



## MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2D DA REGIÃO COSTEIRA DE CABO FRIO/RJ EM APOIO AO SISTEMA TÁTICO DE FATORES AMBIENTAIS – STFA

*Marcos Henrique Maruch Tonelli<sup>1</sup>*

*Victor Bastos Daher<sup>2</sup>*

*Thiago Silva Baron<sup>3</sup>*

*Fernando Ribeiro<sup>4</sup>*

*Augusto Pereira<sup>5</sup>*

*Marcia Helena Moreira Valente<sup>6</sup>*

### RESUMO

O projeto STFA (Sistema Tático de Fatores Ambientais) tem por objetivo apresentar um sistema de consulta rápida e amigável com informações detalhadas do cenário físico marinho de modo a auxiliar o planejamento de operações navais, viabilizar o monitoramento costeiro de regiões de interesse para a Marinha do Brasil, bem como subsidiar setores da sociedade civil vinculados à pesquisa e à utilização do mar. O desenvolvimento do STFA prevê a manipulação dos dados oceanográficos qualificados através da análise objetiva e a utilização da modelagem hidrodinâmica como alicerces para fornecer climatologias no entorno estratégico da Amazônia Azul, com detalhamento na ZEE que vai de Santos/SP a Vitória/ES. Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares das simulações numéricas 2D utilizando o modelo *Advanced Circulation* (ADCIRC) para a região oceânica adjacente aos municípios de Cabo Frio/RJ e Arraial do Cabo/RJ.

<sup>1</sup> Oficial da Reserva de 3ª Classe; Oceanógrafo. Doutor em Oceanografia Física pela USP. Email: marcos.tonelli@marinha.mil.br

<sup>2</sup> Oficial da Reserva de 3ª Classe; Oceanógrafo. Doutor em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Email: victor.daher@marinha.mil.br

<sup>3</sup> Oficial do Corpo de Engenheiros; Engenheiro Mecânico. Mestrando em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Email: thiago.baron@marinha.mil.br

<sup>4</sup> Oficial do Quadro Técnico; Oceanógrafo. Mestre em Oceanografia Física pela UFSC. Email: fernando-ribeiro.fr@marinha.mil.br

<sup>5</sup> Oceanógrafo. Mestre em Oceanografia Física pela USP. Email: augustoceano@gmail.com

<sup>6</sup> Oficial do Quadro Técnico; Oceanógrafa. Doutora em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Email: marcia.helena@marinha.mil.br



O ADCIRC reproduziu de maneira satisfatória a circulação na região de estudo, bem como o efeito da maré na dinâmica local. O erro quadrático médio computado entre dados de marégrafo e FES2014+HYCOM (condições de contorno) foi de 5,2 cm e de 3,4 cm quando calculado entre o marégrafo e o ADCIRC. O coeficiente de correlação entre os dados de marégrafo e os dados simulados foi de 0,99 para os dois casos. A utilização de resultados do FES2014 associados ao HYCOM-NCODA no contorno se mostrou uma estratégia eficiente para avaliar a hidrodinâmica regional.

**Palavras-chave:** Sistema Tático de Fatores Ambientais; STFA; ADCIRC.

## ABSTRACT

The STFA project (Tactical System of Environmental Factors) aims to provide a friendly system for prompt access to detailed information on ocean physical parameters in support of naval operations, coastal monitoring of strategic regions for the Brazilian Navy, as well as to support civil sectors linked to research and uses of the sea. STFA builds upon the processing of qualified oceanographic data using objective analysis techniques and numerical modeling as the base to produce met-ocean climatologies across the Amazônia Azul area, with the detailed information provided within Brazil's exclusive economic zone, between Santos/SP and Vitória/ES. This work presents preliminary results from 2D hydrodynamical modeling experiments using the Advanced Circulation Model (ADCIRC) for the coastal region of

Cabo Frio/RJ, and Arraial do Cabo/RJ. ADCIRC was able to reproduce the main features of the local ocean circulation, and to capture the impact of tidal oscillations on local dynamics. A root mean square of 5.2 cm was computed between tidal gauge data and boundary conditions (FES2014+HYCOM) and 3.4 cm between the gauge data and ADCIRC. The correlation coefficient for both cases is 0.99. The results also suggest that using boundary conditions extracted from FES2014 and HYCOM-NCODA for 2D modeling applications may be an efficient first approach to assess regional hydrodynamics, since it is computationally inexpensive and somewhat uncomplicated to setup.

