



MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

RAFAEL MACHADO MOTA GARCIA

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE CORRENTES OCEÂNICAS SUPERFICIAIS
DO MODELO HYCOM IMPLEMENTADO PARA A METAREA V PELO CENTRO
DE HIDROGRAFIA DA MARINHA

NITERÓI, RJ

2022

RAFAEL MACHADO MOTA GARCIA

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE CORRENTES OCEÂNICAS SUPERFICIAIS
DO MODELO HYCOM IMPLEMENTADO PARA A METAREA V PELO CENTRO
DE HIDROGRAFIA DA MARINHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao corpo docente e técnico do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino da Marinha do Brasil (CIAARA/MB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Oficial Hidrógrafo.

Orientador: 1º Ten (T) Kaio Calmon Lacerda

NITERÓI, RJ

2022

G216 Garcia, Rafael Machado Mota
Avaliação de resultados de correntes oceânicas superficiais do modelo HYCOM implementado para a METAREA V pelo Centro de Hidrografia da Marinha / Rafael Machado Mota Garcia. – Niterói, RJ, 2022.

xiii, 61 f.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Kaio Calmon Lacerda.

Monografia (Aperfeiçoamento em Hidrografia) – Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2022.

1. Oceanografia operacional. 2. Modelagem oceânica. 3. HYCOM-CHM. 4. Correntes oceânicas superficiais. 5. Avaliação de modelo. I. Lacerda, Kaio Calmon, orient. II. Título

CDD 551.46

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE CORRENTES OCEÂNICAS SUPERFICIAIS
DO MODELO HYCOM IMPLEMENTADO PARA A METAREA V PELO CENTRO
DE HIDROGRAFIA DA MARINHA

Rafael Machado Mota Garcia

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE E TÉCNICO DO CENTRO
DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO DA
MARINHA DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:



Fernando Túlio Camilo Barreto, DSc



1º Ten (RM2-T) Victor Vinicius Araujo Ferreira, MSc



1º Ten (T) Kaio Calmon Lacerda, MSc

NITERÓI, RJ. BRASIL

OUTUBRO DE 2022

A minha querida mãe Carmen Déa e ao
meu avô Dakir (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me permitir chegar até aqui e porque sem ele nada do que conquistei seria possível. Obrigado, Senhor Deus, por tudo que fizeste por mim até aqui e por ter me amparado por todo o meu caminho.

Em segundo, faltam palavras para agradecer todo o apoio dado pela minha querida mãe, Carmen Déa. Sem essa mulher forte e resiliente e todo o seu suporte incondicional, não só durante o árduo período do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais (CAHO), mas ao longo de toda a minha carreira, certamente, teria sido muito mais difícil superar todas as batalhas por que passei/passamos. Muito obrigado por procurar me compreender em todos esses anos, mas principalmente no ano de 2022, facilitando a minha vida nos aspectos em que podia e conseguia ajudar, sem medir esforços. Amo você demais. Saiba que a vitória que se traduz na entrega deste trabalho e na conclusão deste curso em muito representa fruto de seu empenho e cuidado comigo.

Ao meu orientador, 1º Ten (T) Calmon, agradeço imensamente por toda a paciência e tempo que disponibilizou para me ajudar a construir este trabalho. Agradeço também pela compreensão para comigo, face à extenuante e difícil rotina como aluno do CAHO, e pelo constante empenho em buscar o melhor para o trabalho.

Ao Centro de Instrução Almirante Radler de Aquino (CIAARA), instituição que me deu a oportunidade de atingir o status de Hidrógrafo, agradeço por todos os conhecimentos transmitidos ao longo do corrente ano. Agradeço a todo o corpo docente pelo esforço e empenho em buscar transmitir o máximo de conhecimentos que poderiam e pela paciência que tiveram para me auxiliar na trajetória do curso. Agradeço também a todos da administração do CIAARA, por prestarem o apoio necessário ao atendimento de eventuais necessidades, permitindo que nós, alunos, pudéssemos envidar nossos esforços primordialmente para o ensino e o aprendizado.

Ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), agradeço o apoio prestado, sempre que foi necessário sanar dúvidas ou buscar qualquer tipo de informação, em especial à Divisão de Previsão Numérica (CH-13) e à Divisão de Oceanografia Operacional (CH-11). Agradeço também a concessão da imagem do relevo submarino na região de estudo, cedida pelo Capitão de Fragata (RM1-T) Emir Ordacgi Caldeira do setor responsável pelo Plano de Levantamento da Plataforma Continental (LEPLAC) no CHM, por intermédio da Capitão de Fragata (RM1-EN) Flavia Mandarin.

A todos os meus colegas de turma do CAHO, obrigado pelos momentos e pelo auxílio nos momentos de dificuldades. Certamente, as dificuldades pelas quais passamos nos tornaram mais fortes e unidos do que antes. Obrigado a todos.

AVALIAÇÃO DE RESULTADOS DE CORRENTES OCEÂNICAS SUPERFICIAIS DO MODELO HYCOM IMPLEMENTADO PARA A METAREA V PELO CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA

Rafael Machado Mota Garcia

Outubro/2022

Orientador: 1º Ten (T) Kaio Calmon Lacerda

Programa: Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais

Sistemas oceanográficos operacionais vêm ganhando cada vez mais destaque no cenário internacional e nacional por monitorar, prever e divulgar informações de características do oceano. Para isso, esses sistemas fazem uso de modelos computacionais que utilizam métodos numéricos a fim de resolver a circulação oceânica. No Brasil, o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) tem implementado o modelo HYCOM-CHM, de domínio regional, compreendendo a METAREA V, um produto fruto do esforço da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO), consórcio do qual faz parte. O modelo tem uma resolução horizontal de $1/24^\circ$, correspondente a aproximadamente 4,6 quilômetros, e fornece dados de variáveis oceanográficas no campo tridimensional como velocidade das correntes, temperatura, salinidade e elevação. Dentre algumas das aplicabilidades práticas do HYCOM-CHM pode-se mencionar a utilização do campo de velocidade superficial de corrente como subsídios para planejamento de rotas de navegação, além da inserção desses dados como forçantes em modelos lagrangeanos de deriva, frequentemente utilizados em apoio a operações de Busca e Salvamento (SAR) e investigação de eventos de derramamento de óleo no mar. Em função disso, faz-se necessário realizar avaliações dos dados de velocidade das correntes superficiais calculados pelo modelo, a fim de caracterizar a sua capacidade de representar essa grandeza de forma acurada, e, assim, permitir que seus usuários conheçam as limitações de seu uso em produtos destinados a auxiliar em processos decisórios. Este trabalho teve

