemáticas e questionamentos citados, fornecendo uma nova ferramenta capaz de representar as características hidrodinâmicas locais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a dispersão de materiais na região costeira do estado do Ceará através de modelagem numérica realizada com o modelo Delft3D, considerando os forçantes maré, vento e onda.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o padrão de dispersão no verão e no inverno.
- Hierarquizar a ação dos forçantes sobre a dispersão dos materiais;
- Evidenciar pontos de acúmulo dos materiais;
- Auxiliar políticas de mitigação e de monitoramento dos impactos causados pela descarga de poluentes na região;

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 O Modelo DELFT3D

O modelo Delft3D, desenvolvido pela *WJ Delft Hydraulics* em conjunto com a *Delft University of Technology*, é um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional projetados para simular: fluxo hidrodinâmico; qualidade de água; geração e propagação de ondas curtas; transporte de sedimento; transporte de calor e sal. Trata-se de um modelo com superfície livre, podendo ocorrer variações no nível do corpo d'água, baseado em diferenças finitas (DELFT3D, 2013).

Há uma interface no Delft3D, onde diversos módulos individuais, que possuem abordagens distintas, estão agrupados de forma que haja uma interação entre eles. Tai módulos podem alternar entre um campo 2D e 3D. Neste trabalho, os módulos utilizados foram: Delft3D-FLOW (Df) e Delft3D-WAVE (Dw) (DELFT3D, 2013).

Df é um programa para a simulação hidrodinâmica multidimensional capaz de calcular processos de fluxos não estacionários e transporte, considerando o efeito causado pela maré e por forçantes meteorológicas. As condições hidrodinâmicas calculadas pelo Df (velocidades, nível da água, densidade, salinidade, viscosidade vertical turbulenta e difusão vertical turbulenta) são simuladas e utilizadas como entradas para os outros módulos do Delft3D (DELFT3D, 2013)..

O módulo Dw dispõe do modelo de onda SWAN para simular onda costeira gerada pelo vento, assim como sua propagação e dissipação para uma dada topografia, um campo de vento, uma dada elevação do nível do mar e um campo de corrente (DELFT3D, 2013).

O sistema de equações utilizadas pelo modelo é constituído por equações do momento horizontal e equação da continuidade. A equação do momento vertical é reduzida para a equação da pressão hidrostática, pois se considera que a aceleração vertical é muito menor que a aceleração gravitacional. Esta característica torna o Df adequado para simular o fluxo em águas rasas, onde o comprimento e

duração das escalas horizontais são significativamente maiores que em escalas verticais, como áreas costeiras, estuários, lagos e rios (LESSER, 2004).

Dentro do sistema de equações, algumas considerações foram tomadas como a aproximação de Boussinesq, utilizada na equação do momento horizontal, e o estresse horizontal de Reynolds, determinado utilizando o conceito de viscosidade turbulenta (RODI, 1984).

No Df, a viscosidade e difusão horizontal são consideradas sobreposições de 3 processos: viscosidade molecular; turbulência 3D; turbulência 2D. A viscosidade molecular do fluido possui valor constante $O(10)^{-6}$. Nesta simulação, foi explorada somente a turbulência horizontal, onde seus valores foram considerados constantes (LESSER, 2004).

Nas simulações envolvendo ondas, as equações são escritas e resolvidas pela formulação *Generalized Lagrangian Mean* (Andrews and McIntyre, 1978; Groeneweg and Klopman, 1998; Groeneweg, 1999), onde as forças induzidas pelas ondas são mais precisamente expressas (LESSER, 2004).

3.2 Delft Dashboard

Delft Dashboard é uma interface gráfica com uso do software Matlab que está acoplada ao conjunto de módulos do modelo Delft3D. Através desta ferramenta, foram criados os arquivos de entrada utilizados na modelagem, como: grade, contornos, condições de contorno, batimetria, descargas, pontos secos, estruturas.

3.3 A grade

O modelo Delft3D possibilita trabalhar com dois tipos de grade, ortogonal e curvilínea, podendo ser composta por dois sistemas de coordenadas: cartesianas (em metros) e esféricas (em décimos de graus). As variáveis estão dispostas no padrão C de Arakawa, onde os pontos de nível d'água (pontos de pressão) são definidos no centro da célula e os componentes de velocidade estão dispostos perpendicularmente às faces do quadrante (LESSER, 2004).

3.4 Implementação do modelo

A grade utilizada neste trabalho foi de conformação ortogonal, com resolução de aproximadamente 200 m, composta por coordenadas esféricas, possuindo três bordas abertas (Norte, Leste e Oeste) e uma fechada (Sul) na costa (FIGURA 2). A área de interesse é a região metropolitana de Fortaleza, porém a grade se estendeu até o município de Pecém para evitar possíveis erros com a proximidade dos contornos na região de interesse. A tabela 1 mostra as principais características da grade.

Vento, onda e maré são os forçantes explorados nas simulações. Os cenários hidrodinâmicos e meteorológicos foram preparadas no módulo barotrópico 2D do modelo Df, já os cenários de ondas foram realizados no Dw. Ambos executados de forma acoplada, de tal maneira que os resultados obtidos levassem em consideração a ação dos três forçantes de interesse.

A batimetria da região foi obtida com o banco de dados GEBCO 08, fornecido pela *British Oceanographic Data Centre* (BODC), que possui resolução 0,5'. As estruturas de engenharia oceânica (molhes) foram adicionadas manualmente na região, obedecendo às suas posições reais, com auxílio da interface gráfica *Dashboard*.

O descarte do traçador foi realizado 15 dias após o início da simulação, tendo descarga ininterrupta de 500m³/s durante 02 dias e concentração de 100 Kg/m³. A descarga ocorreu próxima ao Porto do Mucuripe, uma região importante devido ao seu interesse socioeconômico e ambiental e com alto potencial de impactos, como derrames de óleo, tal como ocorrido no naufrágio do navio *Seawind* em junho de 2012.

Tabela 1 - Características da grade utilizada na modelagem

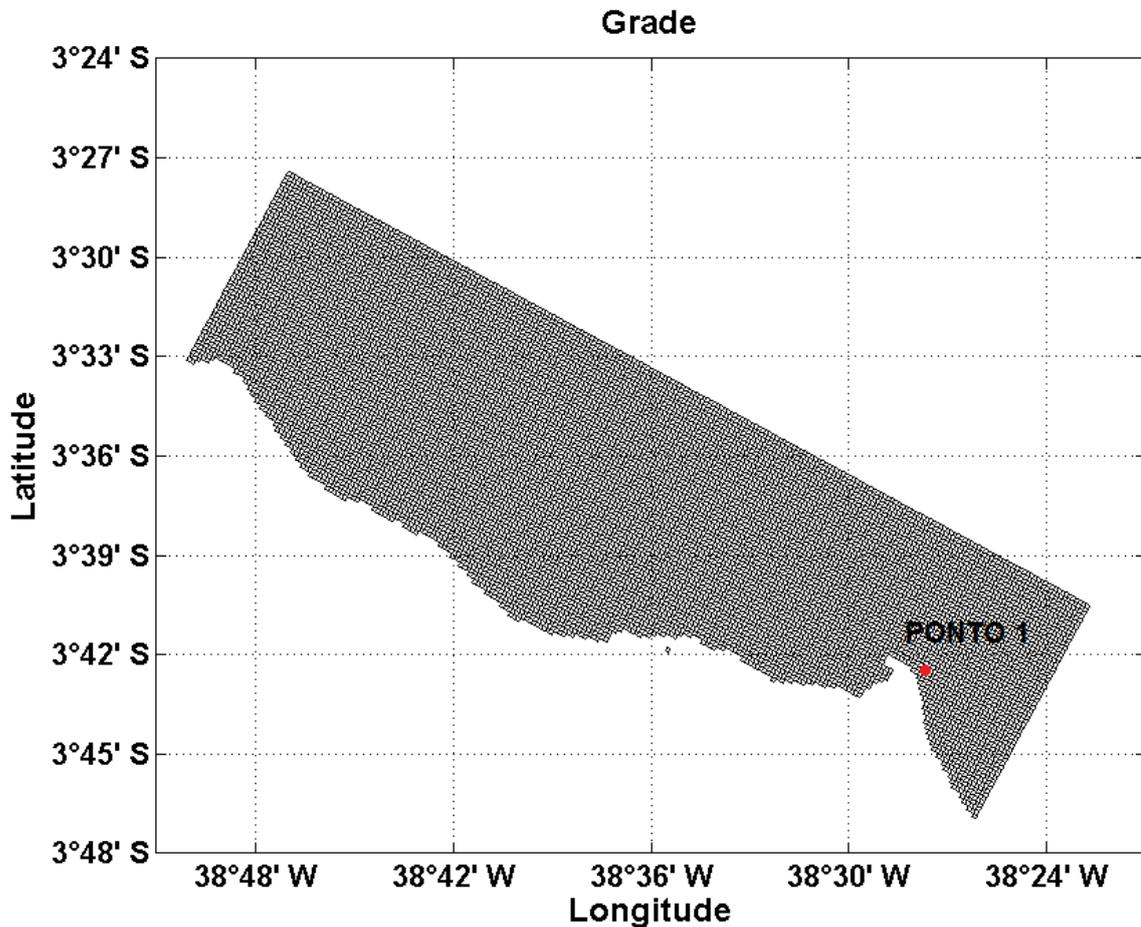
Propriedades da grade	Valor
Latitude Mínima	02,27°S
Latitude Máxima	03,90° S
Longitude Mínima	038,18° O
Longitude Máxima	040,90° O
Pontos no eixo X	1356
Pontos no eixo y	350
Curvatura	28,40°
Profundidade mínima	0
Profundidade máxima	?

Fonte: o autor.

A simulação foi realizada durante quatro meses, sendo dois no primeiro semestre e dois no segundo semestre, onde se partiu do repouso (condições iniciais nulas). Para o primeiro semestre (verão), foram executadas 03 simulações, sendo a primeira com a ação isolada da maré (MARÉ), a segunda com a ação da maré e do vento (VENTO) e a terceira com a ação dos três forçantes (ONDA).

Para o segundo semestre (inverno), não foi executada a condição (MARÉ), visto que os resultados seriam muito próximos do verão, sendo realizada a execução das outras duas condições (VENTOS E ONDAS). Este procedimento foi tomado para se hierarquizar a ação dos forçantes de interesse na dispersão do traçador.

Figura 2 - Grade utilizada na modelagem e ponto (PONTO 1) de extração dos dados para validação dos resultados do modelo.



Fonte: o autor.

Para o verão foram considerados ventos de leste com velocidade de 5 m/s e ondas com altura de 1.0 m, período de 15 segundos e direção norte. Para o inverno foram considerados ventos de sudeste com velocidade de 7 m/s e ondas com 1.0 m de altura, período de 7.5 segundos e direção leste.

3.5 Condição de contorno

3.5.1 Contorno lateral

Ao longo do contorno fechado, os componentes de velocidade perpendiculares ao contorno são definidos como zero (condição *free-slip*) e os componentes de velocidades paralelas ao contorno recebem o tratamento de “*half-slip*” (LESSER, 2004). Esta última condição resulta em velocidades tangenciais nulas a uma distância de meio elemento de contorno (OYE, 1996). As condições de

contorno de transportes considera que os fluxos de difusão verticais entre a superfície livre e o fundo são ajustados para zero (LESSER, 2004).

Para contornos abertos é necessário especificar uma condição de fronteira, como o nível de água. Neste trabalho foi determinado como condição de contorno o nível de água igual a 0, devido às condições de maré determinadas pelo modelo global de maré TPXO 7.2.

3.5.2 Contorno de fundo

A resistência de fundo foi representada pelo parâmetro de Manning, pesquisador francês que formulou o coeficiente de rugosidade considerando o tamanho das partículas que compõem o leito do corpo d'água, a distribuição dessas no espaço e a inclinação da superfície d'água (KRAJEWSKI, 2006). O valor utilizado no modelo foi de $0.2 \text{ s/m}^{1/3}$, valor este comumente utilizado. (DELFT3D, 2013)

3.6 Validação do modelo

O modelo foi validado através da comparação entre os dados de elevação da maré encontrados nas simulações e dados de nível do mar *in situ* provenientes da estação maregráfica do Porto do Mucuripe, fornecido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foram comparados os harmônicos (amplitude) dos principais componentes de maré da região.

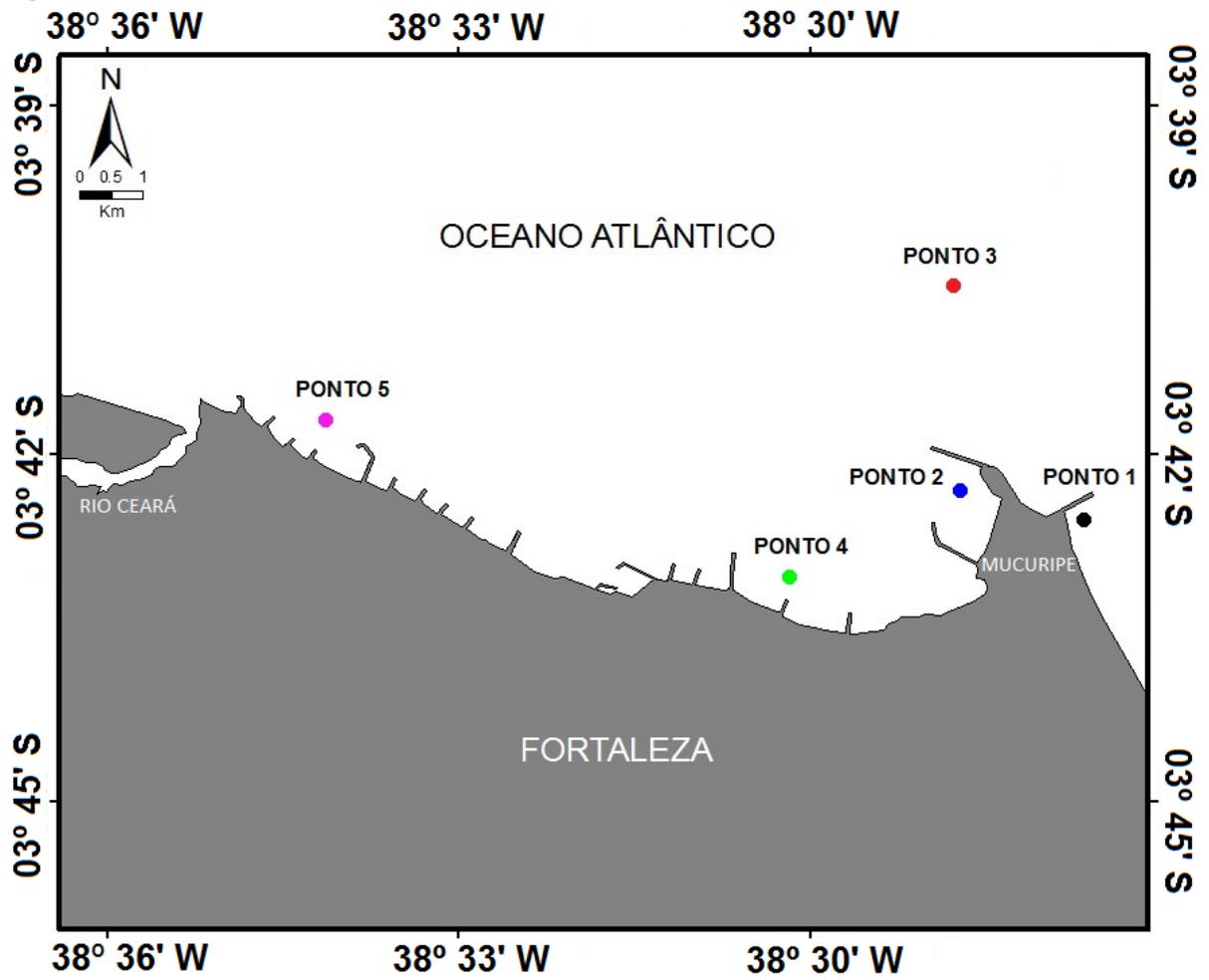
3.7. Tratamento dos dados

Para cada cenário e para cada situação de forçantes, foram realizados os cálculos do fluxo residual, extraindo-se a componente de maré dos dados de elevação e velocidade através da análise harmônica.

3.7.1 Pontos de análise temporal dos dados

Para análise temporal dos dados de velocidade, foram determinados 5 pontos dentro da área de estudo, com o intuito de se analisar o campo de velocidade em um local sobre a influência de obras costeiras e um local livre desta (FIGURA 3).

Figura 3 - Pontos de análise dos dados de velocidade.



Fonte: o autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação

A tabela 2 mostra a comparação entre os harmônicos encontrados com base nos resultados das simulações e os dados de nível do mar provenientes da estação maregráfica do Porto de Mucuripe, fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados da estação do IBGE são do ano de 1955, pois foram diagnosticados problemas em dados recentes.

Através do cálculo de erro percentual, foi analisada a margem de erro obtido entre os dados gerados e os dados *in situ*, visando verificar a confiabilidade das simulações.

Tabela 2 - Comparação entre as amplitudes (cm) dos harmônicos fornecidos pelo IBGE (Amp. obs.) e modelados (Amp. mod.) para a estação do Mucuripe.

Harmônicos	Amp. obs. (cm)	Amp. mod (cm)	Δ Amp	Erro amp. (%)
M2	94.30	99.18	4.88	4,92
S2	31.25	33.42	2.17	6,49
O1	6.78	6.87	0.09	1,31
K1	7.42	7.49	0.07	0,93

Fonte: o autor.

O cálculo foi realizado para todos os harmônicos, sendo encontrados valores inferiores a 7% de erro. Desta forma, conclui-se que as simulações reproduziram de forma adequada as elevações de nível do mar produzidas pelas marés astronômicas na região.

Vale ressaltar que o trabalho se trata se uma idealização, visto que não tivemos acesso a dados observacionais de velocidade das correntes ao longo da coluna d'água e de ondas, o que não possibilitou a validação dos cenários forçados por ventos e ondas.