**Keywords:** Tactical System of Environmental Factors; STFA; ADCIRC.

## 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA) originou-se da necessidade de integração das informações ambientais das Cartas Temáticas de Fatores Físicos (desenvolvidas pelo Centro de Hidrografia da Marinha – CHM) e do Sistema Tático Ambiental (desenvolvido pelo Instituto de Estudos do Mar Paulo Moreira – IEAPM), com objetivo de oferecer ao setor operativo um sistema único de consulta das informações ambientais do meio marinho para diversos usos.

Contudo, diante da singular vocação do IEAPM para o conhecimento do mar e dos desafios impostos para a retomada do crescimento econômico do país, julgou-se oportuno atualizar o STFA de

modo a atender a outros setores vinculados ao estudo e a utilização do mar, como navegação, pesca, turismo, geração de energia renovável, extração de petróleo e gás, comércio exterior, além da investigação de recursos naturais e biodiversidade ainda inexplorados.

Além de colaborar com as tarefas estratégicas de “negação do uso do mar” e “controle de áreas marítimas”, atribuídas à Marinha do Brasil (MB) na Estratégia Nacional de Defesa (END), o STFA, assumindo um caráter dual, propiciará maior estímulo à investigação científica, à produção de conhecimento e à obtenção de resultados inovadores, indo ao encontro do estabelecido na Estratégia Nacional de CT&I (2016-2022): “o conhecimento científico dos oceanos, das zonas costeiras e de águas interiores é pré-requisito para a adequada gestão, proteção e utilização sustentável de seus recursos [...]”.

Com efeito, adotando uma abordagem multidisciplinar, o STFA enumera objetivos e metas estratégicas, tanto na área científica e de inovação quanto na área de defesa, como o “Conhecimento do Mar” e “Independência Estrangeira”, visando diminuir a lacuna que separa o Brasil dos países mais desenvolvidos no âmbito do conhecimento e aproveitamento sustentável dos oceanos.

Nesse contexto, o escopo do STFA compreende dois objetivos principais:

a) Fornecer um *software* de consulta rápida e amigável, que contenha informações detalhadas do cenário físico e variáveis metoceanográficas, como elemento de auxílio às decisões táticas, ao planejamento das Operações Distritais

e Navais, na confecção de produtos que exijam uma avaliação do meio ambiente marinho ou de apoio jurídico;

b) Viabilizar o monitoramento de processos costeiros em locais e regiões de interesse da Marinha do Brasil, buscando a nacionalização dos sistemas de aquisição de dados e propondo modelos dinâmicos para situações características ou para alguma necessidade específica.

Atualmente, o STFA é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para variáveis ambientais: temperatura da água do mar, salinidade, velocidade do som na água, densidade, temperatura na camada de mistura, profundidade de camada, gradiente térmico da termoclina, temperatura do ar, pressão atmosférica ao nível do mar, umidade relativa do ar, vento, precipitação, altura significativa de ondas, batimetria e tipo de fundo.

Essas variáveis compõem a Base de Dados Qualificada do IEAPM (BDAQ), que agrega dados oceanográficos (temperatura e salinidade) qualificados por meio do Sistema de Carga e Registro de Dados Oceanográficos (CARGO) obtidos pelo lançamento de CTDs (*Conductivity, Temperature, and Depth*) e XBTs (*eXpendable BathyThermograph*), flutuadores ARGO e *Gliders* durante comissões realizadas por navios da Marinha do Brasil, e por comissões de oportunidade de navios nacionais ou estrangeiros.