o objetivo geral de contribuir para a avaliação dos resultados de corrente oceânica superficial do modelo HYCOM-CHM, por meio de comparações com dados obtidos *in situ* por meio de uma boia meteoceanográfica de fundeio. Para isso, a metodologia empregada nas comparações utilizou parâmetros estatísticos e gráficos, a fim de permitir uma análise quantitativa e qualitativa dos resultados. Foram, também, obtidos resultados de modelos hidrodinâmicos globais empregados em sistemas operacionais dos Estados Unidos (HYCOM-NCODA) e da União Europeia (Mercator/CMEMS) a fim de realizar análises comparativas do desempenho do HYCOM-CHM em representar a realidade. As análises apontaram que o HYCOM-CHM apresentou resultados de magnitude da corrente condizentes com outros autores e melhor desempenho em representar essa variável no local e período de estudo em relação aos demais modelos. Durante o período de estudo, a média da magnitude da corrente medida foi de 0,619 m/s, e média calculada a partir dos dados do HYCOM-CHM foi de 0,604 m/s. O erro absoluto médio do HYCOM-CHM, calculado em 0,169 m/s, representou 27% da magnitude média da série medida, enquanto para os demais modelos tal erro representou 35% e 33%. Assim, é esperada uma melhora ao considerar os dados advindos do HYCOM-CHM, em detrimento dos modelos globais comparados, em cálculos realizados para a elaboração de subsídios e outros estudos. Além disso, foi encontrado um viés negativo para magnitude calculada a partir dos dados do HYCOM-CHM, de -0,015 m/s, o que indicou a tendência do modelo a subestimar essa variável.

Palavras-chave: oceanografia operacional; modelagem oceânica; correntes oceânicas superficiais; HYCOM-CHM; avaliação de modelo.

ASSESSMENT OF SURFACE OCEAN CURRENTS RESULTS OF THE HYCOM
MODEL IMPLEMENTED FOR METAREA V BY THE BRAZILIAN NAVY
HYDROGRAPHY CENTER (CHM)

Rafael Machado Mota Garcia

October/2022

Advisor: LTJG Kaio Calmon Lacerda

Department: Hydrography Course for Officers

Operational oceanographic systems have been gaining more and more prominence in the international and national context for monitoring, predicting and disseminating information on ocean characteristics. In order to achieve this, these systems use computational models that apply numerical methods in order to solve oceanic circulation. The Brazilian Navy Hydrography Center (CHM) has implemented the HYCOM-CHM model, with a regional domain comprising METAREA V, a result of the effort of the Oceanographic Modeling and Observation Network (REMO), consortium of which the CHM is a part of. The model has a horizontal resolution of $1/24^\circ$, corresponding to approximately 4.6 kilometers, and provides data on oceanographic variables in a three-dimensional field, such as current velocity, temperature, salinity and sea surface height. Among some of the applications of the HYCOM-CHM, there is the use of surface current velocity field as resource for planning navigation routes, as well as inputs in Lagrangian dispersion models, often used as support for Search and Rescue (SAR) operations and investigation of oil spill events at sea. Because of that, it is necessary to assess the results of surface current velocity data calculated by the model, in order to recognize its skill to represent this variable accurately, thus allowing its users to recognize the limitations of its applications in products intended to assist in decision-making processes. The main purpose of this paper to contribute towards the assessment of the surface ocean current results of the HYCOM-CHM model, through comparisons with data obtained *in situ* by

a meteoceanographic moored buoy. The methodology used statistical parameters and graphics for the comparisons, to allow a quantitative and qualitative analysis of the results. In order to achieve comparative analyses of the performance of the HYCOM-CHM in representing reality, results from global hydrodynamic models were also obtained, such as the one used in the US Navy (HYCOM-NCODA) and the one used in the European Union (Mercator/CMEMS). The analyses showed that the HYCOM-CHM presented results of magnitude of the current consistent with other authors and better performance in representing this variable in the period and place of study in relation to the other models. During the study period, the mean magnitude of the measured current was 0.619 m/s, and the mean calculated out of the HYCOM-CHM data was 0.604 m/s. The mean absolute error of the HYCOM-CHM, calculated at 0.169 m/s, represented 27% of the mean magnitude of the measured series, while for the other models this error represented 35% and 33%. Thus, a slight improvement is expected when considering HYCOM-CHM data, instead of the global models to which it was compared, in calculations carried out for the preparation of resources and other studies. Furthermore, a negative bias was found for the magnitude calculated out of the HYCOM-CHM data, of -0.015 m/s, which indicated the model's tendency to underestimate this variable.