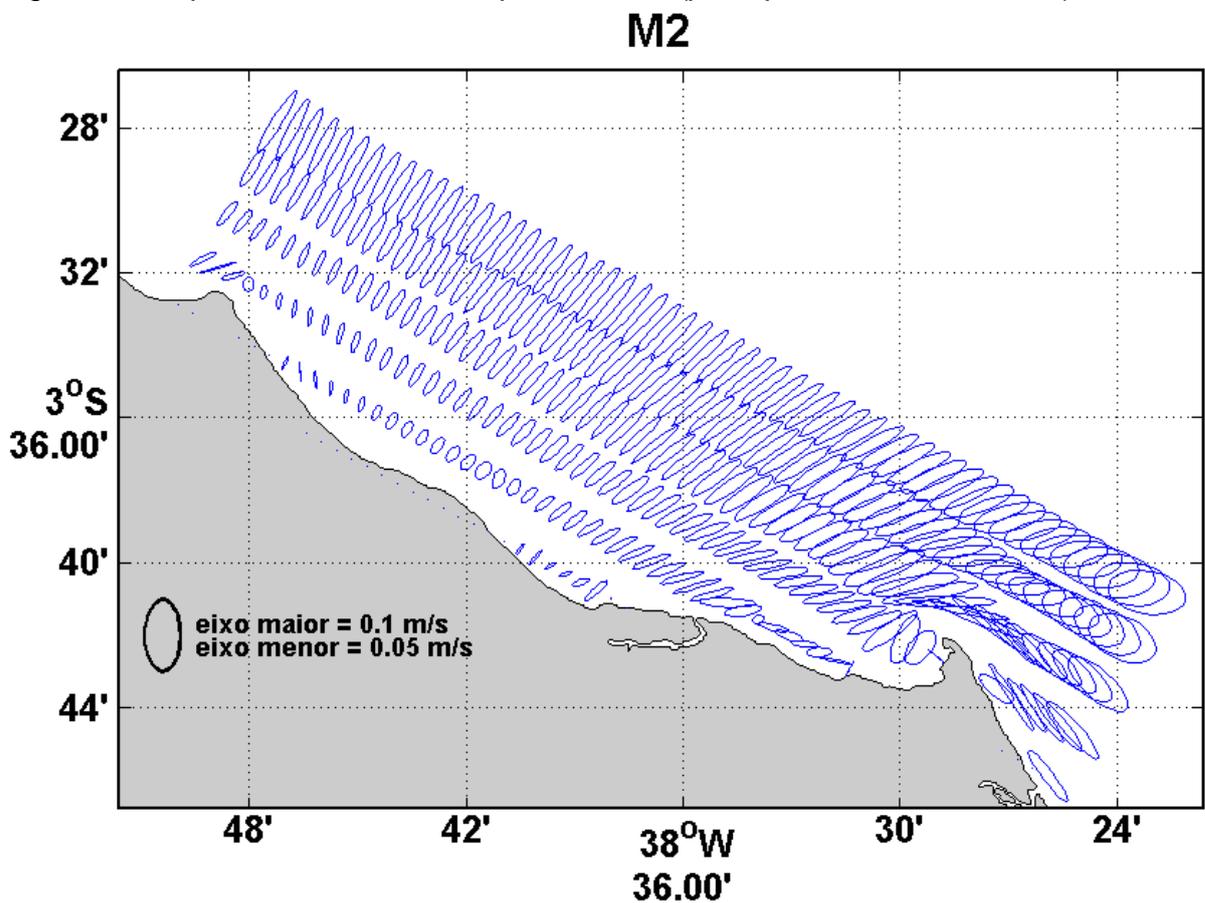
4.2 Elipses de maré

Ao avaliar as elipses de maré (FIGURAS 4 a 8) referente a cada uma das componentes harmônicas é possível caracterizar as representantes semidiurnas M2

(FIGURA 4), S2 (FIGURA 5) e N2 (FIGURA 6) como as componentes mais energéticas, assim como encontrado por Dias (2011) e Maia (1998). Dentre elas, as componentes M2 (*principal lunar semidiurnal*) e S2 (*principal solar semi-diurnal*) representam a maior parte da amplitude das correntes de maré da região.

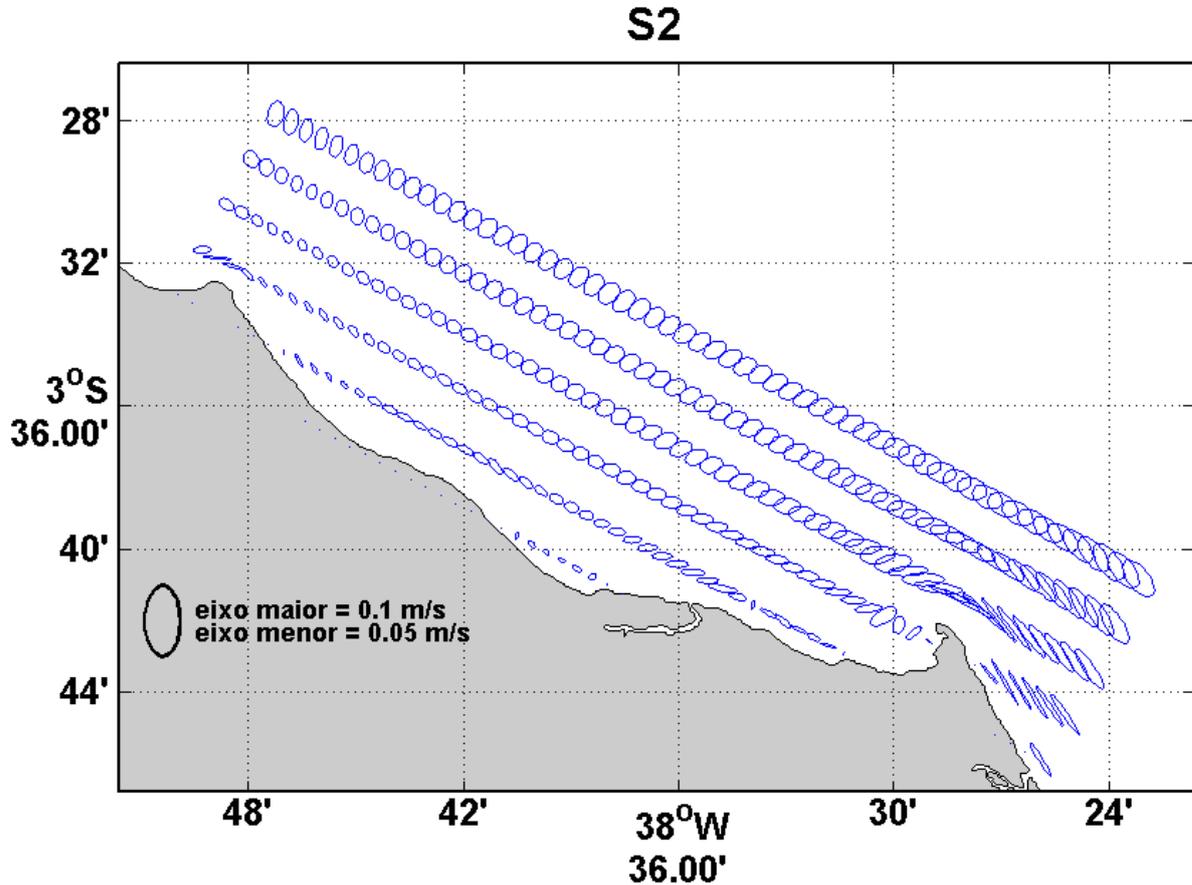
As demais componentes possuem menor contribuição para a circulação de maré, onde a N2 (*larger elliptical lunar semidiurnal*) é seguida pela componentes diurnas K1 (FIGURA 7) e O1 (FIGURA 8), em ordem decrescente de importância.

Figura 4 – Elipses de maré da componente M2 (*principal lunar semidiurnal*).



Fonte: o autor.

Figura 5 – Elipses de maré da componente S2 (*principal solar semi-diurnal*).

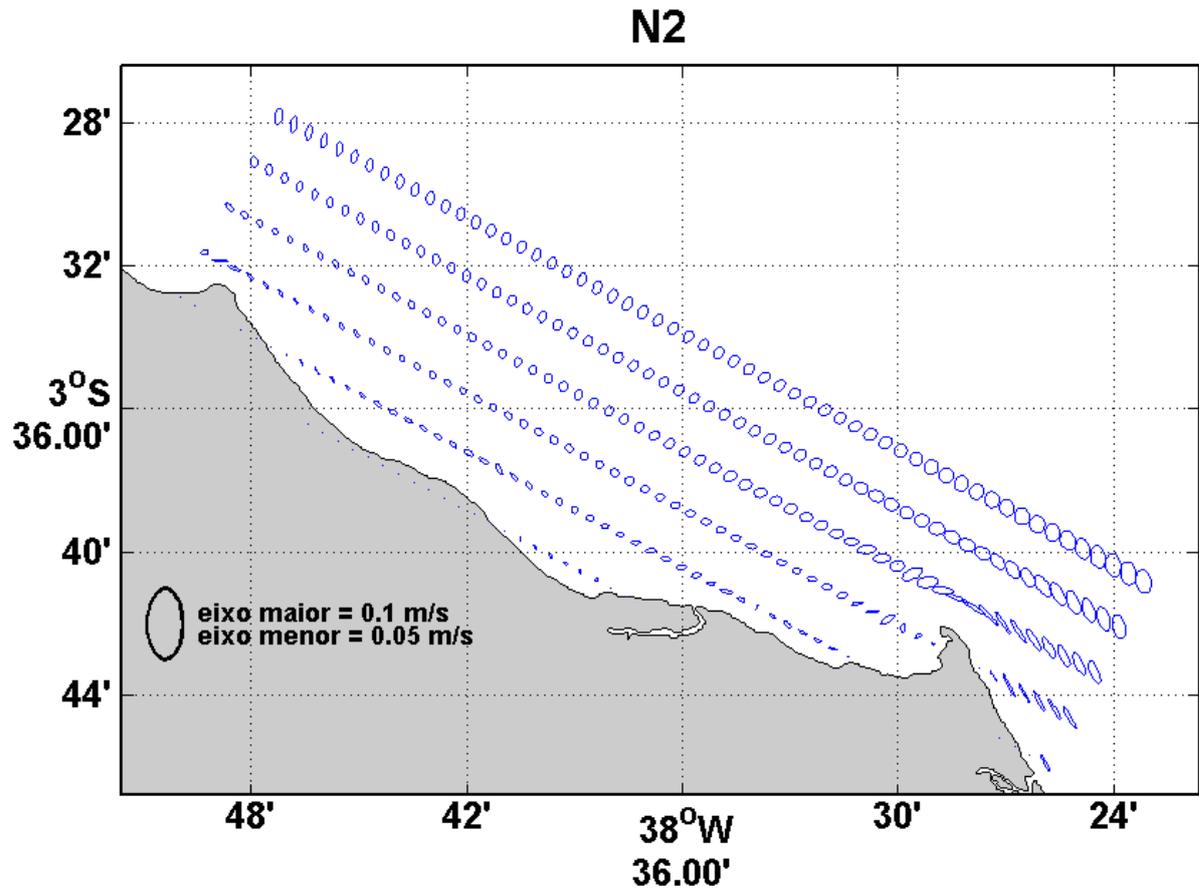


Fonte: o autor.

Analisando a inclinação das elipses da componente M2, fica clara a sua maior intensidade no sentido perpendicular à costa e uma pequena componente paralela à costa. Na S2, há um maior equilíbrio entre a componente paralela e a perpendicular à costa, porém ainda apresentando a inclinação semelhante a M2.

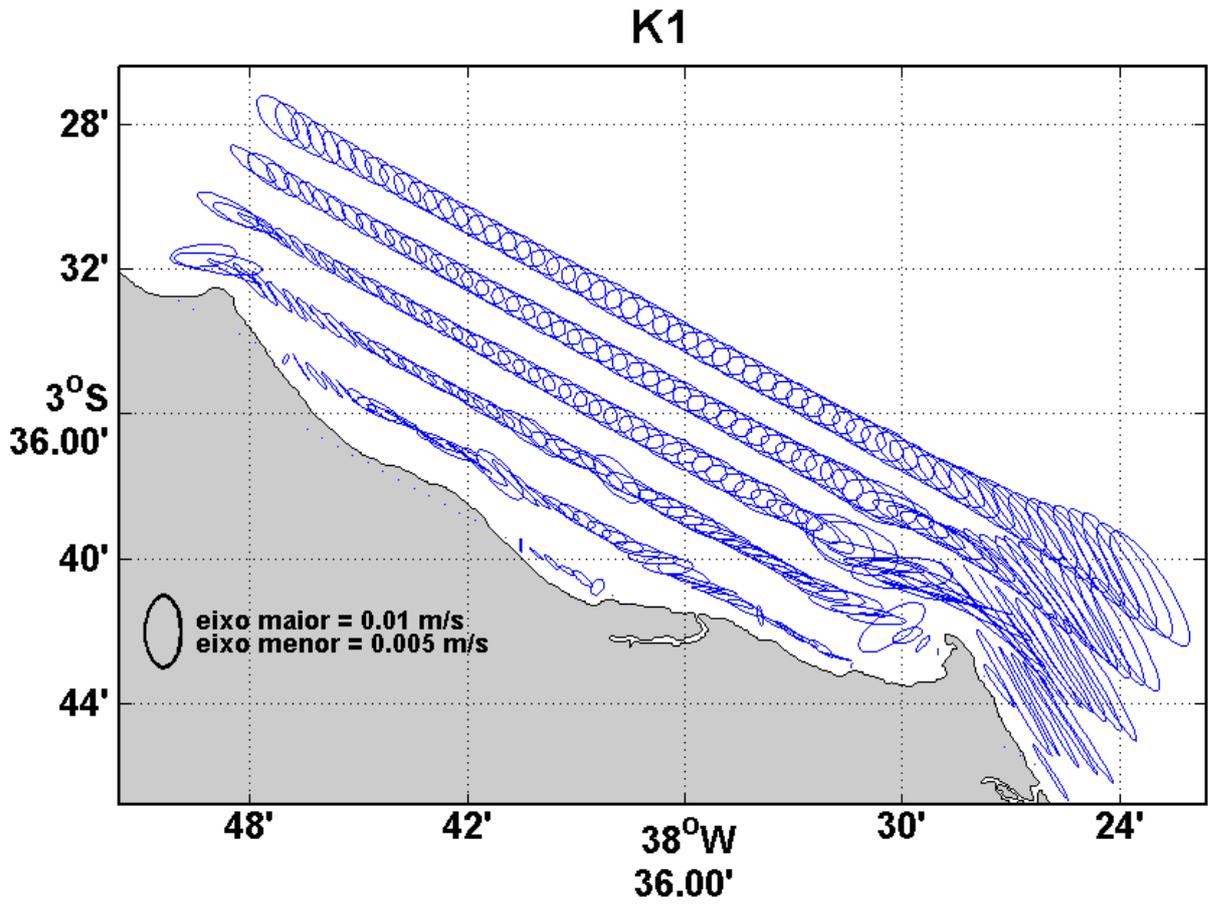
Vale ressaltar que para a confecção das imagens das componentes diurnas houve uma mudança na escala utilizada em virtude da grande diferença dos seus valores em relação às semi-diurnas.

Em todas as imagens é possível observar a influência da morfologia da costa, em especial da ponta do Mucuripe, na circulação de maré na região.

Figura 6 – Elipses de maré da componente N2 (*larger elliptical lunar semidiurnal*).

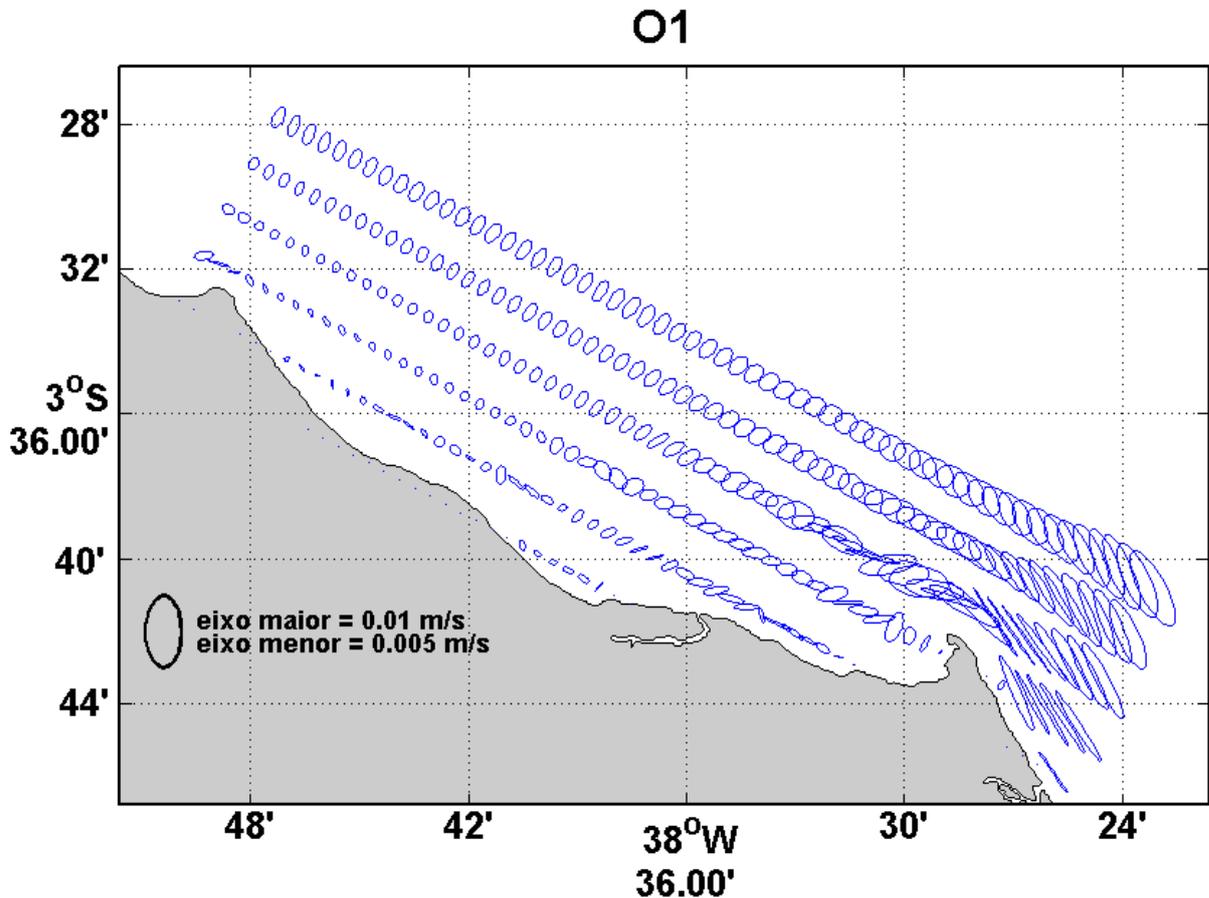
Fonte: O autor.