A nova versão do STFA prevê diversas metas que compreendem desde a atualização de módulos já desenvolvidos, como o CARGO, até a utilização de técnicas de Análise Objetiva de Múltiplas Escalas e modelagem numérica hidrodinâmica visando



aprimorar a resolução e qualidade das climatologias oceânicas disponibilizadas pelo sistema. Aqui serão apresentados os resultados preliminares dos estudos de modelagem hidrodinâmica 2D utilizando modelo numérico *Advanced Circulation* (ADCIRC) para a região costeira adjacente aos municípios de Cabo Frio e Arraial do Cabo, Rio de Janeiro – Brasil. O domínio foi escolhido considerando a relevância científica desta região que se caracteriza pela ocorrência do fenômeno da ressurgência.

## 2. METODOLOGIA

A fase inicial dos estudos de modelagem hidrodinâmica desenvolvidos no âmbito do projeto STFA consiste da utilização do módulo 2D do modelo ADCIRC para realizar simulações numéricas da região oceânica localizada entre os municípios de Maricá e Cabo de São Tomé, no estado do Rio de Janeiro, pois esta é uma região de grande interesse oceanográfico por apresentar, em seu centro, uma área de intensa ressurgência costeira (CALADO *et al.*, 2010; CAMPOS *et al.*, 2000; CASTELAO *et al.*, 2004; PALÓCZY *et al.*, 2014).

A ressurgência de Cabo Frio é caracterizada pelo movimento ascendente da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), água fria e rica em nutrientes, que escoia pelas camadas de fundo da plataforma continental, ascendendo devido a divergência costeira gerada pelos ventos de NE associada à dinâmica de Ekman, bem como pela presença da costa (KÄMPF & CHAPMAN, 2016; ALLARD, 1955; EMÍLSSON, 1961; IKEDA *et al.*, 1974). Além do regime de ventos, outros fatores

atuam no estabelecimento do fenômeno da ressurgência em Cabo Frio: variações sazonais da posição da Corrente do Brasil (CB), a dinâmica associada aos meandros da CB, o bombeamento de Ekman ao longo da plataforma continental (STRAMMA & PETERSON, 1990; SIGNORINI, 1978; CAMPOS *et al.*, 2000; CASTELAO & BARTH, 2006).

A ACAS é uma massa de água fria (6°C e 20°C), salina (34,6 e 36,2) e rica em nutrientes (CASTRO *et al.*, 2006; MIRANDA, 1985). Por um lado, a intrusão dessa água impacta o regime oceanográfico devido à formação de gradientes baroclínicos ao longo da plataforma continental, por outro, afeta a produtividade primária e os níveis mais altos da teia trófica por meio do transporte de nutrientes das camadas profundas para a zona fótica (CALIL ELIAS, 2009; COELHO-SOUZA *et al.*, 2012, PEREIRA *et al.*, 2009; 2010).

### 2.1. Modelo Numérico *Advanced Circulation* (ADCIRC)

O ADCIRC foi desenvolvido por Luettich & Westerink (1992) e é atualizado e otimizado por diversos colaboradores. O modelo resolve as equações do movimento para fluido em sistema em rotação, com discretização no espaço utilizando o método de elementos finitos e, no tempo, diferenças finitas. O ADCIRC é utilizado por instituições ao redor do globo para realizar modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos em duas dimensões (integrado na vertical) ou em três dimensões. O Sistema de Previsão

Ambiental Marinha (PAM) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e o programa mantido pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), denominado *Coastal Emergency Risks Assessment* (CERA, <http://cera.cct.lsu.edu/>), são dois exemplos de órgãos que utilizam o ADCIRC para a previsão de correntes, nível e riscos de inundação. Como forçantes, o ADCIRC inclui informações de nível ou velocidade, vento, pressão atmosférica, maré potencial e maré terrestre. Atualmente, o modelo permite a utilização da biblioteca MPI para rodadas em paralelo, aumentando sua eficiência em mais de 90%.