Key words: operational oceanography; ocean modelling; surface ocean currents; HYCOM-CHM; model assessment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática da aplicação das diferentes coordenadas verticais do sistema híbrido do modelo HYCOM.....	21
Figura 2 – Área marítima sob responsabilidade do Brasil (METAREA V), compreendida pela área pintada na cor amarela.....	23
Figura 3 – Domínios utilizados no aninhamento realizado pelo CHM na implementação do modelo HYCOM para costa brasileira. As cores representam as profundidades em metros na região do domínio com grade de resolução horizontal de 1/12°. O retângulo preto delimita a área do domínio da METAREA V, com grade de resolução horizontal de 1/24°	24
Figura 4 – Desenho esquemático da boia Itaoca.....	30
Figura 5 – Mapa representando a localização da boia Itaoca	31
Figura 6 – Mapa representando os meandramentos da circulação de mesoescala da CB no sudeste brasileiro, evidenciando o Vórtice de Vitória (VV), o Vórtice de Cabo de São Tomé (VCST), o Vórtice de Cabo Frio (VCF) e a posição aproximada da boia Itaoca (triângulo vermelho). “A” significa centro de alta pressão (anticiclone), “B”, baixa pressão (ciclone)	33
Figura 7 – Mapa representando a posição da boia Itaoca, de Cabo Frio e o relevo submarino na região.....	33
Figura 8 – Gráfico de linha da série temporal dos dados brutos de magnitude da corrente oceânica superficial medida pela boia	37
Figura 9 – Gráfico de pontos da série temporal de direção da corrente oceânica superficial medida pela boia, corrigida para norte verdadeiro	37
Figura 10 – Gráfico de linha das séries temporais de magnitude da corrente oceânica superficial dos dados medidos e modelados	42
Figura 11 – Histograma direcional da corrente oceânica superficial medida a partir dos dados da boia Itaoca.....	45
Figura 12 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados dos modelos (a) HYCOM-CHM, (b) HYCOM-NCODA e (c) Mercator para as coordenadas da boia Itaoca. A escala radial está em porcentagem	46
Figura 13 – Gráfico de pontos das séries temporais de direção da corrente oceânica superficial dos dados medidos e modelados	46

Figura 14 – Mapa do campo superficial médio de correntes oceânicas calculadas a partir do modelo HYCOM-CHM para a região e período de estudo	47
Figura 15 – Gráfico de linha das séries temporais das componentes meridional v (a) e zonal u (b) da corrente oceânica superficial dos dados medidos e modelados.....	48
Figura 16 – Diagrama esquemático representando o ponto da grade do modelo HYCOM-CHM mais próximo à boia (X) e os doze pontos da grade nas proximidades selecionados (N1, N2, N3, S1, S2, S3, E1, E2, E3, W1, W2, W3), com seus respectivos EAM indicados	51
Figura 17 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos N1 (a), N2 (b) e N3 (c).....	58
Figura 18 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos S1 (a), S2 (b) e S3 (c).....	59
Figura 19 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos E1 (a), E2 (b) e E3 (c).....	60
Figura 20 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos W1 (a), W2 (b) e W3 (c).....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Médias e desvios padrões (DP) de dados de intensidade de corrente, observado e modelado, calculados por Novais (2019) para o ano de 2007.....	26
Tabela 2 – Parâmetros estatísticos calculados para a magnitude da corrente oceânica superficial relativos às séries de dados medidos, do HYCOM-CHM (H-CHM), do HYCOM-NCODA (H-NCODA) e do Mercator. Os melhores resultados encontrados foram realçados em negrito.....	43
Tabela 3 – Parâmetros estatísticos calculados para as componentes meridional (v) e zonal (u) da corrente oceânica superficial relativos às séries de dados medidos, do HYCOM-CHM (H-CHM), do HYCOM-NCODA (H-NCODA) e do Mercator. Os melhores resultados encontrados foram realçados em negrito	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	Sistemas oceanográficos operacionais	18
3.2	Modelos de Circulação Geral do Oceano.....	19
3.3	O modelo HYCOM-CHM	22
3.4	Estudos de avaliação de modelos de circulação oceânica a partir de dados medidos.....	25
4	METODOLOGIA	29
4.1	Dados medidos por boia.....	29
4.2	Caracterização da área de estudo	32
4.3	Dados dos modelos hidrodinâmicos.....	34
4.4	Processamento, seleção e compatibilização dos dados.....	36
4.5	Pós-processamento dos dados	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Análise da magnitude da corrente	42
5.2	Análise da direção da corrente.....	44
5.3	Análise das componentes meridional (v) e zonal (u) da corrente.....	48
5.4	Análise de pontos vizinhos.....	50
6	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	APÊNDICE – Histogramas direcionais dos doze pontos nas proximidades das coordenadas da boia.....	58

1 INTRODUÇÃO

Sistemas oceanográficos operacionais vêm ganhando cada vez mais destaque no cenário internacional e nacional por monitorar, prever e divulgar informações de características do oceano. Dentre essas informações, destacam-se as relacionadas à circulação hidrodinâmica como importantes dados fornecidos tanto para datas pretéritas como futuras, em previsões de curto período – menores que dez dias.

Esses dados são utilizados para aplicações diversas pelos usuários finais, como no apoio à segurança da navegação, monitoramento de poluição marinha e operações de Busca e Salvamento (em inglês, *Search and Rescue* ou SAR). Dentre as principais ferramentas que necessitam deste tipo de sistema para sua implementação, destacam-se os modelos lagrangeanos de deriva no mar de poluentes, como óleo e plástico, e de objetos relacionados a operações SAR.

Como relevante componente desses sistemas destacam-se os modelos computacionais que são empregados na solução da circulação oceânica. Tais modelos são implementados visando resolver, por meio de métodos numéricos, as equações primitivas da circulação geral oceânica, que descrevem a dinâmica dos oceanos, e por conta disso, recebem a nomenclatura de Modelos de Circulação Geral do Oceano, ou, em inglês, *Ocean General Circulation Models* (OGCM). Dessa forma, o modelo consegue realizar simulações dos campos de velocidade das correntes oceânicas, temperatura e salinidade da água do mar e elevação da superfície do mar, por exemplo.

Entretanto, ao utilizar modelos numéricos computacionais para gerar produtos aos usuários, os sistemas de previsão oceânica estão sujeitos a erros inerentes às aproximações de seus cálculos e métodos necessários para viabilizar a solução fornecida em um tempo hábil para seu uso pelos usuários. Cita-se, como exemplo, a limitação da resolução espacial decorrente do processo de discretização espacial do domínio simulado em grades de resoluções que podem variar de centenas de metros a alguns quilômetros.

Diante das aproximações necessárias à implementação deste tipo de modelo, surge a necessidade de realizar avaliações de seus resultados, a fim de estimar as incertezas das informações fornecidas por eles. Para isso, são utilizados dados medidos remotamente, por equipamentos a bordo de plataformas orbitais, ou, de forma direta, por equipamentos lançados no mar, como é o caso de medição de correntes e outros parâmetros oceânicos por meio de boias oceanográficas, nas quais eles são instalados. Isso permite que os

usuários conheçam as limitações decorrentes dos dados fornecidos pelos modelos, ao aplicá-los em produtos destinados a auxiliar em processos decisórios.