Figura 7 – Elipses de maré da componente K1.



Fonte: o autor.

Figura 8 – Elipses de maré da componente O1.



Fonte: o autor.

4.3 Campo de velocidade

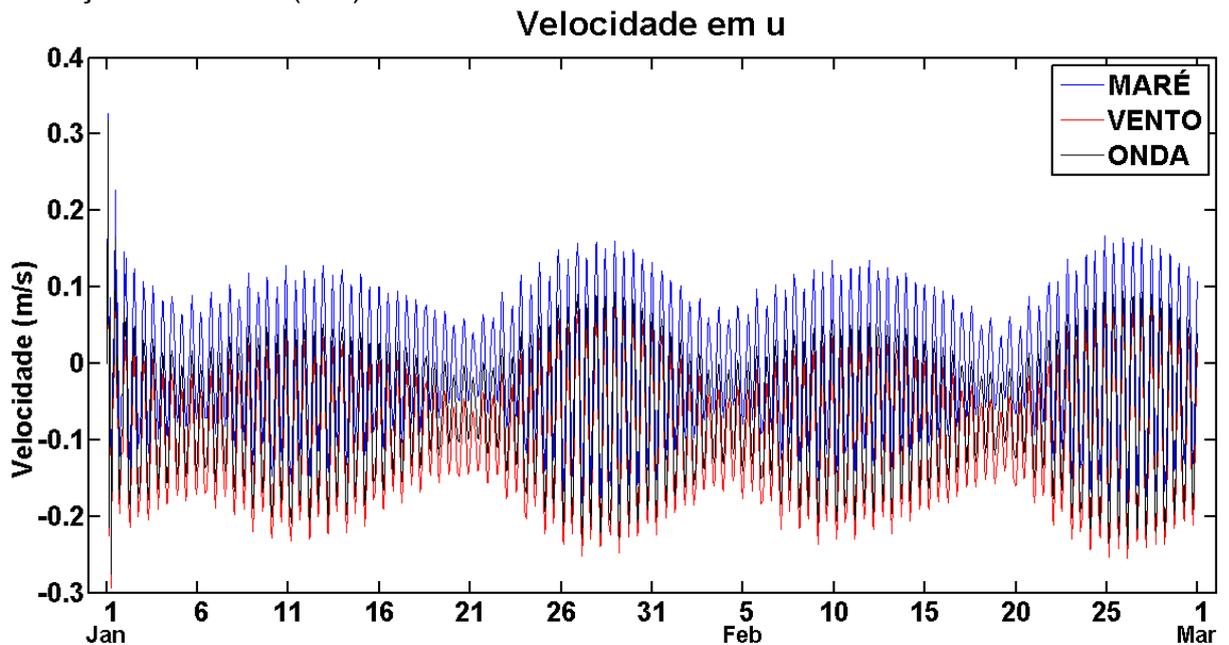
Visando entender a dinâmica da circulação da região sem a interferência de obras antrópicas, escolheu-se o ponto 3 (FIGURA 3) para realizar a análise do campo de velocidade. No verão, os menores valores foram encontrados na simulação forçada só por maré (MARÉ), quando comparados com às simulações que também incluem ventos e ondas, porém se percebe que a componente de maré é mais significativa para a variabilidade do campo de velocidade total.

Ao se acrescentar o vento nas simulações, houve um acréscimo de 40% na velocidade para a componente u na direção oeste e de 43% para a componente v na direção norte.

Com a adição das ondas, observou-se um trabalho contrário ao realizado pelo vento, porém com menor influência. No final, os valores de velocidade para a componente u e v apresentaram acréscimo de 26% (oeste) e 28.5% (norte),

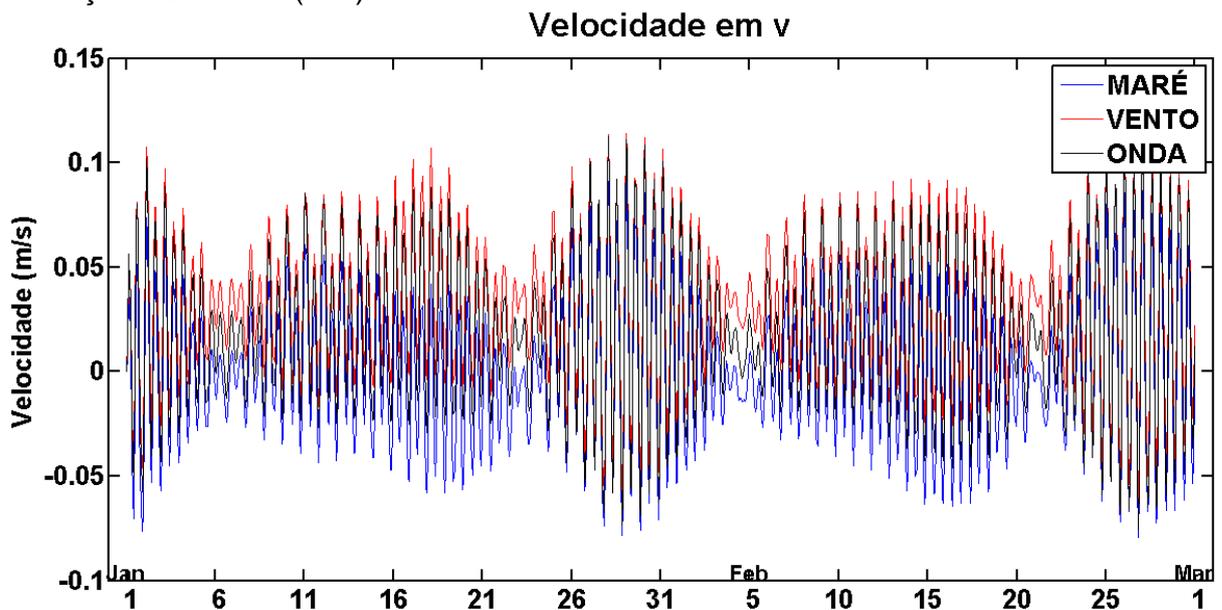
respectivamente, comparados aos encontrados na condição MARÉ. Isto mostra a influência para leste na componente u e para sul na componente v realizado pela ação das ondas.

Figura 9 - Componente u de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de verão (m/s).



Fonte: o autor.

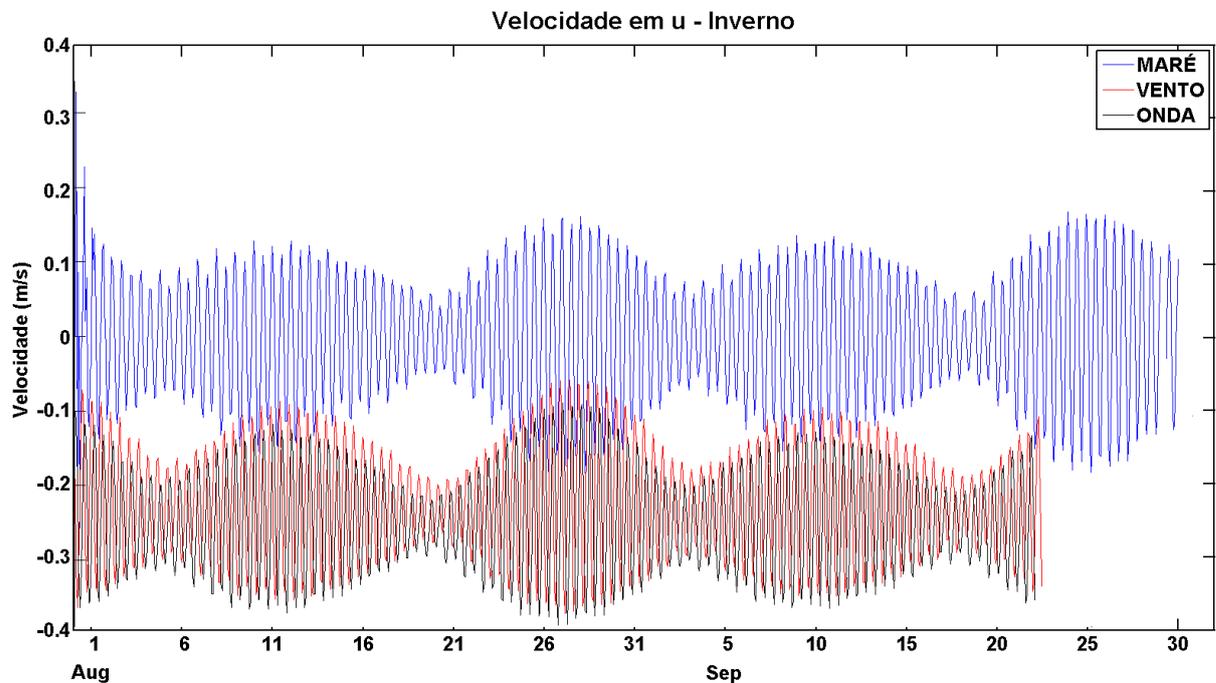
Figura 10 - Componente v de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de verão (m/s).



Fonte: o autor.

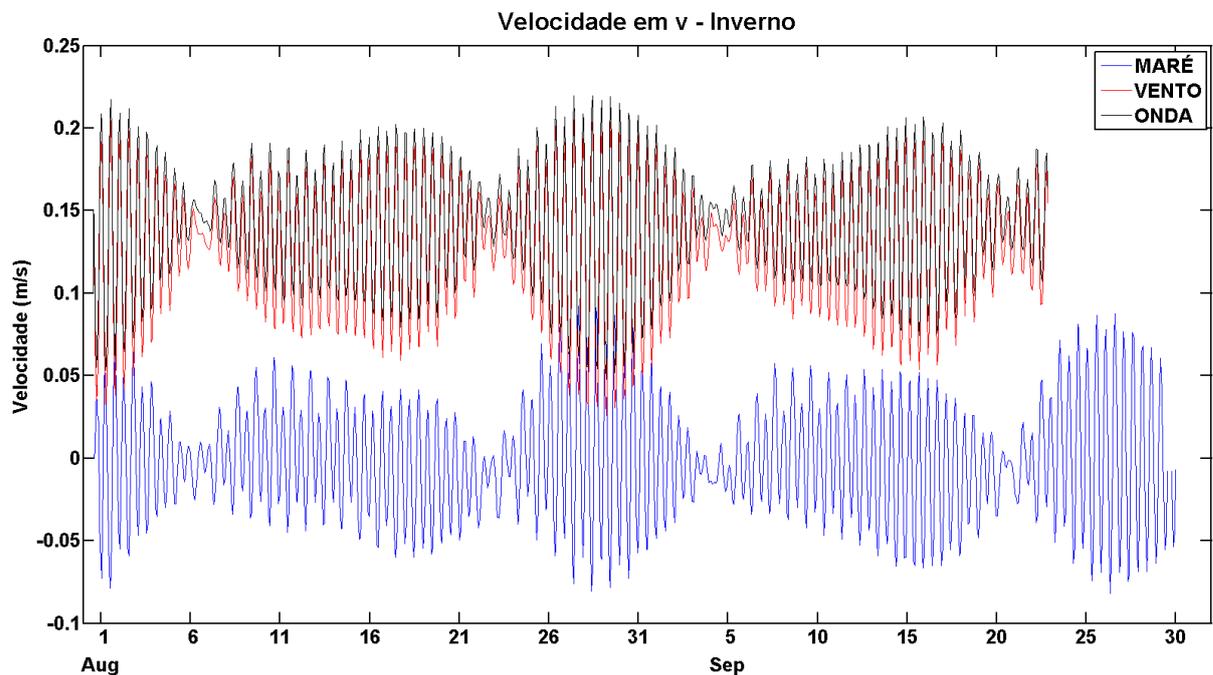
No inverno, devido à presença de ventos mais intensos, foi observada uma maior mudança no campo de velocidade com a adição deste forçante nas simulações. Ao se adicionar o vento, houve acréscimo de 75% na componente u (oeste) (FIGURA 11) e 111% na componente v (norte) (FIGURA 12). Ao contrário do verão, as ondas favoreceram o transporte causado pelo vento, sendo encontrado no final um aumento de 100% na componente u para oeste (FIGURA 11) e de 133% na componente v para norte (FIGURA 12).

Figura 11 - Componente u de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de inverno (m/s).



Fonte: o autor.

Figura 12 - Componente v de velocidade, no ponto 3, nas três simulações para as condições de inverno (m/s).

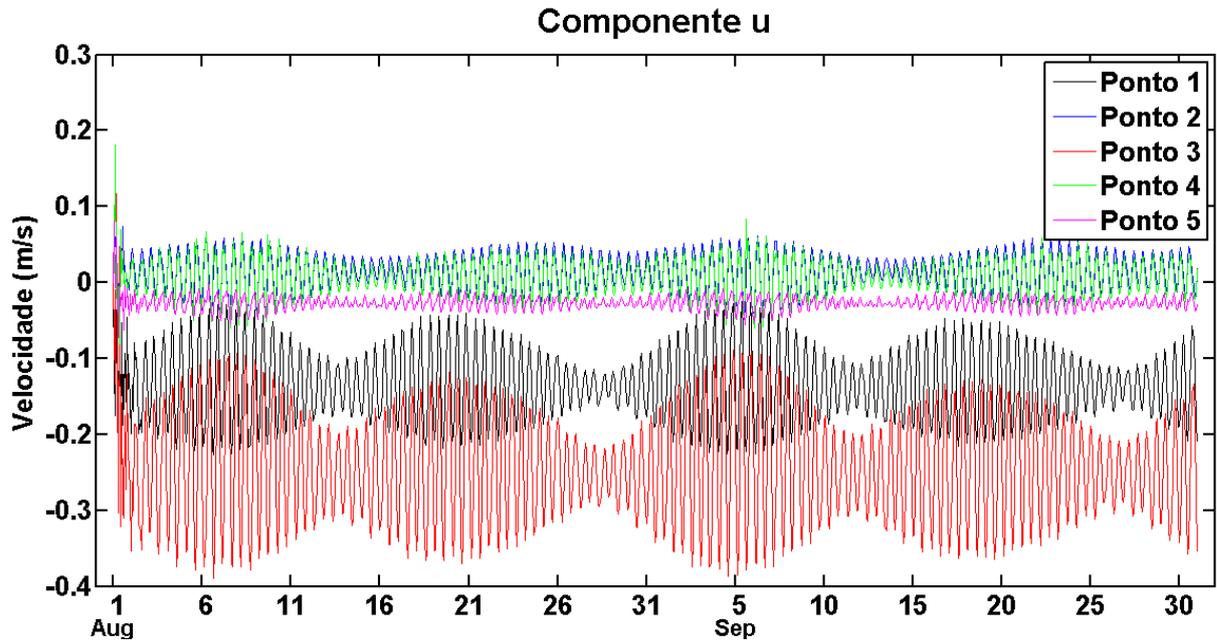


Fonte: o autor.

A fim de se determinar a interferência de obras costeiras e da conformação da linha de costa no campo de velocidade local, foram analisados os outros 05 pontos (FIGURA 3) da região (FIGURAS 13 e 14). Esta comparação também nos mostra a variabilidade espacial do campo de correntes. As condições de inverno foram escolhidas para esta análise, visto que tal interferência fica mais nítida devido aos maiores valores no campo de velocidade.

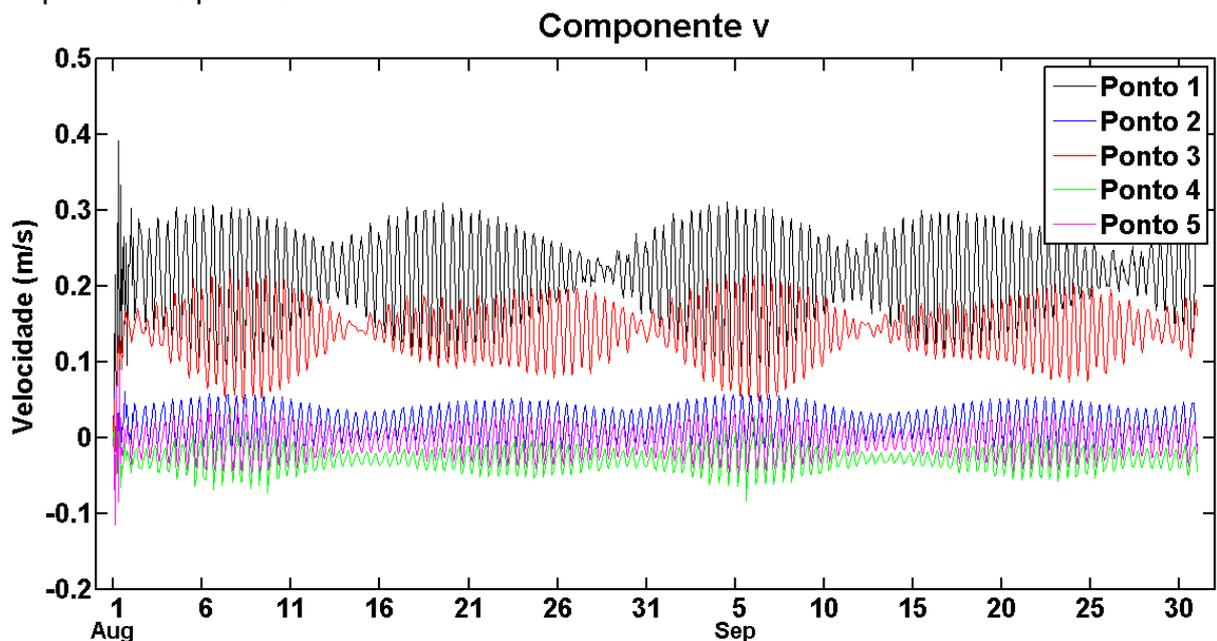
Os valores encontrados nos pontos 1 e 3, dispostos em área desabrigadas, se destacaram em todas as análises pelas velocidades elevadas, indicando que há esta interferência, porém não deixando claro qual dos dois fatores citados (obras ou morfologia) é o responsável por isto. Os pontos 2 e 4 mostraram claramente a interferência das obras costeiras ao apresentarem velocidades médias positivas, contrárias à direção do vento.