A malha de modelagem desenvolvida para a presente simulação possui 3438 nós de cálculo, formando 6469 elementos triangulares com resolução espacial que varia de 9.3 km no contorno oceânico a 200 m junto aos contornos de terra (Figura 1). A batimetria utilizada foi digitalizada tendo como base as cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Como condições de contorno foram utilizados resultados de nível do mar extraídos do modelo global HYCOM-NCODA e 31 constantes harmônicas de maré do modelo global de maré FES2014. Essas duas fontes de dados foram utilizadas para calcular o nível do mar composto pelo nível astronômico (devido à maré astronômica) e nível não astronômico (variação do nível do mar sem considerar a maré astronômica). Para cada ponto do contorno oceânico foi construída uma série temporal de nível do mar. Como forçantes atmosférica foram utilizados dados de vetor vento e pressão atmosférica do modelo ECMWF.

A simulação foi realizada entre 7 de novembro de 2022 e 12 de novembro de 2022, período em que o Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura (H-11), da Marinha do Brasil, apoiou uma comissão oceanográfica na região de estudo, lançando um sistema de fundeio com um medidor de correntes ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) junto ao fundo. Esses dados observados possibilitaram a validação dos resultados da simulação. Adicionalmente, o processo de validação utilizou dados de altura da superfície livre do mar coletados pelo marégrafo do sistema IARA (Interface de Acompanhamento Remoto do Ambiente Marinho) desenvolvido e mantido pelo IEAPM no cais do Porto do Forno, na Enseada do Anjos, em Arraial do Cabo, no RJ.

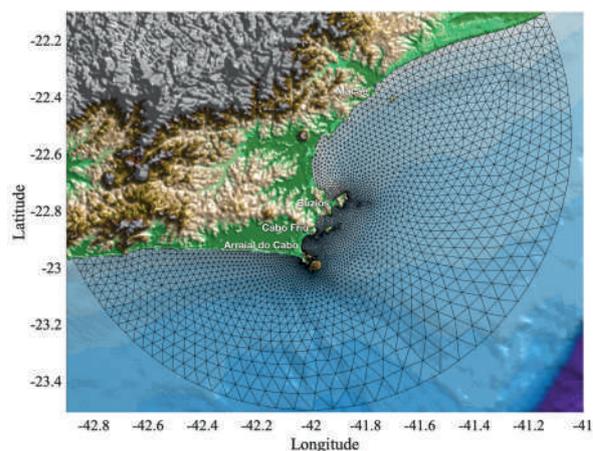


Figura 1 – Domínio de modelagem hidrodinâmica 2D. A resolução da grade varia de 9.3 km no contorno oceânico a 200 m junto aos contornos de terra. A malha contém 3438 nós de cálculo com 6469 elementos triangulares

### 3. RESULTADOS

Os resultados de nível do mar do modelo costeiro demonstram que o ADCIRC propaga a maré do contorno oceânico para a região interna da Enseada do Anjos



de forma eficiente, visto que esses resultados são sensivelmente mais próximos ao nível medido pelo marégrafo do IARA do que os resultados de altura da superfície livre do mar gerados por simulações de modelos globais (Figura 2). O cálculo do RMS (*root mean square*) entre o marégrafo e FES2014+HYCOM é de 5.2 cm, enquanto o RMS calculado entre o marégrafo e o ADCIRC é de 3.4 cm, evidenciando a capacidade do ADCIRC de propagar o sinal do contorno para as regiões internas e mais rasas do domínio de simulação. Em ambos os casos, o coeficiente de correlação entre os dados do marégrafo e os dados simulados foi de 0,99.

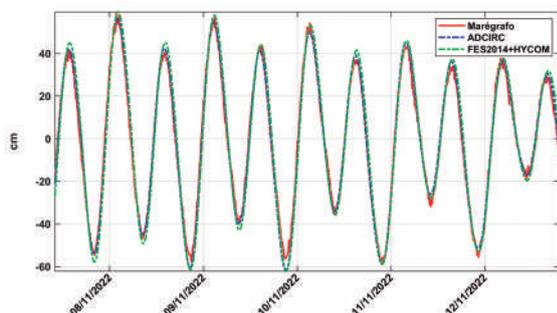


Figura 2 – Séries temporais de altura da superfície livre do mar (cm) obtidos pelo marégrafo do sistema IARA (vermelho), modelo ADCIRC (azul) e modelos FES2014+HYCOM (verde)

Considerando os resultados de corrente integrada na vertical modelada pelo ADCIRC, observa-se uma variação temporal com um sinal de corrente de maré bem marcante. A comparação desses resultados com os dados de circulação

medidos com ADCP pela comissão realizada pelo H-11, na face sul da Ilha dos Porcos, em frente a Arraial do Cabo, verifica-se que a componente *v* de velocidade foi mais bem modelada pelo ADCIRC (Figura 3). A frequência de oscilação semi-diurna observada nos dados coletados de circulação confirmam a presença da corrente de maré na região.