Ao longo dos anos, com o crescente aumento da capacidade computacional, desde a criação do primeiro OGCM, aliado à melhoria na compreensão dos processos físicos e à evolução de métodos numéricos (FRAGOSO, 2004; LIMA, 2013) foi possível desenvolver métodos cada vez mais robustos, que pudessem ser aplicáveis a diferentes regiões, apesar de possuírem características distintas. É nesse contexto que está inserido o *Hybrid Circulation Ocean Model* – HYCOM (BLECK, 2002), cujo diferencial mais expressivo em relação a outros modelos oceânicos é o uso de um sistema híbrido de coordenadas verticais (PAIVA, 2019), que traz consigo uma maior flexibilidade para o uso em diferentes regiões do oceano.

No que se refere ao Brasil, é natural que, por ser um país marítimo, haja uma alta demanda por previsões oceânicas em sua área marítima adjacente. Além disso, o Serviço Meteorológico Marinho (SMM) prevê que sejam produzidas análises e previsões meteoceanográficas na área marítima sob responsabilidade do Brasil, denominada METAREA V, com o intuito de prover informações de segurança marítima (BRASIL, 2018). Ademais, em 2007, foi criada a Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO), um grupo de pesquisas e desenvolvimento científico e tecnológico em oceanografia, formada, atualmente, por universidades, pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e pela Petrobras (LOF, 2022).

No âmbito da REMO, foi implementada uma versão do modelo HYCOM, que integra o atual sistema de previsão do CHM, o HYCOM-CHM, e uma base hidrodinâmica para a região da METAREA V, que se encontram em constante aprimoramento nas configurações e metodologias utilizadas na implementação na área de interesse. Dentre algumas das aplicabilidades práticas do HYCOM-CHM pode-se mencionar a utilização dos campos de velocidade superficial de corrente como subsídios para planejamento de rotas de navegação, além da inserção desses dados como forçantes em modelos lagrangeanos de deriva no mar. Em função disso, ressalta-se a relevância de realizar avaliações dos dados de velocidade das correntes superficiais calculados pelo modelo, a fim de caracterizar a sua capacidade de representar essa grandeza de forma acurada.

Neste trabalho, com o intuito de avaliar a qualidade dos dados de circulação em superfície obtidos por meio do HYCOM-CHM, os resultados do modelo foram comparados com dados de corrente superficial medidos por uma boia meteoceanográfica

fundeada na METAREA V, a Boia Itaoca, do Programa Nacional de Boias (PNBOIA). Uma métrica frequentemente utilizada para realizar essa avaliação consiste no cálculo de alguns parâmetros estatísticos e na elaboração de gráficos, como realizado por Costa (2016), Fragoso *et al.* (2016), Metzger *et al.* (2010), Metzger *et al.* (2017) e Novais (2019).

Assim, visando avaliar o desempenho de corrente superficial do HYCOM-CHM, foram utilizados parâmetros estatísticos de modo a possibilitar uma análise quantitativa do modelo e permitir eventuais comparações por outros autores, seja com o próprio modelo em outros locais, ou com outros modelos. Além disso, foram elaborados gráficos de séries temporais dos dados obtidos e histogramas direcionais a fim de permitir uma verificação qualitativa, de forma visual, do resultado do modelo.

Ademais, com o intuito de comparar o desempenho do HYCOM-CHM em representar a realidade com o de outros modelos, foram obtidos, também, dados do sistema operacional GOFS (*Global Ocean Forecasting System*), que utiliza o HYCOM-NCODA, e do produto europeu GLORYS12V1 do serviço CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*) da organização *Mercator Ocean International*.

Este trabalho está estruturado em seis seções, da seguinte maneira: a seção 1 teve o propósito de introduzir a temática e apresentar a justificativa para a escolha do tema; a seção 2 expõe o objetivo geral e os específicos a que esse trabalho se propõe atingir; a seção 3 discorre sobre a revisão bibliográfica utilizada como referência para a pesquisa; a seção 4, evidencia a metodologia empregada para a consecução dos objetivos; a seção 5 descreve os resultados obtidos e discute-os à luz da bibliografia revisada e; a seção 6 condensa as conclusões alcançadas a partir dos resultados.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral contribuir para a validação do modelo HYCOM implementado para a METAREA V pelo CHM, por meio da avaliação dos seus resultados de corrente oceânica superficial em comparação com dados medidos.

O enfoque em tal dado decorre de seu frequente uso e relevância em subsídios para operações de Busca e Salvamento (SAR), de contenção e identificação de trajetórias em eventos de derramamento de óleo e no planejamento de derrotas de navegação na região oceânica adjacente à costa brasileira.

Para atingir esse objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o desempenho do modelo HYCOM-CHM por meio da comparação dos seus resultados de correntes oceânicas superficiais com dados medidos na METAREA V;
- b) Avaliar o desempenho de modelos hidrodinâmicos globais por meio da comparação dos seus resultados com os mesmos dados medidos utilizados na avaliação do HYCOM-CHM;
- c) Analisar o desempenho do HYCOM-CHM em relação ao desempenho obtido para os modelos globais avaliados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente seção visa contextualizar o assunto que será abordado no trabalho e está estruturada da maneira descrita a seguir. Inicialmente, na subseção 3.1, serão apresentados os conceitos de oceanografia operacional e de sistemas oceanográficos operacionais. Em seguida, na subseção 3.2, será exposto um panorama geral sobre o que são Modelos de Circulação Geral do Oceano e quais são as características principais do modelo HYCOM. Posteriormente, na subseção 3.3, serão indicadas algumas particularidades do modelo HYCOM-CHM, desenvolvido pela REMO. E, por fim, na subseção 3.4, serão abordados alguns estudos de outros autores referentes a avaliação de modelos de circulação oceânica a partir de dados medidos, para uso como referência na discussão.