Figura 13 - Dados de velocidade na componente u em diferentes pontos para a simulação ONDA durante condições de inverno (m/s). Ver figura 3 para a disposição espacial dos pontos.



Fonte: o autor

Figura 14 - Dados de velocidade na componente v em diferentes pontos para a simulação ONDA durante condições de inverno (m/s). Ver figura 3 para a disposição espacial dos pontos.



Fonte: o autor.

Os valores de velocidade e direção obtidos por esta simulação foram próximos dos valores encontrados pelos projetos EQUALANT I e GATE (METCALF;

STALCUP, 1967; LEUDMANN; PEREIRA, 1976; COCHRANE, 1983) que determinaram a presença de uma corrente fluindo para NW, com velocidades que variaram entre 0,23 e 0,35 m/s, na plataforma continental do nordeste do Brasil.

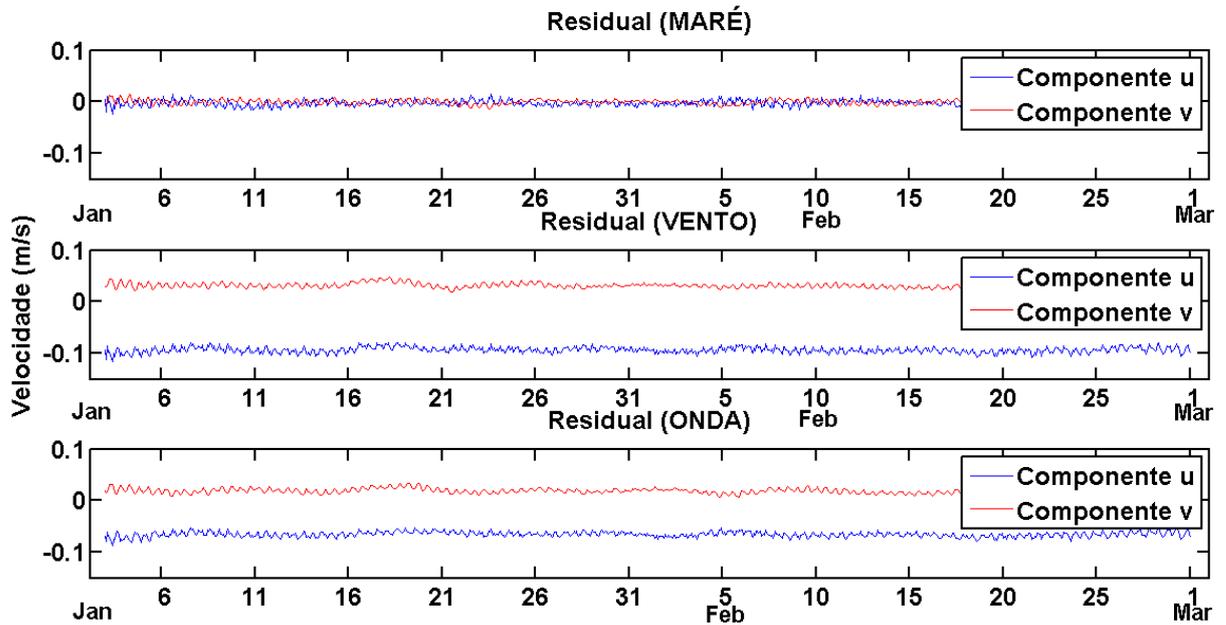
Valores próximos de velocidade também foram encontrados por Maia (2009), quando realizou experimentos com flutuadores na região próxima ao Porto do Mucuripe. Os valores de velocidade encontrados variaram de 0,24 e 0,31 m/s na componente zonal, e de 0,23 e 0,58 m/s na componente meridional (MAIA, 2009).

Signorini e Miranda (1983) analisaram as correntes medidas em fundeio ao largo de Fortaleza na isóbata de 40 m e também encontraram valores próximos aos obtidos pela modelagem executada, com um pico entre 0,3 - 0,4 m/s, correspondendo ao período de maré de sizígia.

4.5 Fluxo Residual

Analisando os dados de fluxo residual de maré, observa-se que os valores variam muito próximo de zero tanto em na componente v quanto na componente u. No verão, ao se adicionar o vento no sistema, o residual passa a assumir valores próximos de 0.1 m/s na componente u para o sentido oeste e valores próximo de 0,05 m/s na componente v para sentido norte. Com a ação das ondas, o residual muda pouco em relação a situação VENTO, porém sendo possível observar a sua influência para sul no sentido meridional e leste no sentido zonal (fig. 15). Deve-se ressaltar que, devido ao efeito cíclico das marés, o campo residual, não o total, é responsável pelo transporte na região costeira de Fortaleza.

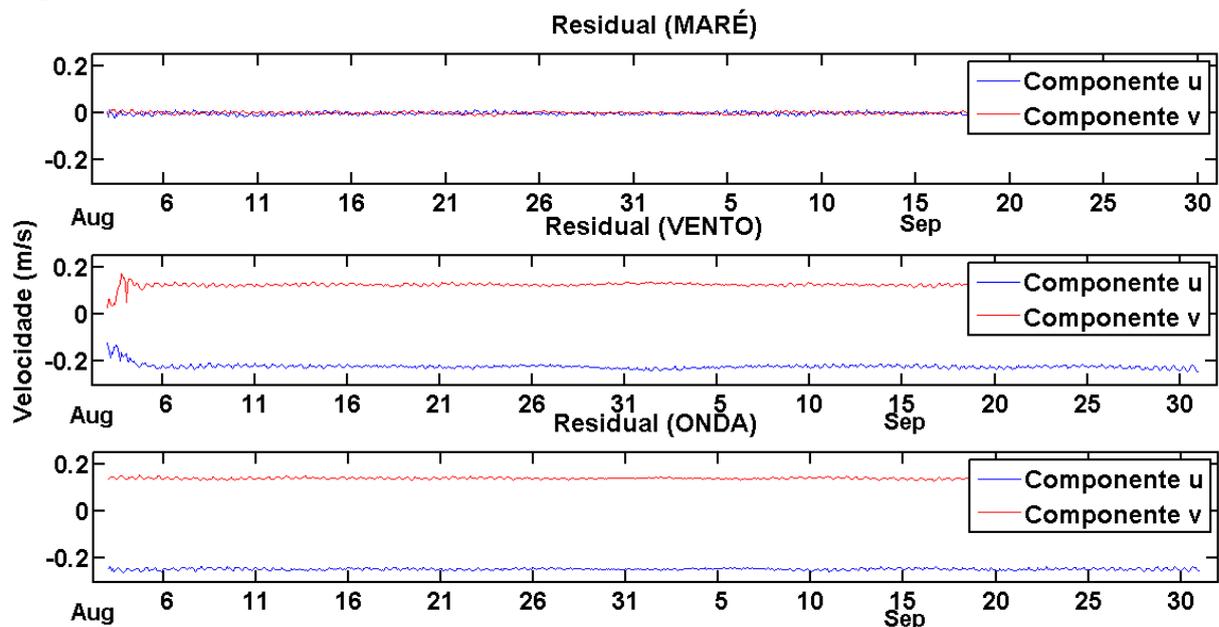
Figura 15 - Residual no verão para o ponto 3.



Fonte: o autor.

No inverno no hemisfério sul, com a intensificação do vento houve o acréscimo do fluxo residual, sendo encontrados valores próximos de 0,25 m/s na componente zonal pro sentido oeste e valores próximos de 0,15 m/s na componente meridional pro sentido norte (FIGURA 16).

Figura 16 - residual no inverno para o ponto 3.

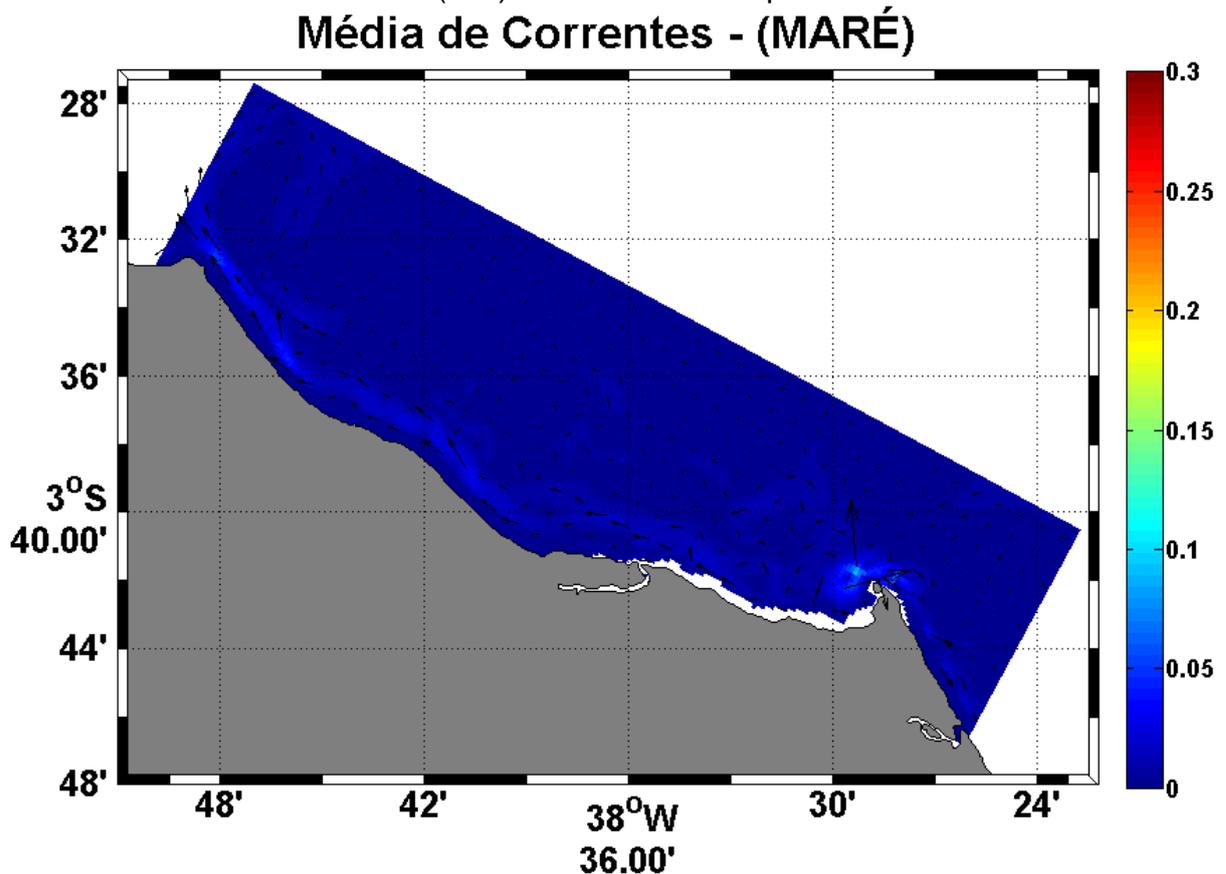


Fonte: o autor.

Nas figuras 17 a 21 são apresentados os valores médios do campo de corrente residual de todo o período de simulação para os diferentes cenários e épocas do ano.

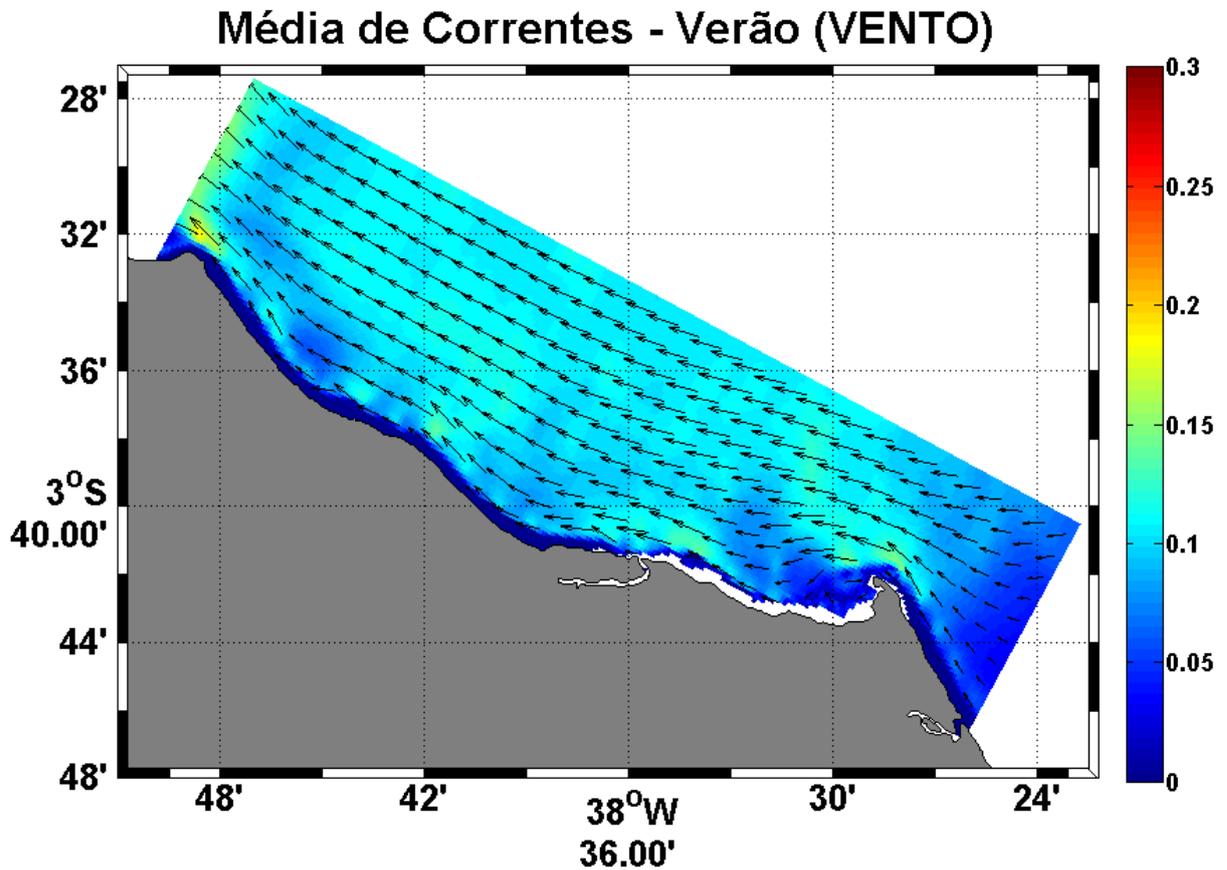
Nas simulações, como já visto na série temporal, o campo de velocidade na condição MARÉ se mostrou muito menor que as demais condições (FIGURA 17). Isto dá ênfase ao menor papel da circulação de maré no transporte significativo de materiais na região. Na região próxima à linha de costa é possível observar uma circulação residual paralela à costa e em sentido leste-oeste, porém nas regiões mais profundas não existe uma direção preferencial de circulação.

Figura 17 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição MARÉ durante os meses de verão. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.



Fonte: o autor.

Figura 18 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição VENTO durante os meses de verão. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente. Campo de velocidade média para a condição VENTO no verão.

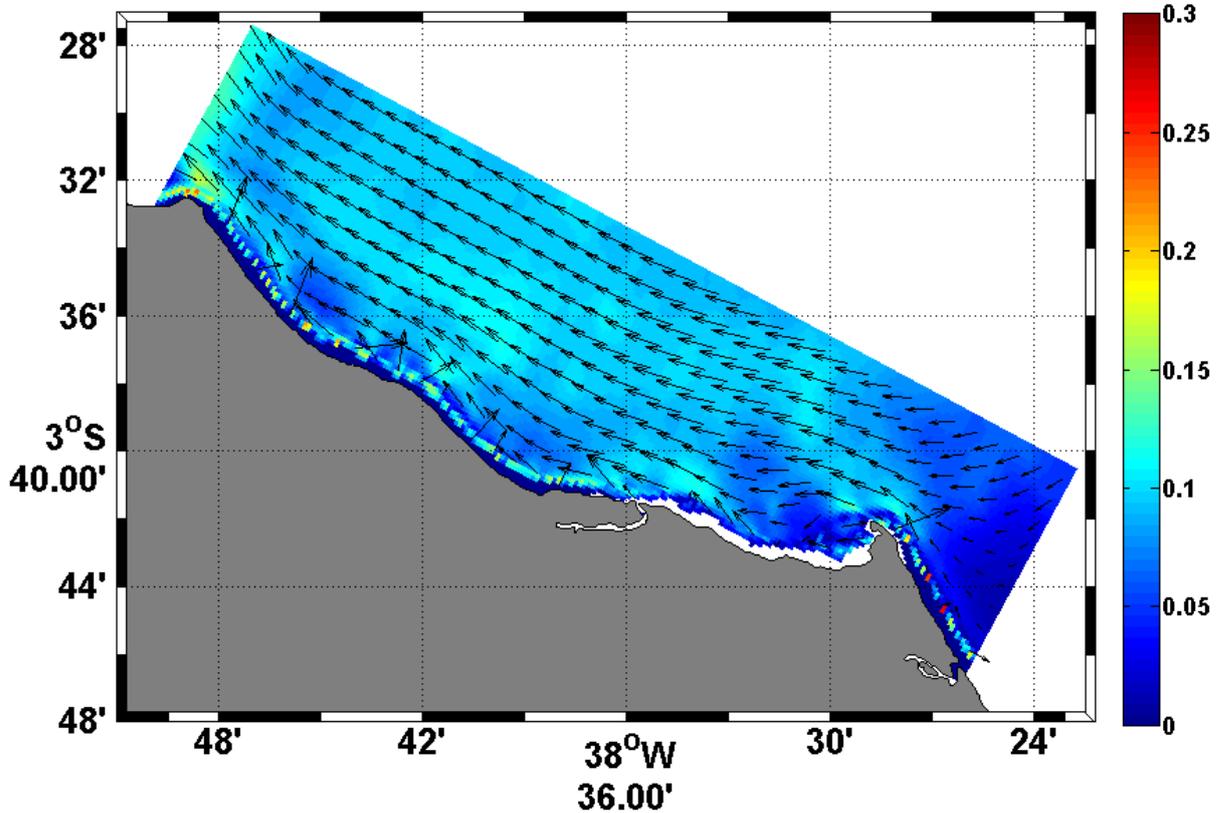


Fonte: o autor.