Para quantificar a contribuição da energia da corrente de maré em relação a energia total da circulação da região, foi realizada a análise harmônica das séries temporais das componentes *u* e *v* para a realização da previsão da corrente de maré. O cálculo isolado da variância da corrente de maré possibilita a comparação com a variância da corrente total em cada ponto de grade do domínio de simulação. A figura 4 mostra a distribuição espacial da relação entre a variância da corrente de maré e a variância da corrente total em porcentagem. Valores mais altos, próximos de 100%, evidenciam as regiões onde as correntes de maré são dominantes. Por outro lado, valores mais baixos sugerem que a circulação seja impulsionada por outros mecanismos, como forçantes atmosféricas e a variabilidade da corrente costeira *longshore*. Como exemplo, as figuras S1 e S2 mostram, respectivamente, as séries temporais de corrente total e de maré para um ponto do domínio onde a maré explica 53% (S1) e 90% (S2) da variância da corrente total.

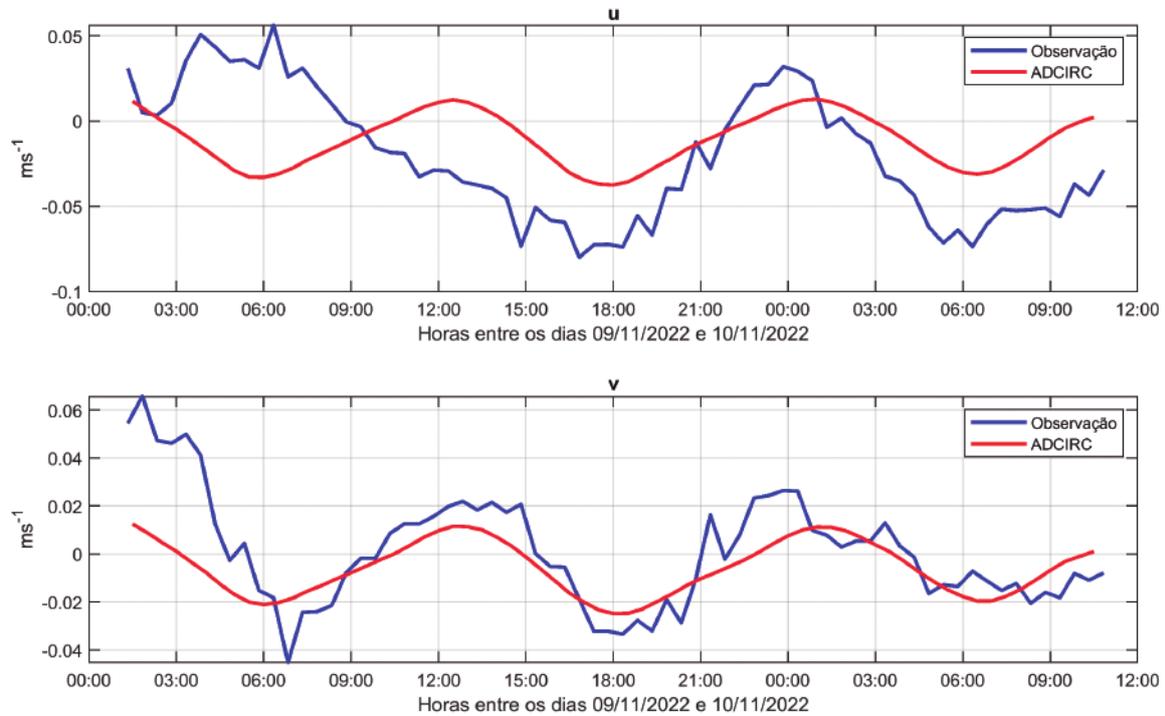


Figura 3 – Séries temporais de velocidade de corrente (cm/s) para as componentes zonal (u) e meridional (v). Dados medidos pelo Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura, em azul, e resultados simulados pelo ADCIRC, em vermelho