3.1 Sistemas oceanográficos operacionais

Desde o fim da década de 1990, a oceanografia operacional tem ganhado cada vez mais relevância no cenário internacional (FLEMMING, 2002 apud FRAGOSO, 2004). Isso se deve ao reconhecimento cada vez maior da importância da divulgação de informações sobre condições hidrodinâmicas do oceano e de estado do mar para diversas aplicações práticas, como, por exemplo, na previsão de deriva superficial em operações de Busca e Salvamento e em contenção de derramamento de óleo no mar, além do planejamento de rotas de navegação.

A oceanografia operacional pode ser caracterizada pelo fornecimento rotineiro de informações científicas e de previsões sobre o estado do oceano com a rapidez suficiente para que os seus usuários sejam capazes de utilizá-las no processo decisório antes de que as condições tenham se alterado significativamente, ou, até mesmo, se tornado imprevisíveis (DAVIDSON *et al.*, 2019; FLEMMING, 2002 apud FRAGOSO, 2004).

Nesse sentido, podem ser destacados quatro componentes básicos e interdependentes de um sistema oceanográfico operacional: (1) uma rede de monitoramento do oceano, por meio de coleta de dados *in situ* e por sensores remotos, (2) um sistema de gerenciamento de dados para distribuição adequada destes ao sistema operacional, (3) um sistema de previsão oceânica que seja capaz de assimilar dados e fornecer tanto diagnósticos como previsões do oceano e, por fim, (4) um sistema

operacional de pós processamento e armazenamento de dados e disponibilização para o usuário final, por meio, por exemplo, da *internet* ou outra forma de disseminação dos dados e informações produzidas (DAVIDSON *et al.*, 2019; FRAGOSO, 2004).

No que se refere ao sistema de previsão oceânica, é possível, ainda, caracterizá-lo como uma combinação de três elementos principais a fim de estimar o estado do oceano: uma modelagem numérica computacional que represente de forma fidedigna a circulação oceânica, um sistema de observação de dados, tal qual foi caracterizado acima ao abordar sistemas oceanográficos operacionais, e o uso de técnicas de assimilação desses dados a fim de contribuir para a melhor representatividade do modelo (BUENO *et al.*, 2022; DAVIDSON *et al.*, 2019; FRAGOSO, 2004).

É importante salientar que os dados observados desempenham papel relevante, não apenas no que concerne a assimilação de dados, mas também para avaliar a qualidade do sistema (DAVIDSON *et al.*, 2019). No entanto, há grande dificuldade em obter esses dados *in situ*, tendo em vista os elevados custos de aquisição, operação e manutenção de equipamentos necessários a esse fim, como boias de fundeio e de deriva, o que possui desafios adicionais no contexto nacional, conforme discutido por Franz *et al.* (2021).

Assim, ainda na atualidade, observa-se uma escassez de dados oceanográficos medidos na região costeira brasileira e região oceânica adjacente (FRANZ *et al.*, 2021). Como fontes de informações oceanográficas *in situ*, destacam-se o Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta), voltado para as observações costeiras, o projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) com enfoque na região oceânica e o Programa Nacional de Boias (PNBOIA), que dispõe de dados provenientes tanto de boias de fundeio na METAREA V e na região Antártica, quanto de boias de deriva.

3.2 Modelos de Circulação Geral do Oceano

Como mencionado no item anterior, um dos importantes componentes de um sistema de previsão oceânica é o modelo numérico computacional. Desde a década de 1960 (SEMTNER, 1995), são realizados esforços no sentido do desenvolvimento de modelos que pudessem representar as propriedades de interesse do oceano, como temperatura e salinidade da água do mar e velocidade das correntes.

Essa necessidade surgiu no âmbito da Agência de Oceanografia e Meteorologia dos Estados Unidos, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), quando, em 1960, o meteorologista Joseph Smagorinsky constatou duas questões importantes na sua esfera de estudo. A primeira estaria relacionada ao fato de as técnicas envolvidas em modelagem atmosférica serem aplicáveis à oceânica, apesar de a estrutura teórica desta ainda apresentar deficiências quando comparada àquela. E a segunda, estaria relacionada a constatação de que as propriedades climáticas não poderiam ser entendidas sem um estudo maior das interações oceano-atmosfera (SMAGORINSKY, 1983).

Assim, surgiu a motivação para um estudo mais aprofundado do oceano e, nove anos após a constatação de Smagorinsky, Kirk Bryan e Michael Cox desenvolveram o primeiro modelo numérico oceânico no âmbito do Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Geofísicos (em inglês, *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* ou GFDL; BRYAN, 1969). O modelo resolvia as equações diferenciais governantes do movimento utilizando métodos matemáticos numéricos, obtendo solução para variáveis como componentes horizontais da velocidade da corrente, temperatura e salinidade (SEMTNER, 1995).

Após diversos aprimoramentos, o modelo de Bryan e de Cox se tornou o “modelo GFDL”, que utilizava a coordenada vertical do tipo z, ou geopotencial, para representar as camadas do oceano (LIMA *et al.*, 2013). Com o passar dos anos, seu desenvolvimento contínuo deu origem ao *Modular Ocean Model* (MOM), atualmente em sua sexta versão (MOM6), de acordo com GFDL (2022).