Comparando os resultados do campo de velocidade entre as condições VENTO (FIGURA 18) e ONDA (FIGURA 19), foi observado que não há grande influência das ondas no campo de velocidade na maior parte da região de estudo. Com isso, pode-se classificar o vento como forçante dominante na dinâmica da circulação costeira local.

Figura 19 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição ONDA durante os meses de verão. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.

Média de Correntes - Verão (ONDA)

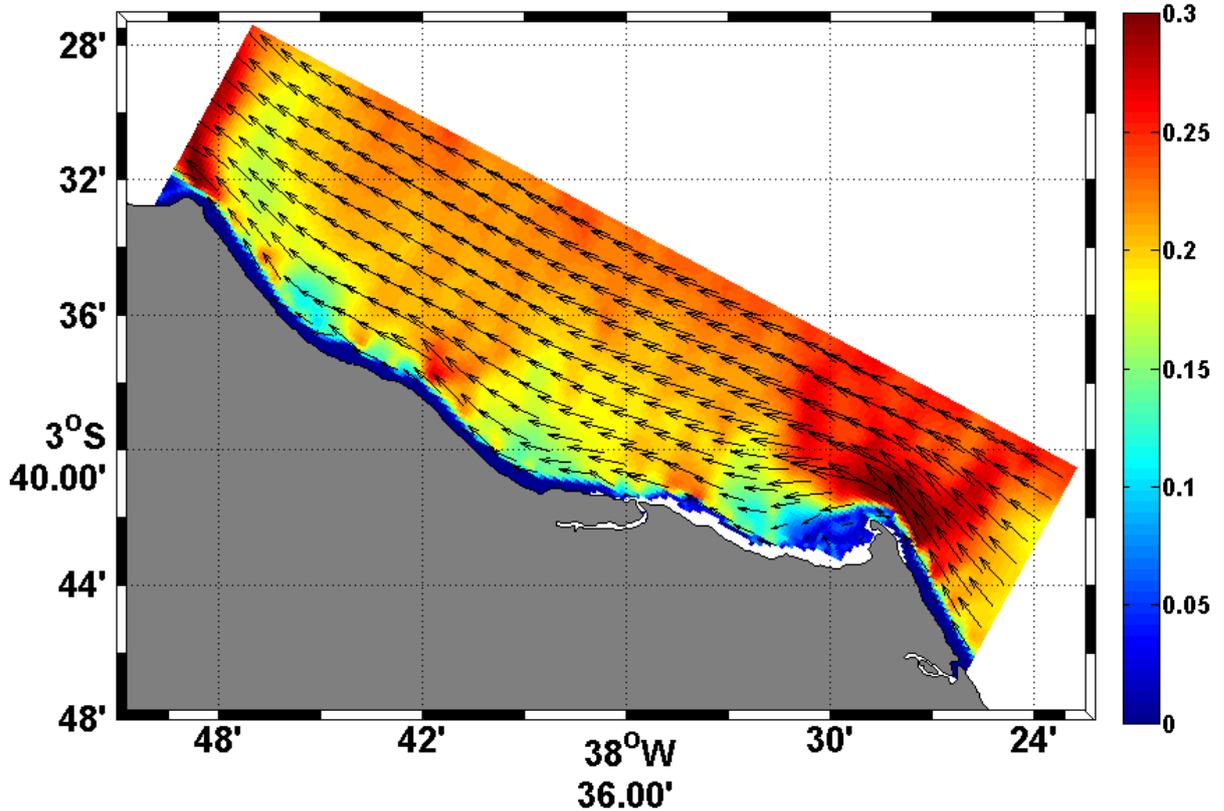


Fonte: o autor.

Como esperado, os valores encontrados no campo de velocidade durante o verão (FIGURA 19) foram muito menores comparados aos valores encontrados no inverno (FIGURA 20) em toda a região.

Figura 20 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição VENTO durante os meses de inverno. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.

Média de Correntes - Inverno (VENTO)

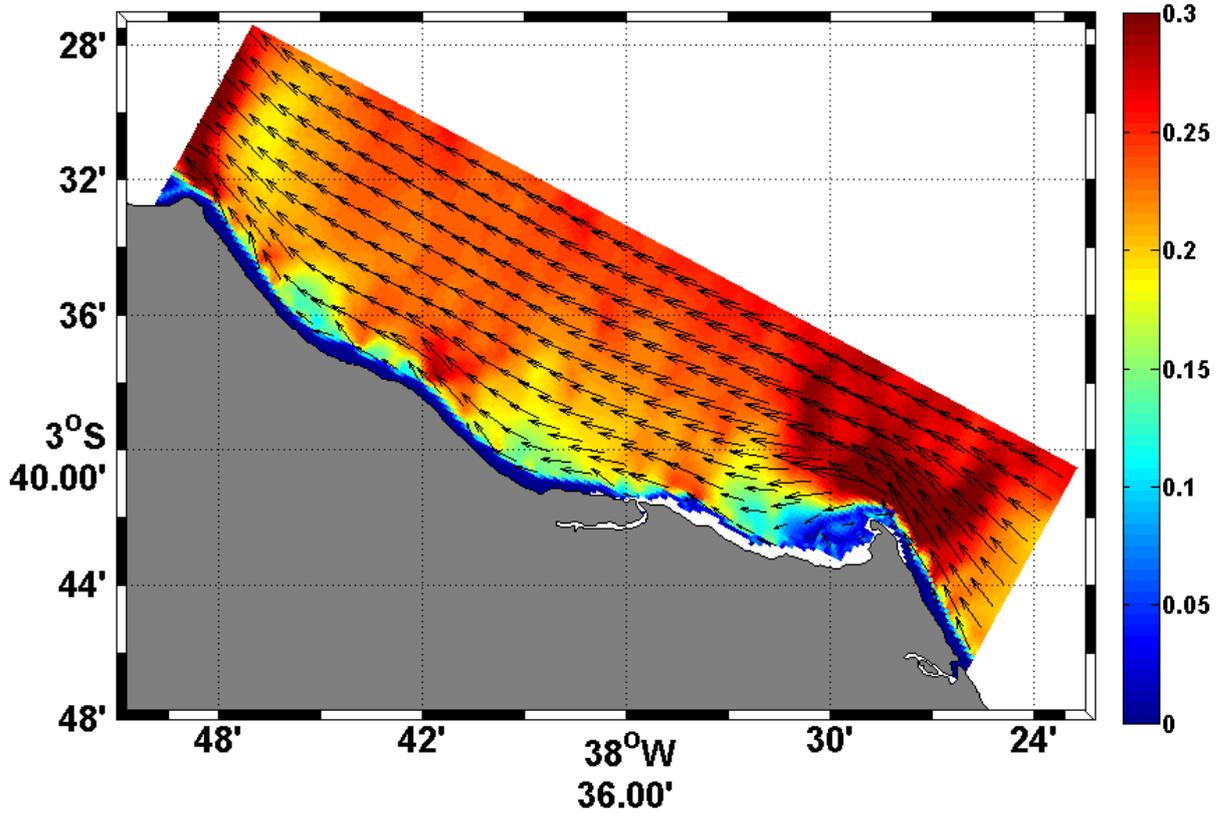


Fonte: o autor.

Comparando os resultados do inverno entre as condições VENTO (FIGURA 20) e ONDA (FIGURA 21), reforça-se a dominância do vento na dinâmica local, pois os resultados apresentaram valores semelhantes, mesmo tendo mudado o regime de ondas usado nas simulações de *swell* para *sea* e as direção de norte para leste.

Figura 21 - Campo médio de velocidade para todo o período de simulação para a condição ONDA durante os meses de inverno. As setas e as cores indicam a direção das correntes e a intensidade (m/s) das correntes respectivamente.

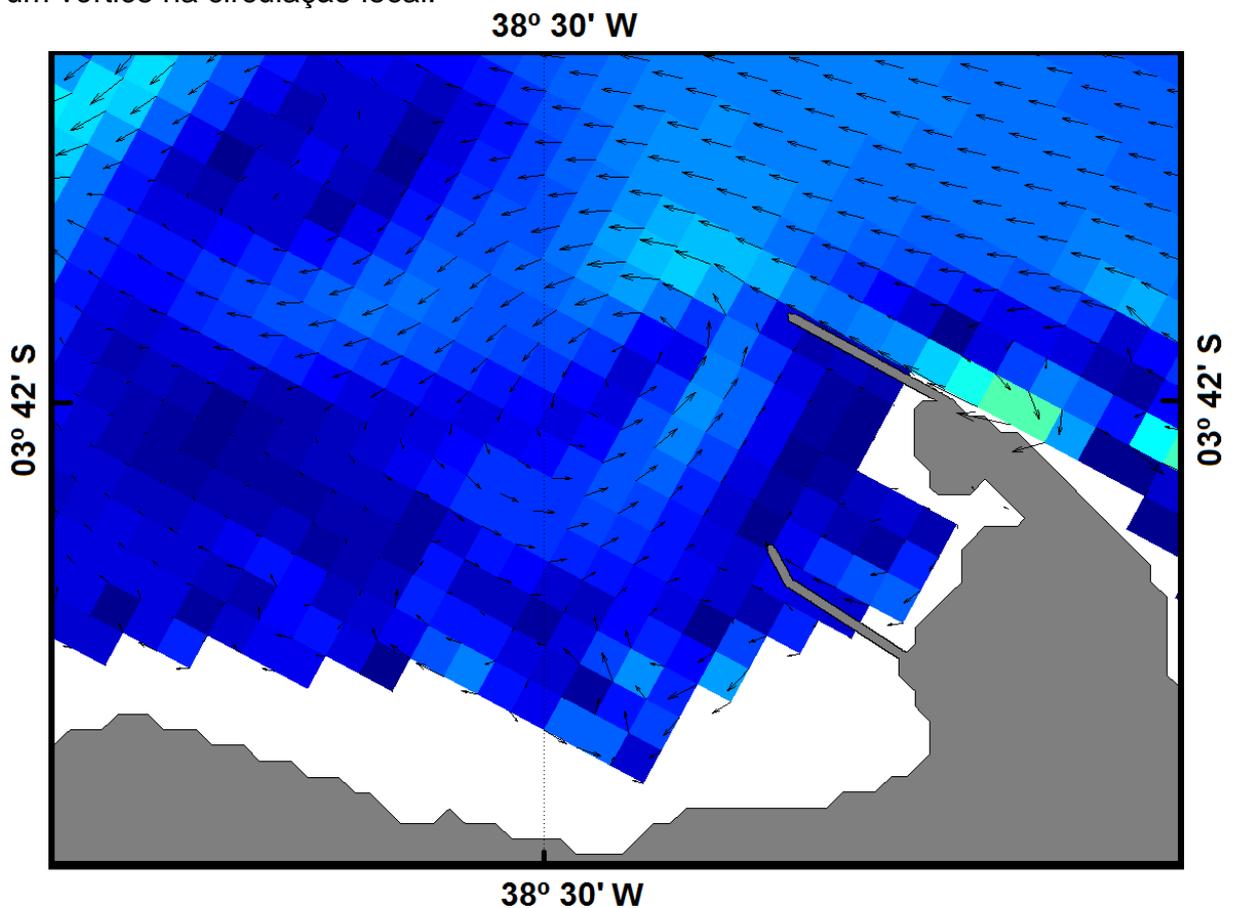
Média de Correntes - Inverno (ONDA)



Fonte: o autor.

Em todos os resultados, pode-se observar o efeito do molhe do porto do Mucuripe na circulação local, gerando um mínimo local nas intensidades das correntes. Assim como observado por Maia (1998), encontrou-se um vórtice próximo ao molhe do porto do Mucuripe, que, provavelmente, é causado pela difração oriunda da interferência do molhe nas correntes locais (FIGURA 22).

Figura 22 – Detalhe da região próxima ao porto do Mucuripe para a condição ONDA durante a simulação nas condições de verão, onde pode-se observar a formação de um vórtice na circulação local.



Fonte: o autor.

Em todas as simulações é observado ainda um mínimo de velocidade próximo à linha de costa que é gerado pela interferência das obras costeiras na circulação local. Estes resultados devem ser olhados com cuidado, pois os espigões são representados por poucas células da grade em função da resolução da grade do modelo. Além disso, o banco de batimetria utilizado no modelo pode não representar de forma correta a morfologia na zona muito próxima à linha de costa.

4.6 Dispersão do Traçador

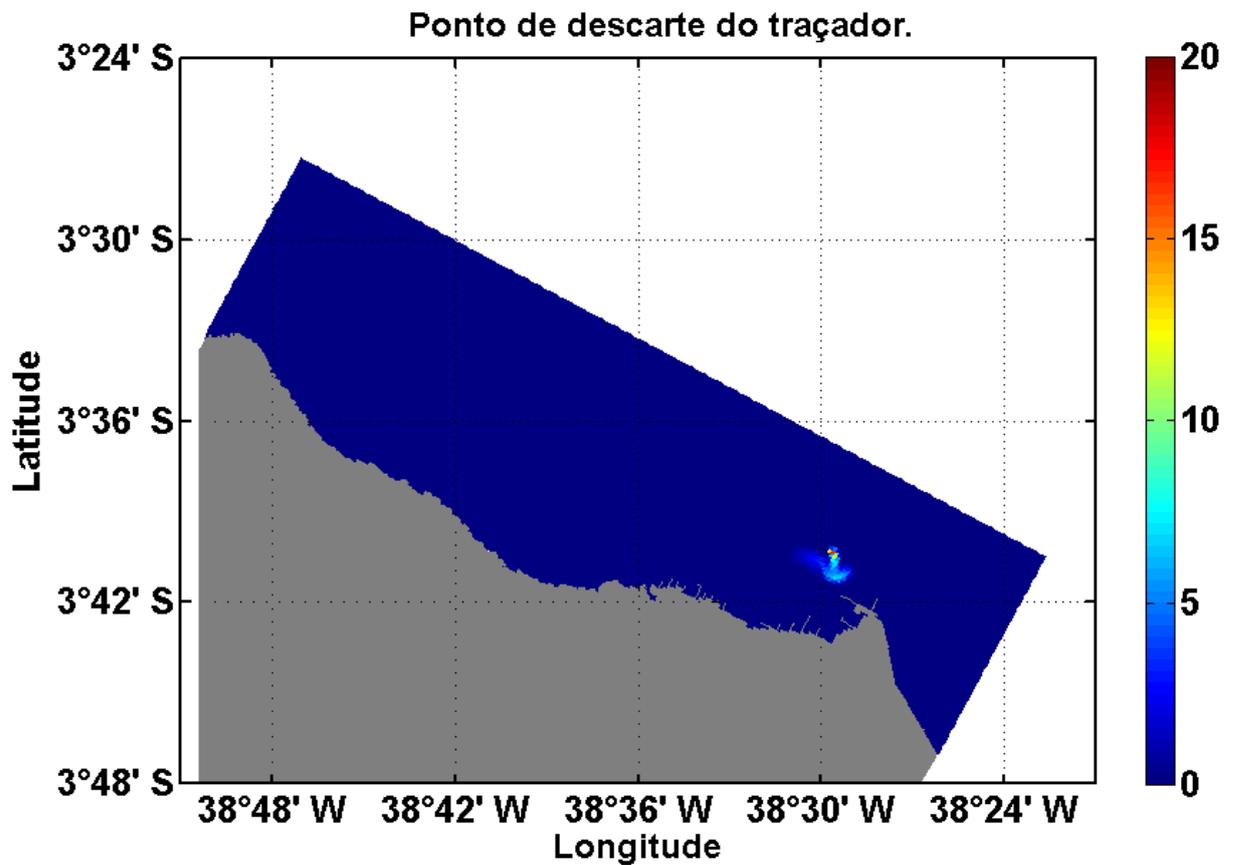
Para avaliar a dispersão de materiais e possíveis contaminantes, foi usado um traçador passivo em todas as simulações. São apresentados os resultados para 05 e 10 dias após o início do descarte nos meses de verão e para 02 e 04 dias após o descarte para o inverno, visto que nos cenários VENTO e ONDA o traçador não é mais encontrado na grade estudada depois destes períodos. Na figura 23, observa-se o ponto de descarte do traçador, sendo o mesmo para todas as situações.

Observou-se uma menor dispersão do traçador na condição MARÉ, mesmo sendo esta a principal forçante da variação temporal da circulação da região. Como mencionado anteriormente, isto se deve ao ciclo oscilatório da maré, sendo o transporte longitudinal apenas decorrência do fluxo residual e da difusão do traçador. Portanto, esta baixa dispersão está relacionada com o baixo fluxo residual encontrado neste cenário.

Comparando-se os resultados das simulações de marés com as demais, observa-se que esta forçante da circulação gera um maior transporte na direção transversal à linha de costa, que é a direção preferencial de atuação da componente M2 (FIGURA 4) constituinte de maré mais importante da região.