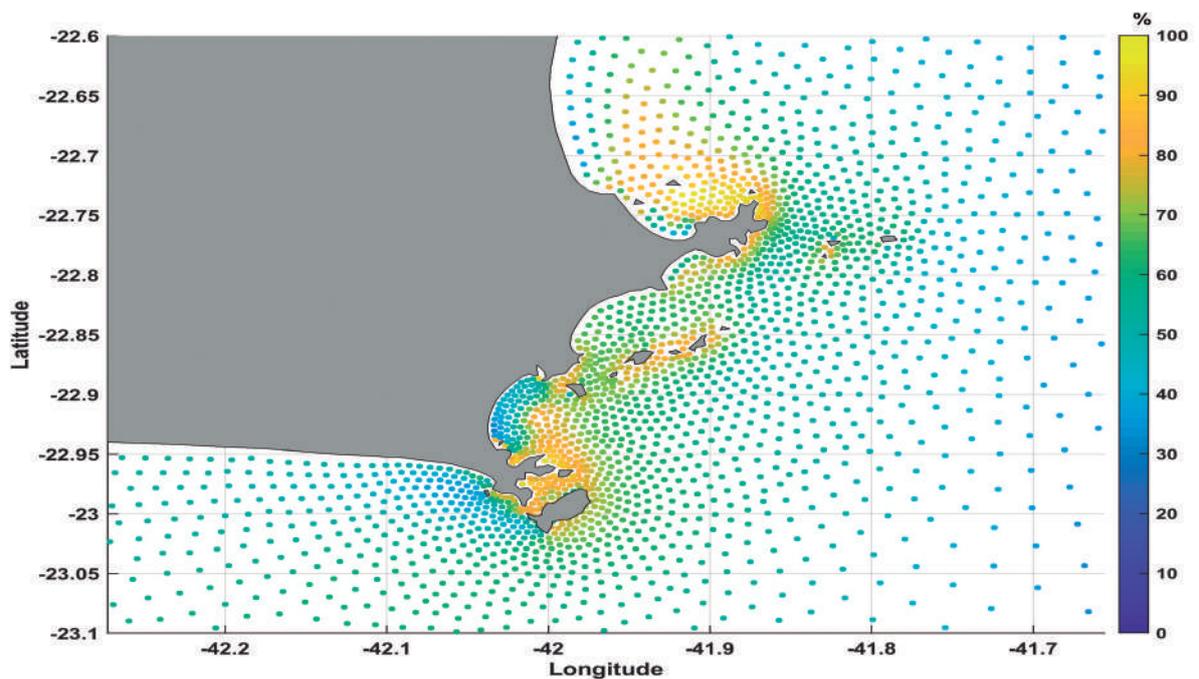


Figura 4 – Distribuição espacial da contribuição (%) da energia da corrente de maré na corrente total, calculada para cada ponto do domínio de simulação. Valores mais altos indicam as regiões onde as correntes de maré dominam a circulação



#### 4. CONCLUSÕES

Para a primeira etapa da modelagem hidrodinâmica proposta pelo STFA, a modelagem 2D demonstra que a utilização de altura da superfície livre do mar do modelo de maré FES2014 somados aos resultados de nível do modelo HYCOM-NCODA como condição de contorno é uma estratégia válida e que pode ser utilizada sem a necessidade de grandes intervenções de calibração no modelo regional. O ADCIRC foi capaz de propagar o sinal do contorno para o interior do domínio de simulação, reproduzindo de maneira satisfatória

a circulação na região de estudo, bem como o efeito da maré na dinâmica oceanográfica da região.