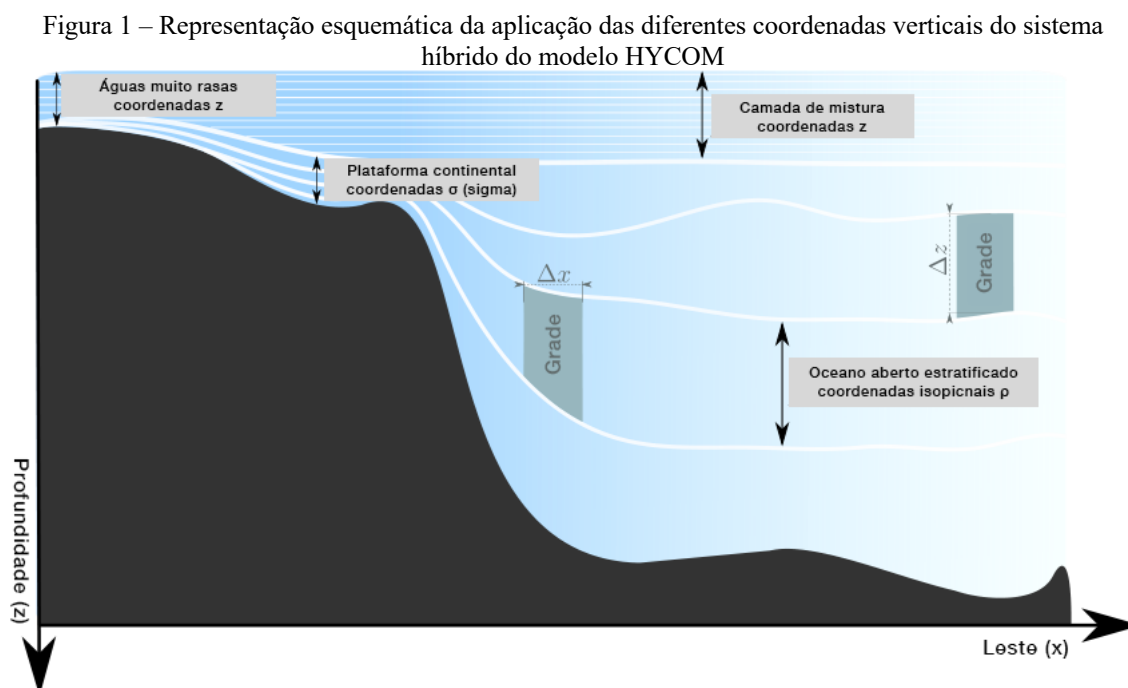
Dessa forma, tem início o desenvolvimento dos chamados Modelos de Circulação Geral do Oceano, ou, em inglês, *Ocean General Circulation Models* – OGCM (LIMA, 2013) – que podem ser utilizados tanto para fornecer análises do estado presente do oceano, indicando o diagnóstico em determinado momento, quanto para simulações futuras, de modo a prever o seu comportamento, apresentando prognósticos (DAVIDSON, 2019).

Os OGCM são modelos numéricos que calculam previsões da evolução dos campos de velocidades horizontais e verticais, temperatura e salinidade da água globalmente ao longo de toda a profundidade do oceano (campo tridimensional). A circulação geral oceânica é definida por McWilliams (1996) como as correntes no espaço horizontal em escalas temporais e espaciais maiores que as de mesoescala (da ordem de 100 km e 3 meses) e os campos associados de pressão, densidade, temperatura e salinidade, somados a todos os outros elementos envolvidos no estabelecimento do

balanço dinâmico desses campos. Isso inclui os campos das forçantes, a geometria do domínio e o transporte resultante das contribuições de correntes em meso e microescala.

Pode-se dizer que o aumento crescente da capacidade computacional, aliado a melhoria na compreensão dos processos físicos e à evolução de métodos numéricos (FRAGOSO, 2004; LIMA, 2013) vem permitindo cada vez mais a criação e o desenvolvimento de modelos computacionais de maior robustez. É nesse contexto que está inserido o *Hybrid Circulation Ocean Model* – HYCOM (BLECK, 2002), cujo diferencial mais significativo em relação a outros modelos oceânicos é o uso de um sistema híbrido de coordenadas verticais (PAIVA, 2019).

Ao resolver as equações primitivas do movimento, o modelo HYCOM utiliza simultaneamente três tipos de coordenadas para realizar a discretização vertical do oceano e promove uma transição automática entre elas (PAIVA, 2019), a fim de conservar as vantagens de cada uma e obter resultados mais realistas nas simulações. Para isso, o modelo faz uso de coordenadas isopícnais, cuja referência é a densidade potencial, coordenadas sigma (ou “seguidoras-de-terreno”) e coordenadas “z” (ou geopotenciais), de forma a aproveitar as características e benefícios que cada uma possui nas diferentes condições hidrodinâmicas e de relevo do leito marinho (FRAGOSO, 2004), como representado na Figura 1.



Fonte: Adaptado de Castaldi (2018).

O uso inteligente dos diferentes sistemas de coordenadas confere versatilidade ao modelo, de modo que ele seja aplicável de forma eficaz não somente na região oceânica, mas também próximo à costa e em regiões de plataforma continental. Assim, no interior do oceano e regiões bastante estratificadas, o HYCOM considera as coordenadas isopícnais, passando de forma suave para as coordenadas sigma (σ) em regiões costeiras e de plataforma, e utilizando as coordenadas “z” na camada de mistura e/ou regiões de baixa estratificação (PAIVA, 2019).

Para efetuar seus cálculos, o modelo utiliza o método numérico de diferenças finitas (BLECK, 2002), a partir das forçantes de entrada, e encontra soluções para variáveis oceanográficas, como temperatura e salinidade da água do mar, velocidade das correntes e elevação da superfície do mar em cada ponto de sua grade.

3.3 O modelo HYCOM-CHM

O Brasil possui uma área marítima sob sua jurisdição de aproximadamente 5,7 milhões de quilômetros quadrados referentes à área da Amazônia Azul, segundo informações do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira, o LEPLAC (CIRM, 2022). Por conta disso, é natural que haja uma alta demanda por um sistema de previsão oceânico eficiente em sua área marítima adjacente.