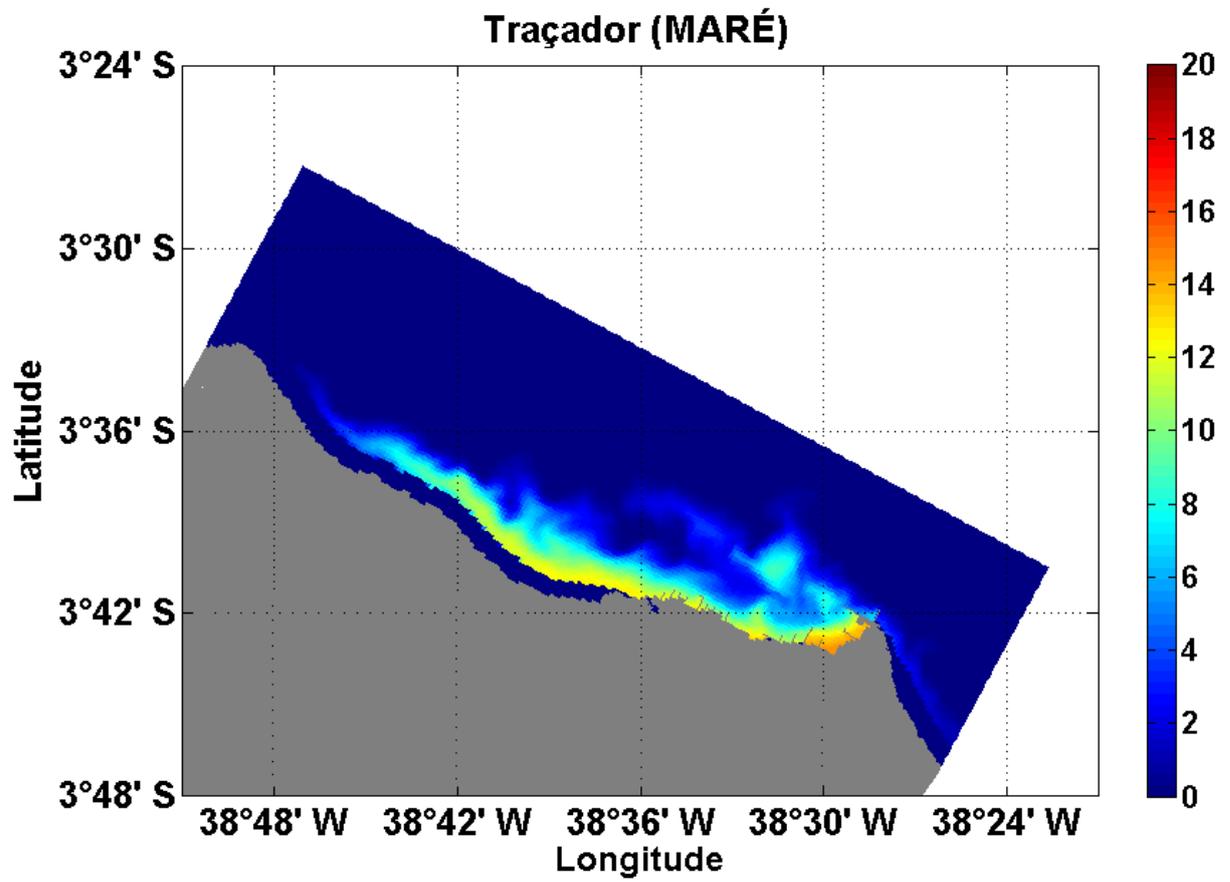
Observa-se ainda que mesmo com as pequenas correntes residuais de maré, o material é transportado para a direção oeste, seguindo a circulação próxima à costa observada na figura 17.

Figura 23 - Ponto de descarte do traçador para todas as situações.



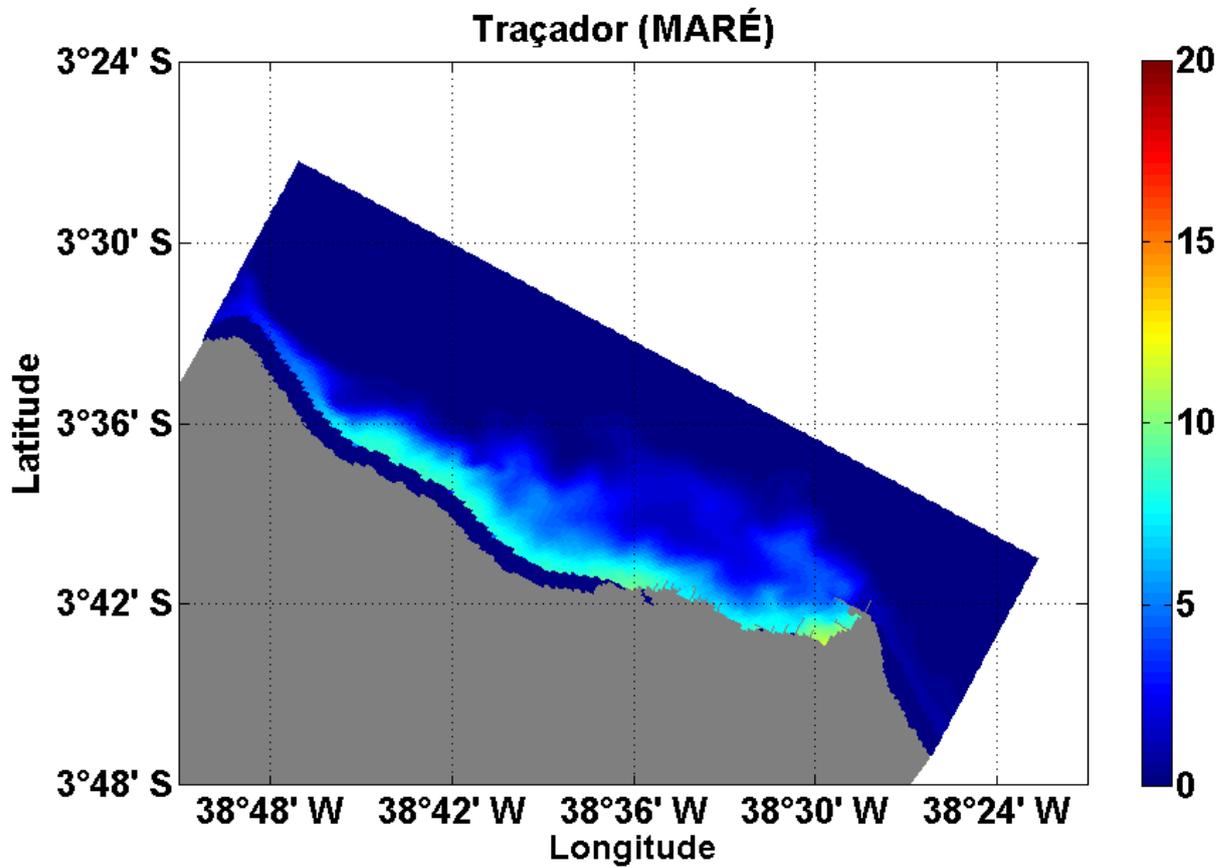
Nas figuras 24 e 25, fica clara a interferência das obras de engenharia costeira na dispersão do traçador, ao se observar pontos de acúmulo próximos a essas. Isto mostra que há interferência das estruturas no campo de velocidade local e na dispersão de material. Estes resultados mostram que há um acúmulo de material à oeste das estruturas e que as mesmas também induzem um transporte na direção *off-shore*.

Figura 24 - Dispersão do traçador (kg/m³) na condição MARÉ, 05 dias após o descarte durante os meses de verão.



Fonte: o autor

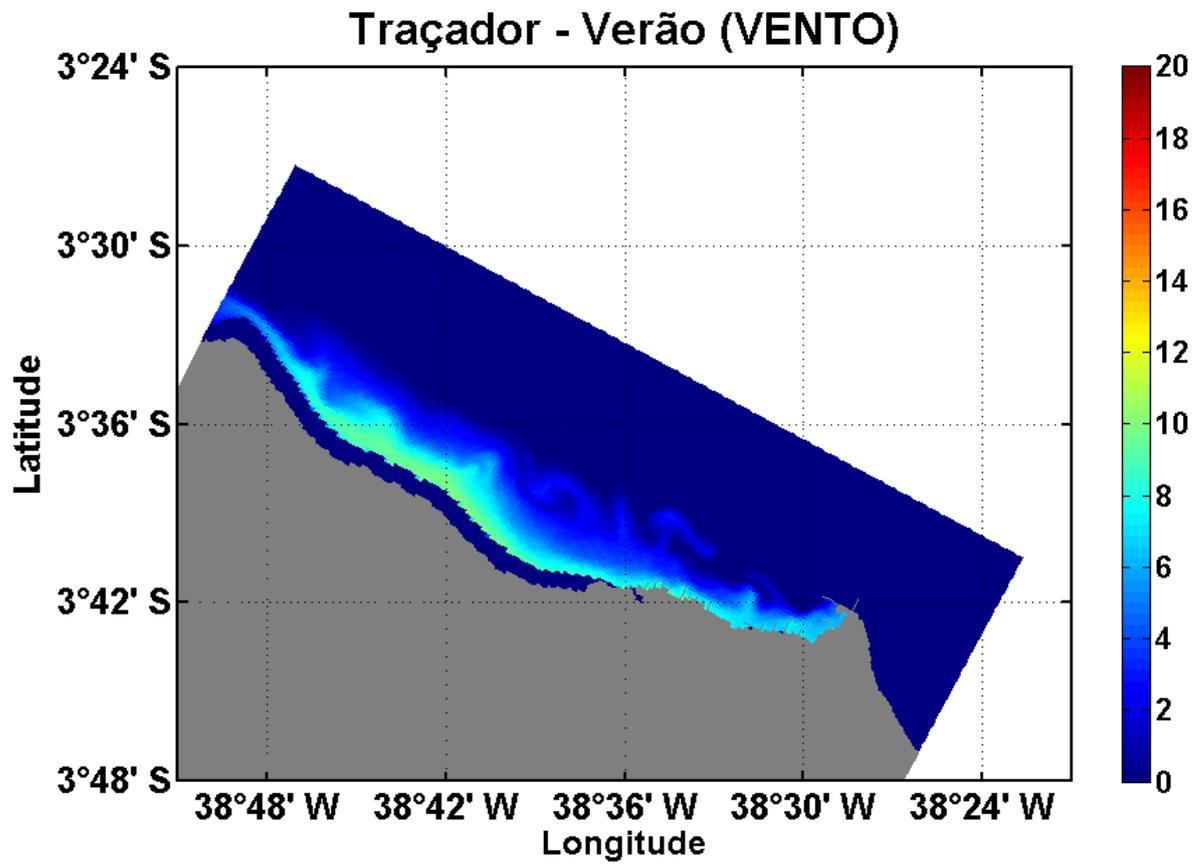
Figura 25 - Dispersão do traçador (kg/m³) na condição MARÉ, 10 dias após o descarte durante os meses de verão.



Fonte: o autor.

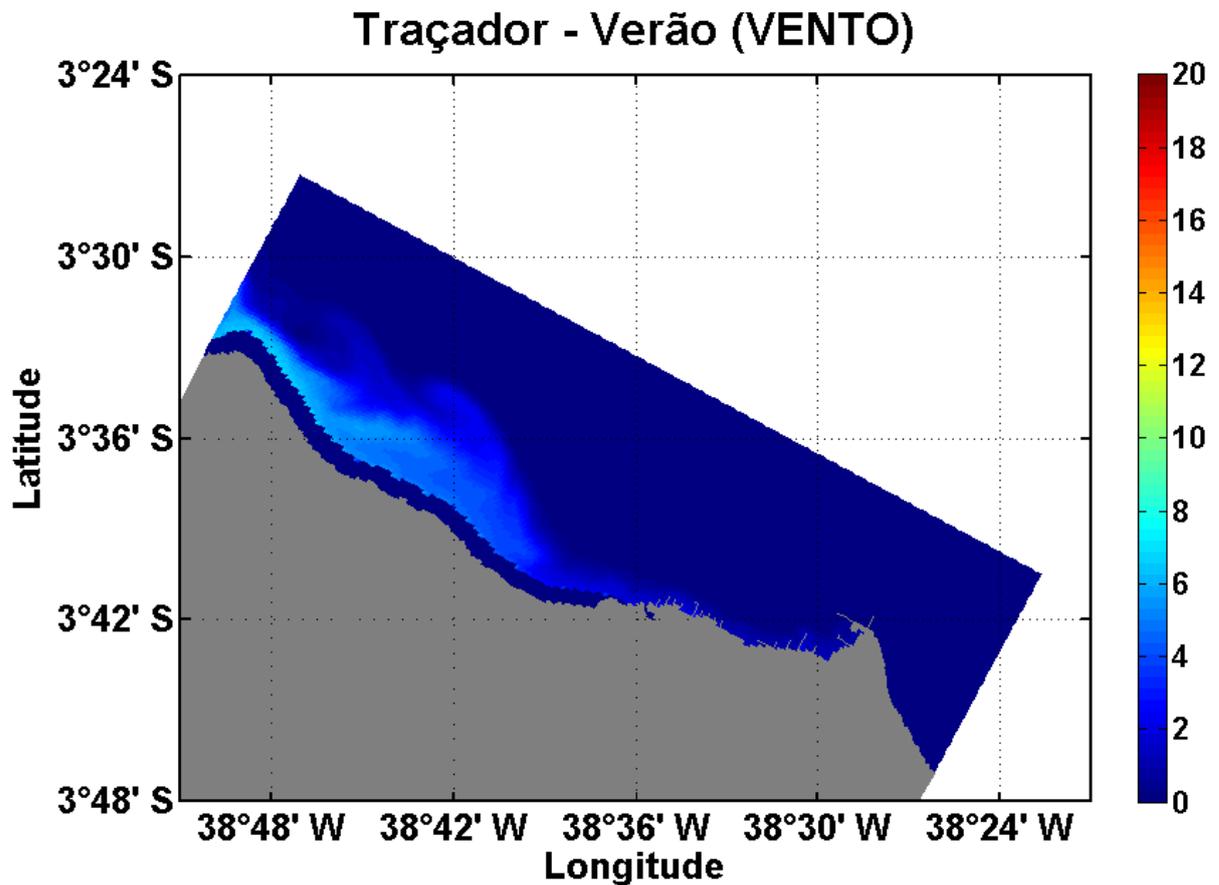
Durante o verão, ao se adicionar vento na simulação (VENTO), o traçador se dispersou por toda grade em 10 dias após o descarte, o que totaliza aproximadamente 40,4 Km percorridos. Mesmo com a ação dos ventos, foi possível observar pontos de acúmulo do traçador próximos as estruturas de engenharia (FIGURA 26). Porém, após 10 dias de dispersão, as concentrações encontradas próximas a área de descarte são praticamente nulas (FIGURA 27).

Figura 26 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição VENTO, 05 dias após o descarte durante os meses de verão.



Fonte: o autor.

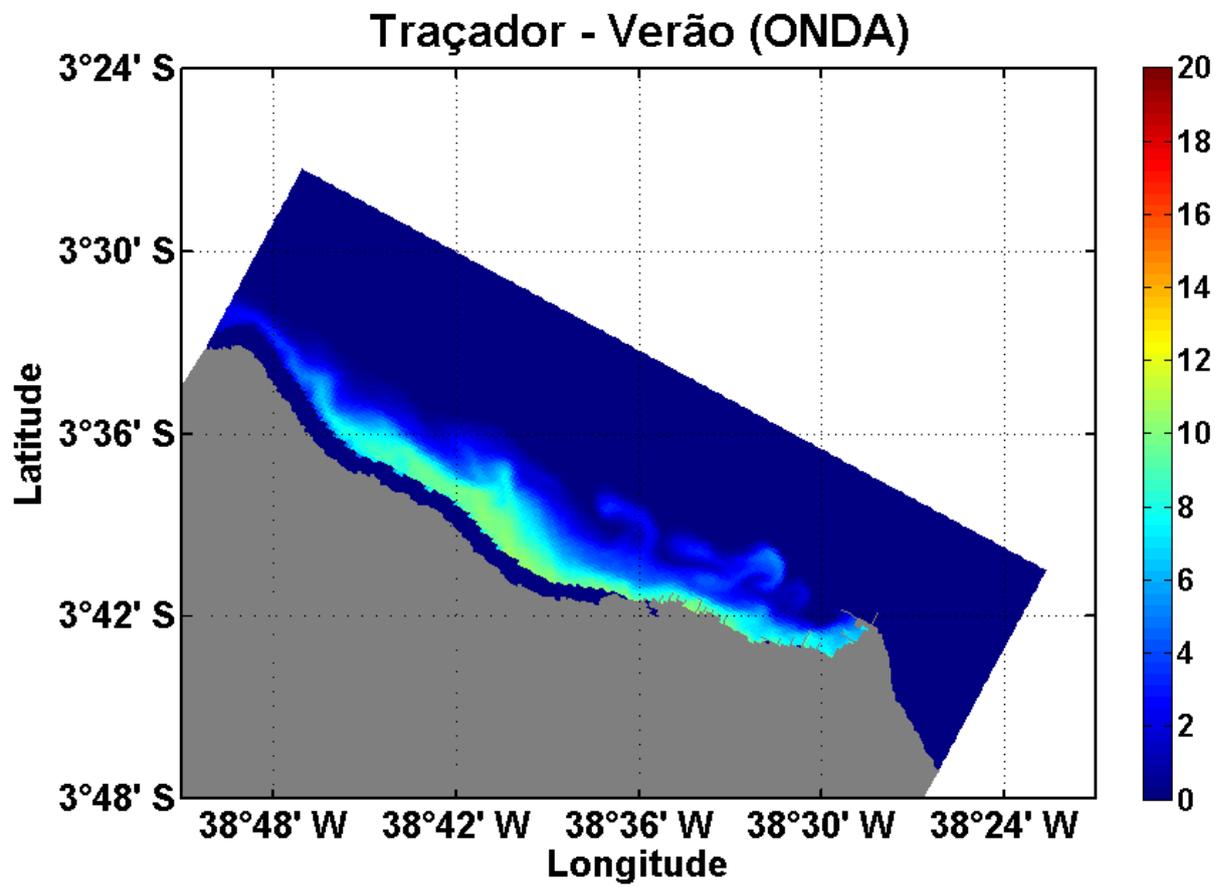
Figura 27 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição VENTO, 10 dias após o descarte durante os meses de verão.



Fonte: o autor.