O passo seguinte será realizar uma modelagem 3D, uma vez que um dos objetivos do STFA é fornecer informações oceanográficas na coluna d'água para o cálculo da velocidade do som e da circulação no oceano. Nesse sentido, mesmo sendo uma região costeira, Arraial do Cabo apresenta uma forte variação espaço-temporal da estratificação vertical da coluna d'água, o que configura a região como um excelente laboratório para os testes de modelagem numérica.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, P. *Anomalies dans les temperatures de l'eau de mer observées au Cabo Frio au Brésil. Bull. Inf. Com. Oceanogr. Etude Cotes*, 7(2), 1955, p.58-63.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - Estratégia Nacional De Ciência, Tecnologia E Inovação – 2016|2022. Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estratégia Nacional de Defesa. Brasília, 2013.

CALADO, L. *et al. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22 s, Brazil). Continental Shelf Research*, 30(10-11), 2010, p.1181-1188.

CALIL ELIAS, L.M. Variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio–RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009

CAMPOS, E.J. *et al. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. Geophysical Research Letters*, 27(6), 2000, p.751-754.

CASTELAO, R.M. & BARTH, J.A. *Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. Geophysical Research Letters*, 33(3), 2006.

CASTELAO, R.M. *et al. A modelling study of coastal upwelling driven by wind and meanders of the Brazil Current. Journal of Coastal Research*, 20(3), 2004, p.662-671.



CASTRO FILHO, B.M.D. *et al.* Estrutura termohalina e circulação na região entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região Sudeste-Sul do Brasil. 2006.

COELHO-SOUZA, S.A. *et al.* Biophysical interactions in the Cabo Frio upwelling system, Southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 60, 2012, p.353-365.

EMÍLSSON, I. *The shelf and coastal waters off southern Brazil. Boletim do Instituto Oceanográfico*, 11, 1961, p.101-112.

IKEDA, Y. *et al.* Observations on stages of upwelling in the region of Cabo Frio (Brazil) as conducted by continuous surface temperature and salinity measurements. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 23, 1974, p.33-46.

KÄMPF, J. & CHAPMAN, P. *The California current upwelling system. Upwelling systems of the world: A scientific journey to the most productive Marine ecosystems*, 2016, p.97-160.

LUETTICH, R.A. *et al.* ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1, Theory and methodology of ADCIRC-2DD1 and ADCIRC-3DL. 1992.

MIRANDA, L. B. D. Forma da correlação TS de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 33, n. 2, 1985, p. 105-119.

PALÓCZY, A. *et al.* Coastal upwelling off Cape São Tomé (22 S, Brazil): The supporting role of deep ocean processes. *Continental Shelf Research*, 89, 2014, p.38-50.

PEREIRA, G.C. *et al.* Assessing the ecological status of plankton in Anjos Bay: a flow cytometry approach. *Biogeosciences Discussions*, 7(4), 2010, p.6243-6264.

PEREIRA, G.C. *et al.* Virioplankton abundance in trophic gradients of an upwelling field. *Brazilian Journal of Microbiology*, 40, 2009, p.857-865.

SIGNORINI, S.R. *On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. Deep Sea Research*, 25(5), 1978, p.481-490.

STRAMMA, L. & PETERSON, R.G. *The South Atlantic Current. Journal of Physical Oceanography*, 20(6), 1990, p.846-859.