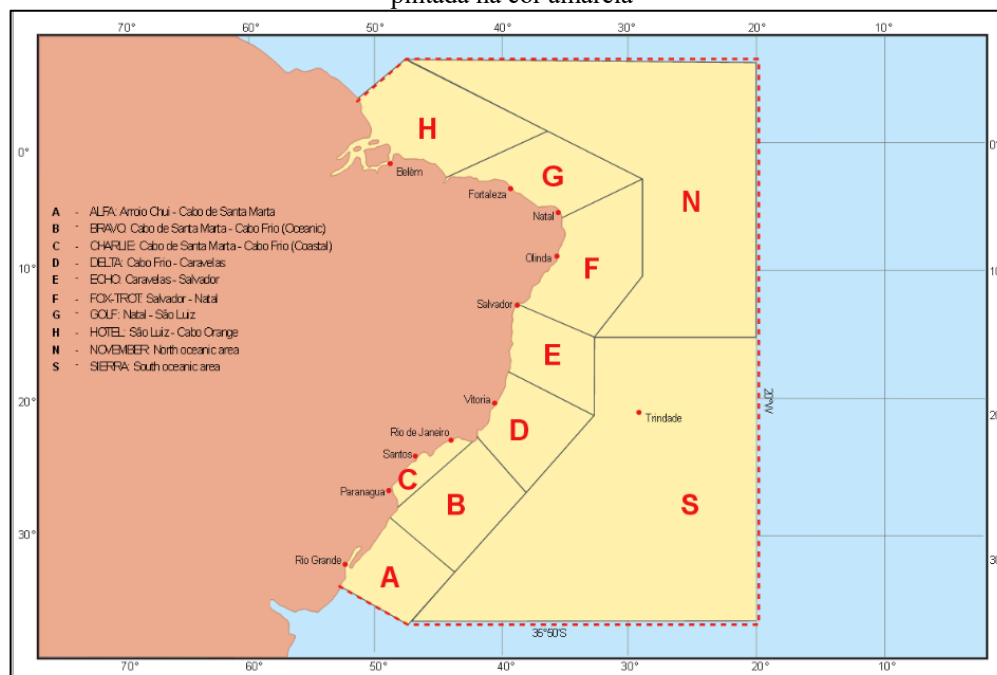
De acordo com o Decreto nº 70.092, de 2 de fevereiro de 1972 (BRASIL, 1972), a Marinha do Brasil (MB) possui a responsabilidade de exercer supervisão, orientação, pesquisa e desenvolvimento das atividades concernentes à meteorologia marítima. Nesse sentido, e, em decorrência do compromisso internacional assumido pelo Brasil na Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS 1974/1988), a MB instituiu por meio da NORMAM-19/DHN (BRASIL, 2018) o chamado Serviço Meteorológico Marinho (SMM).

De acordo com a NORMAM-19/DHN (BRASIL, 2018), o SMM envolve a aquisição de dados e a produção de análises e previsões não apenas meteorológicas, como também oceanográficas, com o intuito de prover informações de segurança marítima na área sob responsabilidade do Brasil – METAREA V (Figura 2) – contribuindo, assim, para a salvaguarda da vida humana no mar e para a segurança da navegação.

Em 2007, foi criada a Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica, REMO (FRANZ *et al.*, 2021), um esforço brasileiro multi-institucional em oceanografia física e

oceanografia operacional. O seu objetivo geral é o desenvolvimento de ciência e tecnologia em oceanografia física, modelagem oceânica, oceanografia observacional e oceanografia operacional com assimilação de dados, visando atender pesquisas em processos oceanográficos, demandas da Marinha do Brasil e da indústria de óleo e gás (PEREIRA *et al.*, 2019; REMO, 2022).

Figura 2 – Área marítima sob responsabilidade do Brasil (METAREA V), compreendida pela área pintada na cor amarela



Fonte: BRASIL (2018).

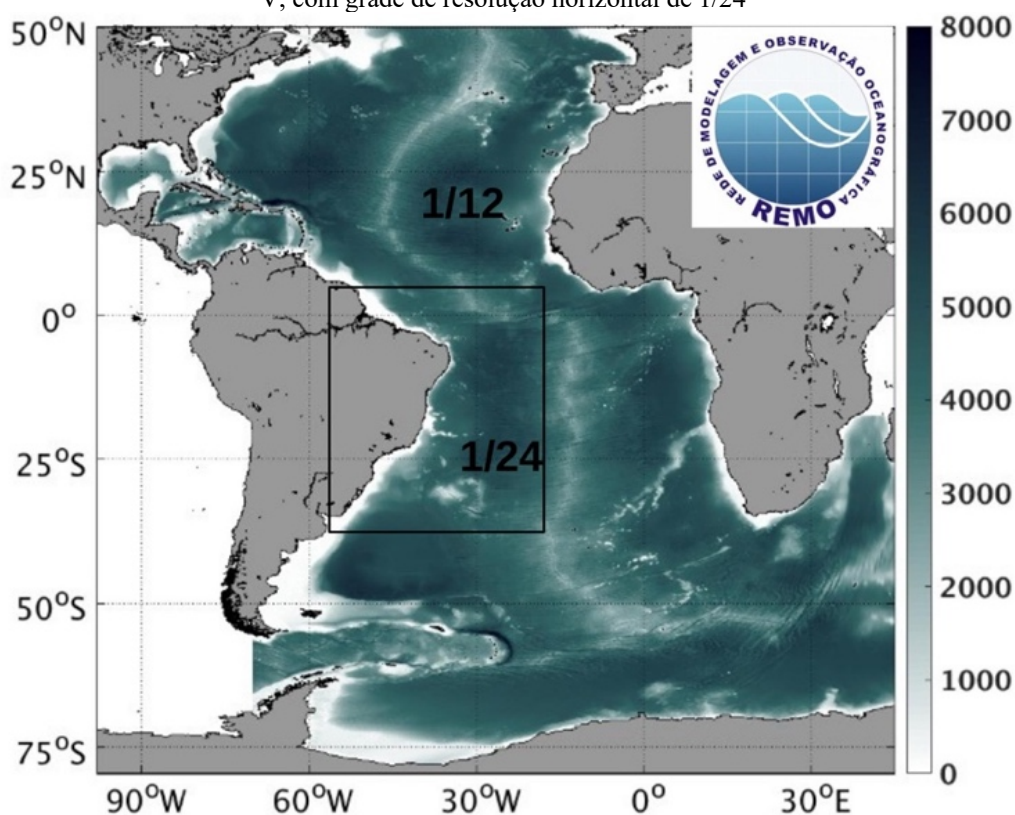
Atualmente, o consórcio REMO é formado por universidades, representadas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), pela Marinha do Brasil (MB), representada pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e pela Petrobras, sob a forma do Centro de Pesquisas, Desenvolvimento e Inovação Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/Petrobras), de acordo com o sítio eletrônico do Laboratório de Oceanografia Física (LOF) da UFRJ (LOF, 2022).