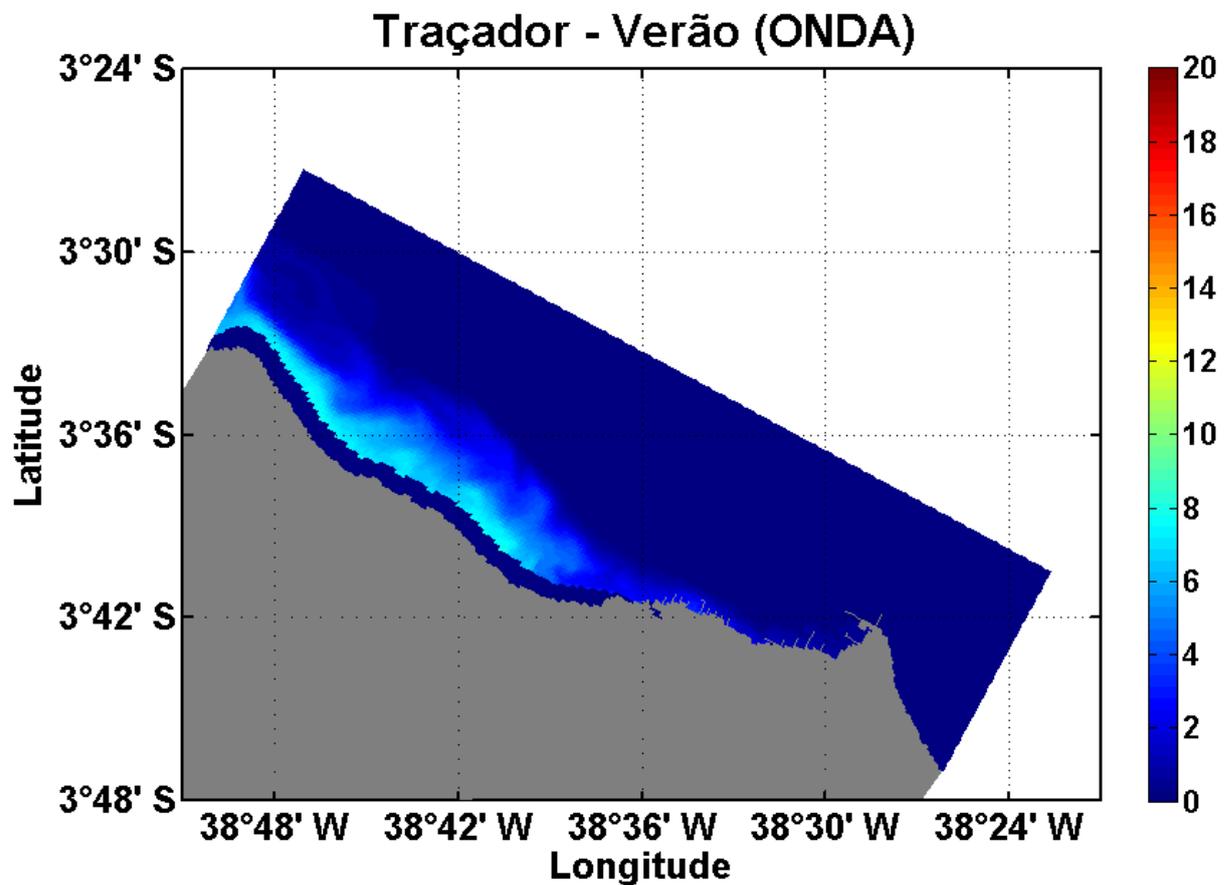
Adicionando-se a ação das ondas ao modelo, o padrão de dispersão do traçador não apresentou grandes diferenças, tendo comportamento muito parecido à condição vento (FIGURA 28), devido à pouca influência das ondas no campo de correntes residuais. Porém, ao se observar os resultados após 10 dias de descarte (FIGURA 29), são observadas maiores concentrações do traçador comparadas com as concentrações encontradas na condição VENTO para o mesmo instante (FIGURA 27). Isto pode ser explicado pela influência causada pela ação das ondas que forçam para leste o fluxo residual.

Figura 28 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição ONDA, 05 dias após o descarte durante os meses de verão.



Fonte: o autor.

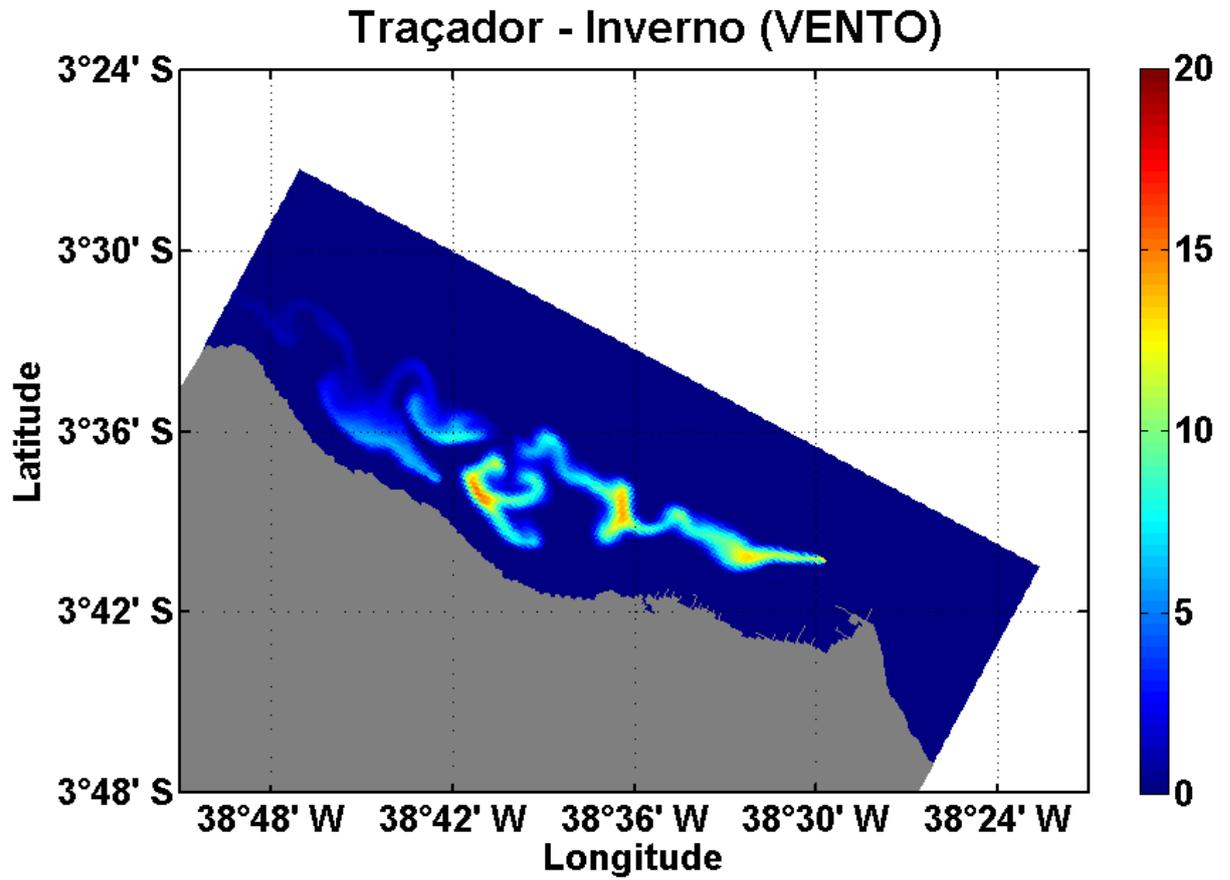
Figura 29 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição ONDA, 10 dias após o descarte durante os meses de verão..



Fonte: o autor.

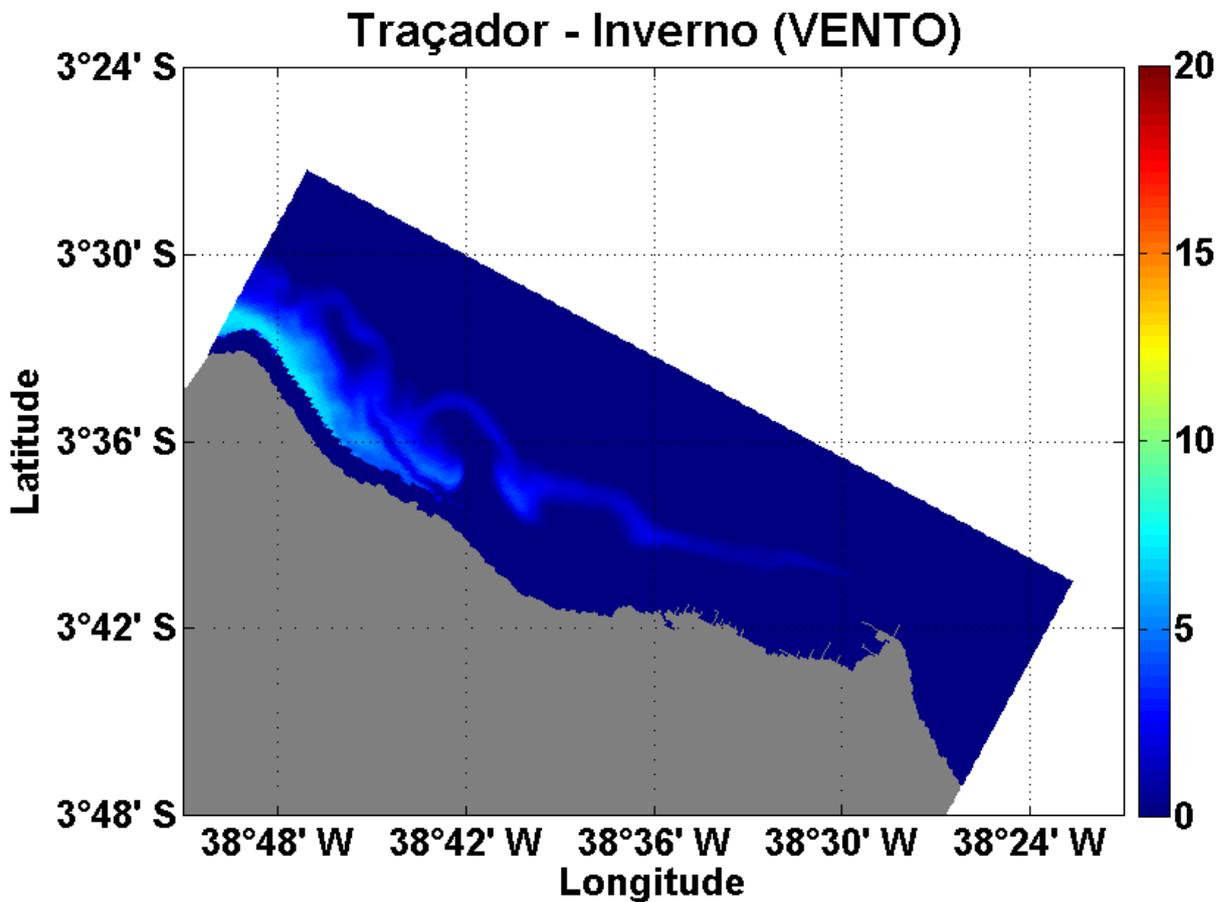
No inverno (FIGURA 30), o traçador apresentou um padrão de dispersão mais intenso do que no verão, devido à ação do vento de maior intensidade e a atuação das ondas no mesmo sentido das correntes, aumentando a intensidade das correntes residuais. O traçador percorreu toda a grade em 5 dias após o início do descarte, tendo dobrado a sua velocidade de transporte comparada a condição de verão. É importante ressaltar que durante as simulações de inverno, o traçador não chegou a se aproximar da costa da região metropolitana de Fortaleza (FIGURA 31).

Figura 30 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição VENTO, 02 dias após o descarte durante os meses de inverno.



Fonte: o autor.

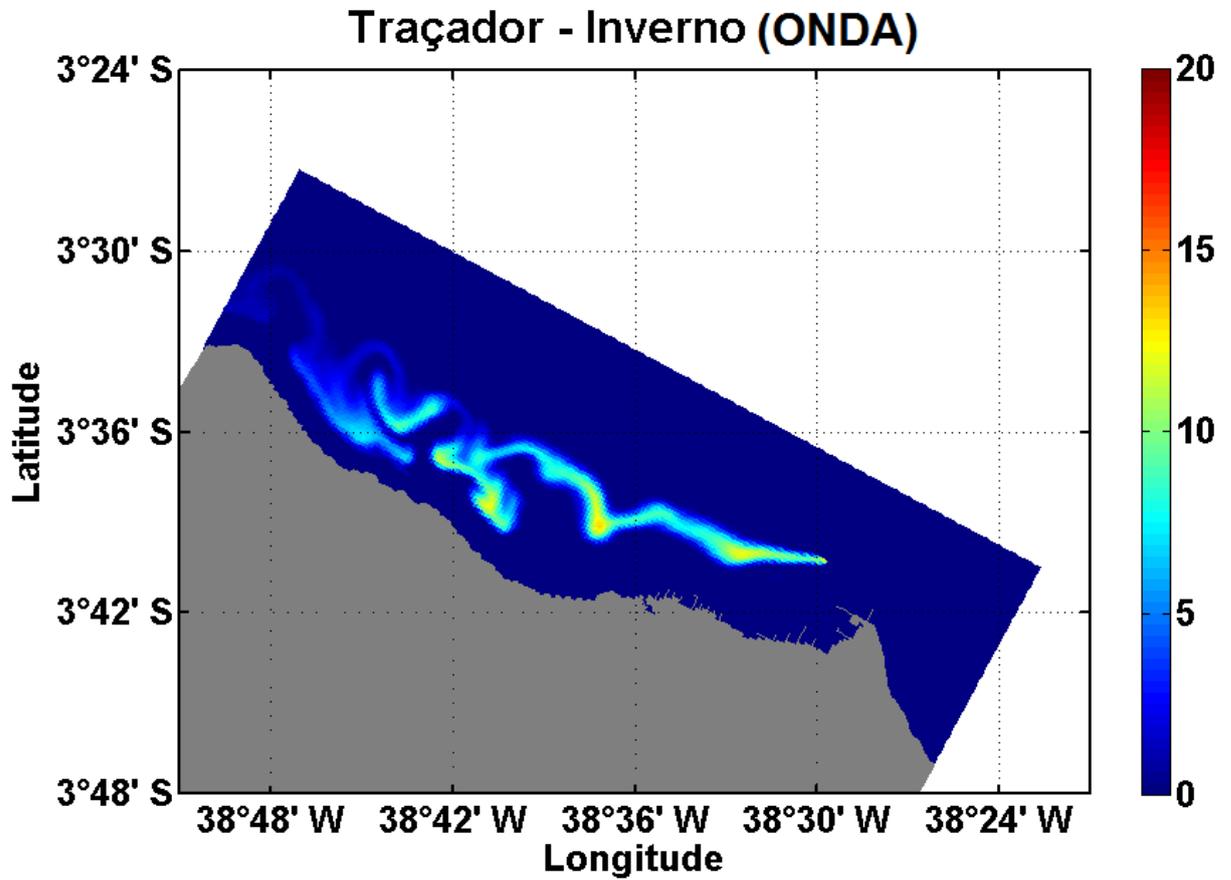
Figura 31 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição VENTO, 04 dias após o descarte durante os meses de inverno.



Fonte: o autor.

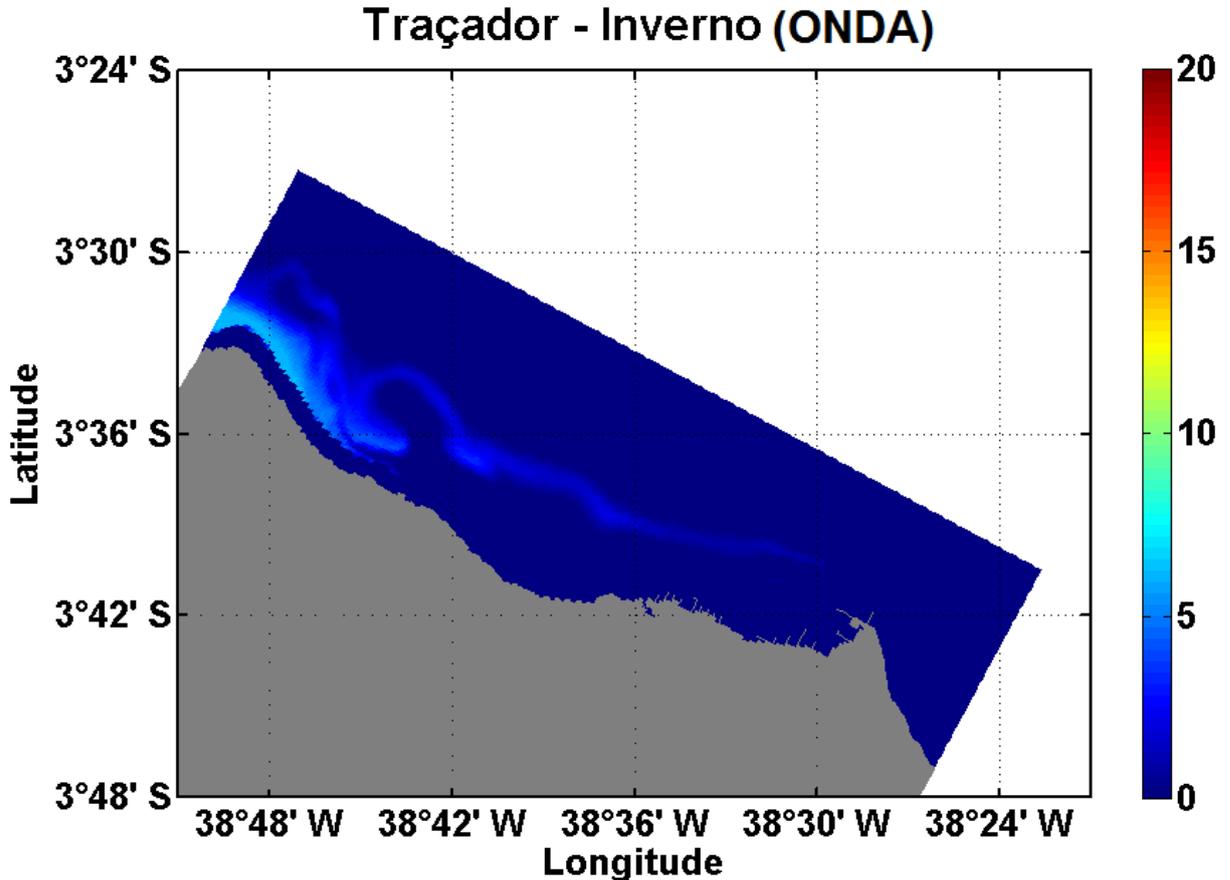
Ambas as situações, VENTO e ONDA, apresentaram padrões de dispersão muito parecidos, sendo apenas importante ressaltar a intensificação, mesmo que baixa, da dispersão do traçador na condição onde havia a ação conjunta de todos os forçantes (FIGURAS 32 e 33).

Figura 32 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição ONDA, 02 dias após o descarte durante os meses de inverno.



Fonte: o autor.

Figura 33 - Dispersão do traçador (kg/m^3) na condição ONDA, 04 dias após o descarte durante os meses de inverno.