## MATERIAL COMPLEMENTAR

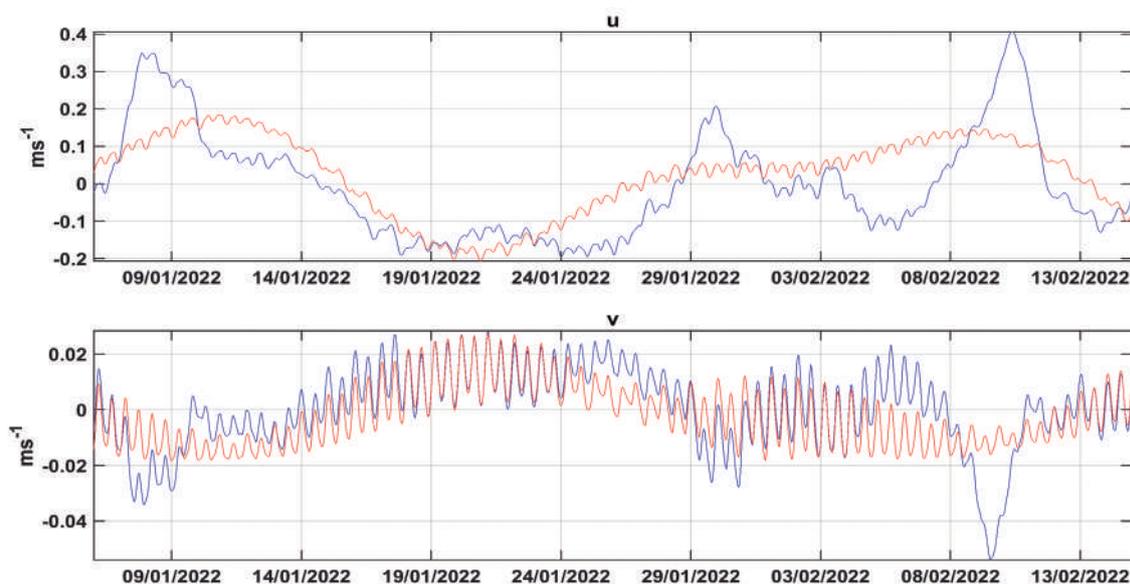


Figura S1 – Séries temporais de velocidade de corrente (cm/s) para as componentes zonal (u) e meridional (v) para um ponto onde a maré explica 53% da variância da corrente total. Dados medidos pelo Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura, em azul, e resultados simulados pelo ADCIRC, em vermelho

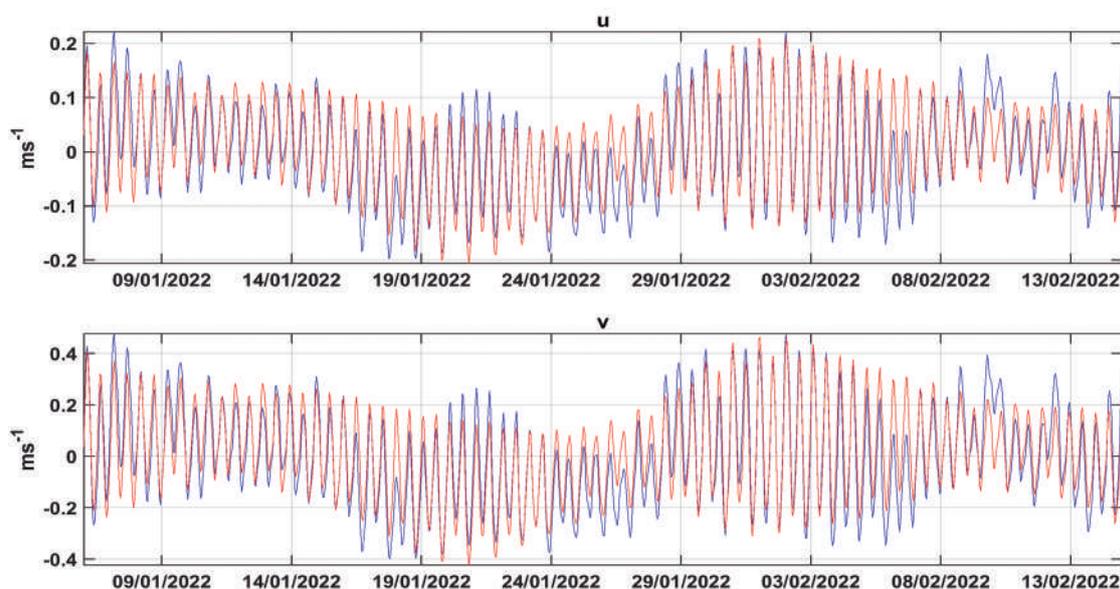


Figura S2 – Séries temporais de velocidade de corrente (cm/s) para as componentes zonal (u) e meridional (v) para um ponto onde a maré explica 90% da variância da corrente total. Dados medidos pelo Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura, em azul, e resultados simulados pelo ADCIRC, em vermelho