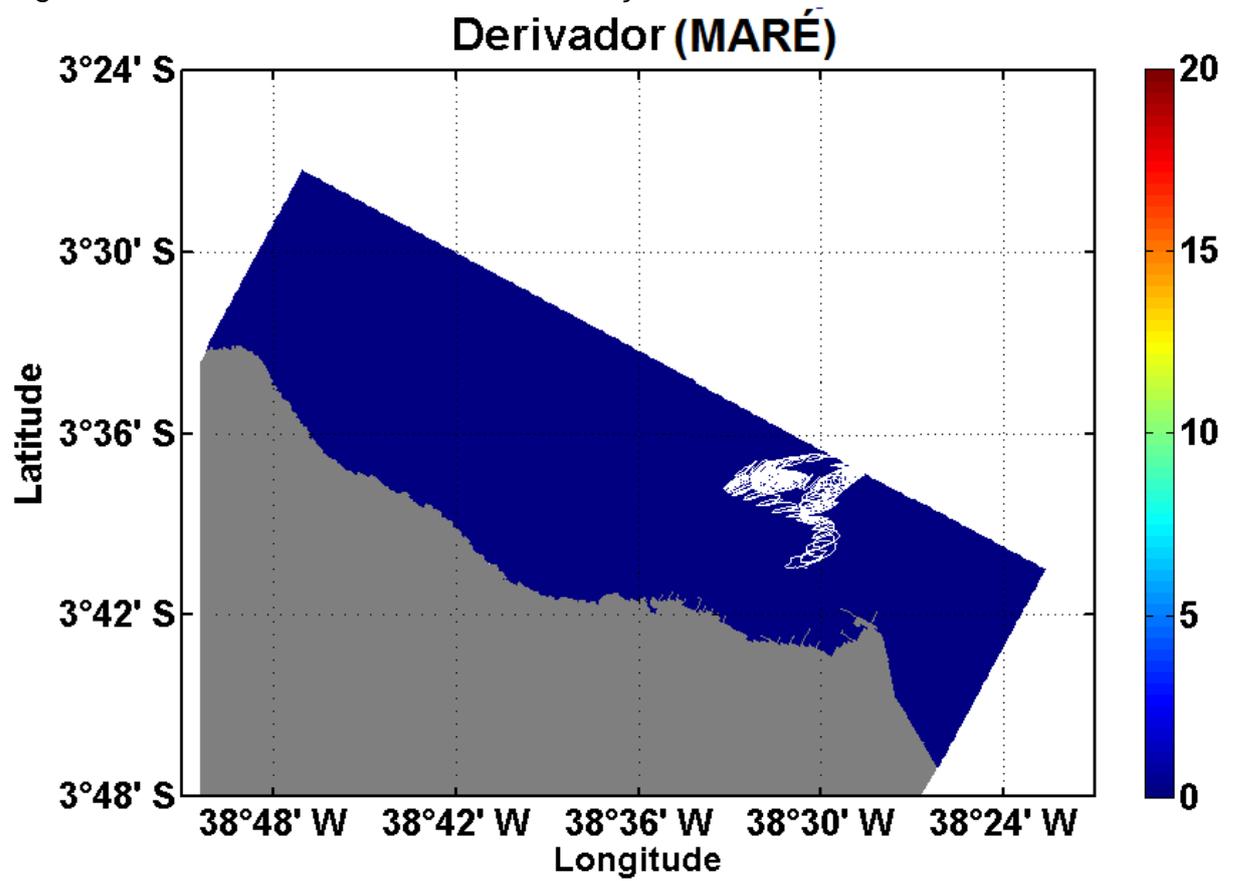
Fonte: o autor.

4.7 Derivadores

Foram adicionados derivadores no mesmo ponto de descarga dos traçadores, a fim de se estudar apenas os processos advectivos na dispersão do material. Na condição MARÉ, foi observado o movimento cíclico e estacionário característico da maré (FIGURA 34), onde o derivador ficou retido próximo à região de descarte.

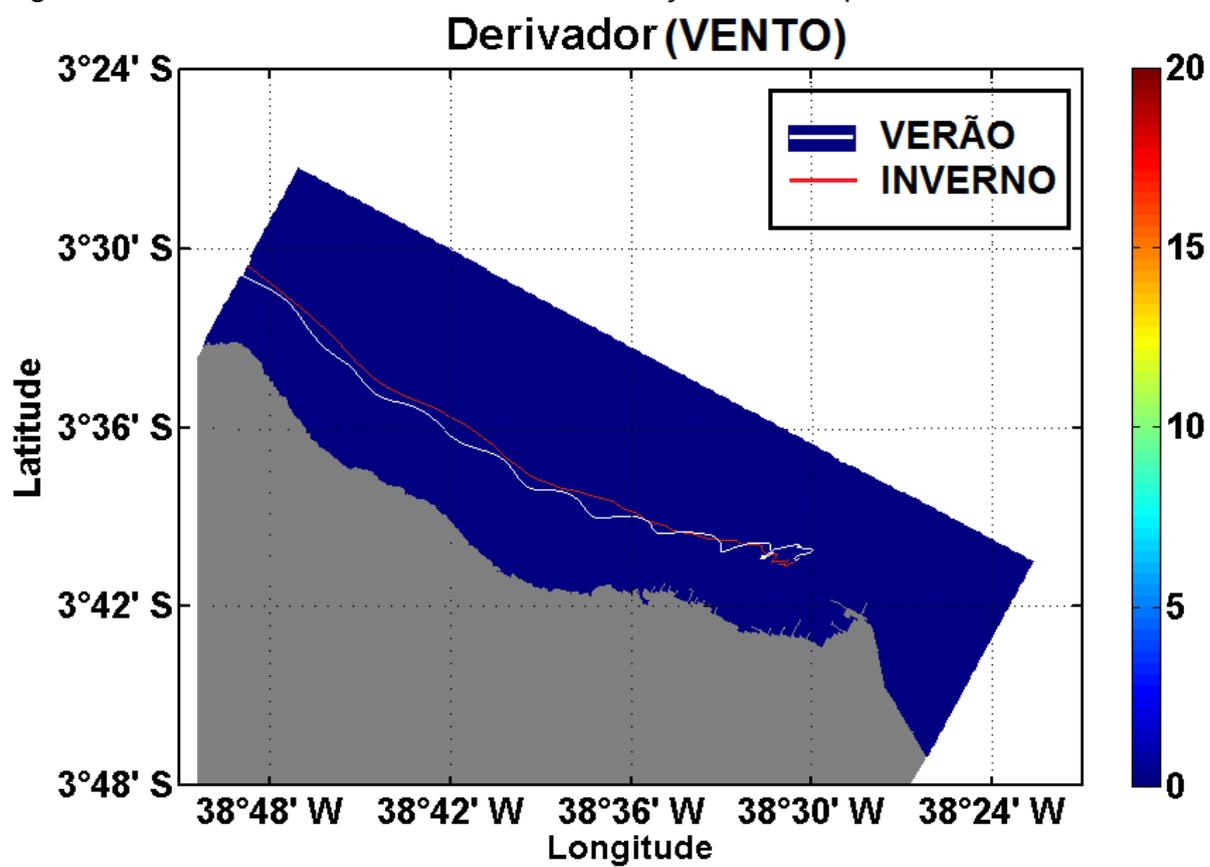
Nas condições VENTO (FIGURA 35) E ONDA (FIGURA 36), os padrões de dispersão dos derivadores foram semelhantes entre si. Comparando-se os resultados de verão e inverno, observa-se um menor efeito da maré nos meses de inverno, onde os derivadores seguiram um padrão mais retilíneo.

Figura 34 - Percurso do derivador na condição MARÉ.



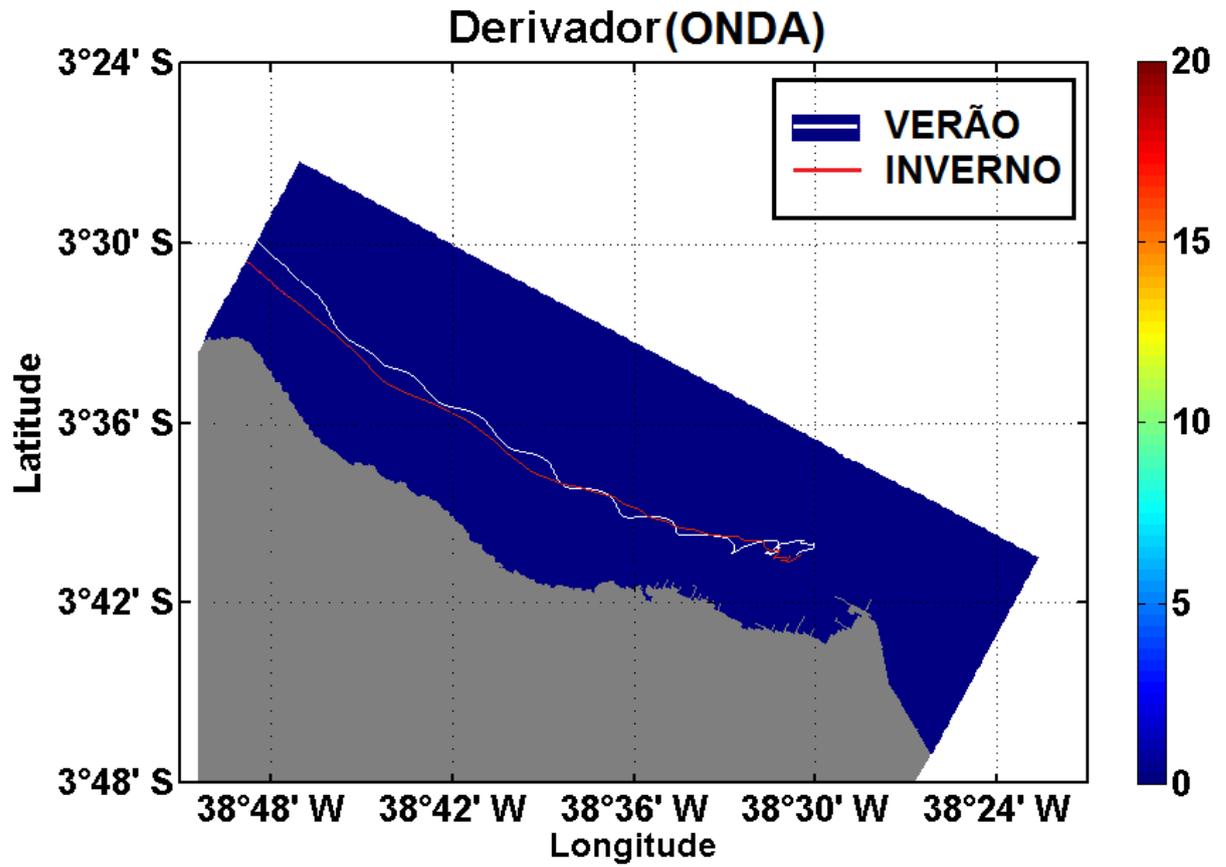
Fonte: o autor.

Figura 35 - Percurso dos derivadores na condição VENTO para o verão e inverno.



Fonte: o autor.

Figura 36 - Percurso dos derivadores na condição ONDA para o verão e inverno.



Fonte: o autor.

5 CONCLUSÃO

Pela primeira vez o modelo Delft 3D e a técnica de simulação com o emprego de traçadores passivos e partículas foi utilizada para se estudar a circulação e o transporte de substâncias e materiais na região metropolitana de Fortaleza.

Neste estudo mostramos que a maré é o principal forçante da variabilidade total da circulação de Fortaleza, porém, devido ao seu caráter cíclico, o vento é mais importante para os padrões de dispersão de materiais e substâncias. As ondas apresentaram pouca influência no campo de velocidade e no padrão de dispersão de materiais.

Com a análise sazonal, observou-se que no inverno, com a presença de ventos alísios mais intensos, o campo de velocidade local e os padrões de dispersão de materiais na região costeira de Fortaleza são mais intensos. No verão, com a incidência de ondas swell (N-NE) combinada com ventos menos intensos, os materiais tendem a se aproximar da costa em virtude da ação das ondas e a apresentarem padrões de dispersão menos intensos aos do inverno.

Observou-se ainda a influência das obras de engenharia costeira no campo de velocidade e nos padrões de dispersão de materiais e substâncias na região estudada. Próximo a estas obras, foi possível observar áreas susceptíveis ao acúmulo de materiais em virtude desta influência.

O estudo mostra que o modelo Delft 3D é capaz de reproduzir a circulação na região e que o mesmo pode ser usado em estudos de transporte langrageano, sendo uma importante ferramenta para a determinação do efeito de obras costeiras ao longo da orla de Fortaleza.

Para o aprimoramento da técnica, é necessária a aquisição de dados de batimetria para a região mais próxima à costa e a utilização de uma grade com maior resolução.

É importante ressaltar que a aquisição de dados *in situ* de direção e intensidade das correntes é fundamental para uma calibração da circulação residual

da região, visto que, ao validar apenas os resultados de nível do mar, não há validação dos resultados da componente da circulação forçada pelo vento, sendo esta de grande importância para a dinâmica da região. Por fim, em vista dos resultados, existe a necessidade da instalação de estações meteorológicas junto à costa, a fim de se monitorar a variabilidade deste importante forçante.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C. E.; QUINLAN, J. F., ***Practical Tracing of Ground Water, with Emphasis on Karts Terranes***. Geological Society of América: Cincinnati, Ohio, v. 1, 1992.
- ASSIREU, A. T.; PACHECO, F. S.; PEREIRA, R. R. **Estudo da dispersão de partículas em reservatórios a partir de derivadores rastreados por satélite**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013. P. 9048 – 9054.
- BEDMAR, A. P.,1972. **Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo**. *Isotopos em Hidrologia*. Ed. Alhambra, pp. 71 – 89.
- BJ RNSTAD, T.; MAGGIO, G. E.; ***Radiotracer technology as applied to interwell communication in oilfields***; Tese de pós-doutorado, *University of Neuchâtel*, Vienna, 1994.
- CASTRO, B. M. et al. **Estrutura termohalina e circulação na região entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS).IN: O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil**. Universidade de São Paulo, São Paulo: EDUSP, 2006. 472 p. São Paulo, 1996. 200 p. Tese de Livre Docência.
- COCHRANE, J. *Equatorial undercurrent and related currents off brazil in march and april 1963*. **Science**, v. 142, p. 669–671, 1983.
- CORELL, H. et al. ***Larval traits determine dispersal distance and optimum size of marine protected areas***. Marine Ecology Progress Series, 2011.
- Dantas, E.W.C. **Mar à Vista: estudo da maritimidade em Fortaleza**. 1ª ed., vol. 1. Museu do Ceará/SECUL, Fortaleza, p. 1-134, 2002.
- DELFT3D. **Manual do usuário**, v. 3.15.26466, Holanda, 2013.
- DIAS , F. J. S. **Circulação e massas de água na plataforma continental leste do Ceará: modelagem numérica e observações**. São Paulo, 2011. Tese de doutorado.
- GIORI, J. Z. **ANÁLISE DOS EFEITOS DE DESPEJOS ACIDENTAIS DE POLUENTES EM CORPOS HÍDRICOS USANDO TRAÇADORES FLUORESCENTES - ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO GUANDU / RJ**. Dissertação de mestrado, COPPE, RJ, 2011.
- JOCHUM, M; MURTUGUDDE, R. ***Physical Oceanography***. 250 p. 2006.
- JOHNS, B. ***Physical oceanography coastal and shelf seas***. Elsevier *Oceanography Series*, 35. Inglaterra, 1983. 470 p.

KRAJEWSKI, J. L. B. **Short Historical Dictionary on Urban Hydrology and Drainage**. França, 2006.

LEMOS, A. T. **MODELAGEM NUMÉRICA DA MARÉ BAROTRÓPICA NA COSTA DO ESPÍRITO SANTO**. 64 f. Monografia - Curso de Oceanografia, Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

LESSER, G.R. et al. *Development and validation of a three-dimensional morphological model*. **Coastal Engineering**, n. 51, p.883-915, 25 ago. 2004.

LEUDMANN, E. F.; PEREIRA, S. G. *Some results of the drift-bottle releases in the western equatorial waters during gale, 1974*. **Boletim do Instituto Oceanográfico**. Universidade de São Paulo, v. 4, p. 22, 1976.

MAGIO, G. E.; **Aplicaciones Industriales De Radiotrazadores Y Fuentes Selladas De Radiación**. Proyecto RLA-8-024 (ARCAL, 43), CNEA: Buenos Aires, 2000.

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

METCALF, W. G.; STALCUP, M. C. *Origin of the atlantic undercurrent*. **Journal of Geophysics Research**, v. 72, p. 4959–4975, 1967.

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

OYE, L. *Simulation of Mesoscale Variability in the Gulf of México: Sensitivity Studies, Comparison with Observations, and Trapped Wave Propagation*. **Journal of Physical Oceanography**. vol. 26(2), pg. 145-175, 1996.

PAULA, D.P. et al. *High-rise development of the sea-front at Fortaleza (Brazil): Perspectives on its valuation and consequences*. **Ocean & Coastal Management**, n. 77, p.14-23, 21 mar. 2013.

PITOMBEIRA, E. S. **Deformação das ondas por difração no molhe do Porto do Mucuripe (Fortaleza – Ceará – Brasil)**. Arq. Ciências do Mar, 16 (1), Fortaleza, CE, 1976, p. 55 – 58.

RODI, W., 1984. **Turbulence models and their application in hydraulics, State-of-the-art paper article sur l'état de connaissance**. *Experimental and Mathematical Fluid Dynamics*, Holanda, 1984.

SIGNORINI, S. R.; MIRANDA, L. B. *Tidal and low-frequency currents near the shelfbreak: Northeastern coast of Brazil*. **Journal Physics Oceanography**, v. 13, p. 2107 – 2115, 1983.

SILVA, A. C. et al. Características das ondas “sea” e “swell” observadas no litoral do Ceará – Brasil: Variabilidade anual e inter-anual. **Tropical Oceanography online**, ISSN: 1679-3013, 2011.

SILVA, L. C. F.; ALVARENGA, J. B. R. **Levantamento do estado da arte dos recursos vivos marinhos do Brasil - Oceanografia Física da Região Nordeste.** Ministério do Meio Ambiente, 1994. 200 p.

SOOMER et al. ***Towards identification of areas of reduced risk in the Gulf of Finland, the Baltic Sea.*** *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* 59, 156-165, 2010.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S.; DIAS, M. A. F. S. D.; DIAS, P. L. S. D. Interrelações Entre Eventos ENOS (ENSO), a ZCIT (ITCZ) no Atlântico e a Chuva nas Bacias Hidrográficas do Ceará. RBRH - **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Vol. 8, n.2, 2003, p. 111–126.