Dentre as tarefas que a REMO se propõe a executar, encontram-se atividades de modelagem oceânica, contexto no qual foi implementada uma versão do HYCOM para a região oceânica adjacente ao Brasil, especificamente para a METAREA V. Destaca-se que o modelo passa por constantes aprimoramentos de suas configurações e das metodologias utilizadas na sua implementação no âmbito da REMO.

Apesar do esforço conjunto entre as instituições envolvidas, destaca-se que cada uma delas possui um sistema próprio para as simulações realizadas a partir do modelo HYCOM, podendo diferir com relação a algumas metodologias e configurações utilizadas, com vistas a atender às suas necessidades e demandas específicas.

A versão mais recente do modelo utilizada para as previsões diárias do CHM, o HYCOM-CHM, dispõe de um domínio regional cobrindo a METAREA V (Figura 3) com resolução horizontal de $1/24^\circ$, correspondente a aproximadamente $0,04^\circ$ ou 4,6 quilômetros. Este domínio regional está aninhado a um domínio de maior extensão e menor resolução espacial, com grade de resolução horizontal de $1/12^\circ$, que compreende toda a bacia do Oceano Atlântico e fornece as condições iniciais e de contorno necessárias à resolução das equações do domínio regional. Ambas as grades possuem resolução vertical discretizada em 32 níveis híbridos. Neste trabalho o termo HYCOM-CHM será utilizado para se referir ao modelo de maior resolução.

Figura 3 – Domínios utilizados no aninhamento realizado pelo CHM na implementação do modelo HYCOM para costa brasileira. As cores representam as profundidades em metros na região do domínio com grade de resolução horizontal de $1/12^\circ$. O retângulo preto delimita a área do domínio da METAREA V, com grade de resolução horizontal de $1/24^\circ$



Fonte: Retirado de Franz *et al.* (2021).

3.4 Estudos de avaliação de modelos de circulação oceânica a partir de dados medidos

Os dados de previsão e de análise dos modelos de circulação oceânica que compõem sistemas oceanográficos operacionais são importantes para diversas atividades para as quais são empregados. Dentre essas atividades, destacam-se: a antecipação de eventos extremos, como eventos de inundação costeira; previsão da trajetória de poluentes lançados nos oceanos, como vazamentos de óleo e plástico no mar; e operações de Busca e Salvamento (SAR).

Além disso, os modelos globais e regionais são frequentemente utilizados no processo de aninhamento de grades com modelos de maior resolução, que buscam melhorar as previsões fornecidas para as regiões costeiras (FRANZ *et al.*, 2021). Nesse sentido, Franz *et al.* (2021) ressalta a importância da disponibilidade, de forma pública e sistemática, de informações em tempo real sobre os oceanos em diferentes escalas – global, regional e costeira – para o desenvolvimento econômico sustentável.

Para que possam ser estimadas a acurácia e confiabilidade dos dados dos modelos para as necessidades específicas de cada usuário, os resultados de modelos podem ser comparados com dados medidos (DAVIDSON *et al.*, 2019), obtidos por meio de boias de fundeio ou de deriva, *gliders*, radares, satélites, dentre outros métodos. Para avaliar o desempenho de modelos, por meio dessas comparações uma metodologia frequentemente empregada se baseia no uso de determinados parâmetros estatísticos e em representações gráficas.

Novais (2019) comparou dados de corrente da Bacia de Campos extraídos da base hidrodinâmica da região sul-sudeste do Brasil para o ano de 2007 com observações oceânicas medidas por uma boia de fundeio da Petrobras, em um local específico, a sudeste do Cabo de São Tomé, utilizando como referência a profundidade de 39 metros.

A fim de realizar a comparação, foram utilizados os parâmetros estatísticos média e desvio padrão (DP) da magnitude da corrente (I) e de suas componentes meridional (v) e zonal (u). Para comparar as direções, foram utilizados histogramas direcionais, a fim de representar a distribuição de frequências das velocidades.

Os resultados obtidos para intensidade foram considerados satisfatórios – parâmetros calculados apresentados na Tabela 1 – e, também para direção, observando-se a direção sudeste como predominante para a área e coerência com a série gerada pelo

modelo, o que permitiu que pudesse prosseguir com o seu estudo, ao atestar a acurácia do modelo.

Tabela 1 – Médias e desvios padrões (DP) de dados de intensidade de corrente, observado e modelado, calculados por Novais (2019) para o ano de 2007

	v (m/s)		u (m/s)		I (m/s)	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Observado	-0,19	0,19	-0,18	0,16	0,32	0,16
Modelo	-0,17	0,20	-0,17	0,12	0,30	0,16

Fonte: Novais (2019).

Similarmente, Costa (2016) também realizou análises comparativas pontuais entre dados de correntes fornecidos pela Petrobras e o modelo HYCOM, com o diferencial de realizar a comparação para cinco pontos diferentes, sendo quatro na Bacia de Campos e um na Bacia de Santos, realizadas para as profundidades de 45 m, 39 m, 15 m, 25 m e 6 m.

Como o objetivo de analisar a influência da assimilação de dados altimétricos, Costa (2016) realizou diferentes experimentos, empregando a mesma metodologia de Novais (2019) para comparar direções, com o uso de histogramas direcionais. No entanto, em relação à magnitude, a comparação foi feita apenas de forma gráfica, sem o uso de parâmetros estatísticos, o que dificultou uma mensuração quantitativa da acurácia do modelo, restringindo-se a uma abordagem qualitativa e visual.

Com o objetivo de avaliar o desempenho da versão 3.0 do sistema de simulação *Global Ocean Forecast System* (GOFS), composto pelo modelo HYCOM e pelo sistema *Navy Coupled Ocean Data Assimilation* (NCODA), em relação à versão anterior (2.6), Metzger *et al.* (2010) apresentaram uma comparação dos resultados de ambas as versões com dados medidos por *gliders* com trajetória iniciando na costa leste dos Estados Unidos e se deslocando para leste ao longo da Corrente do Golfo.

Dentre as avaliações realizadas, foram efetuadas comparações entre dados de corrente calculados pelo modelo e dados medidos *in situ* para os primeiros 150 m de profundidade, além de comparações análogas para dados de temperatura e altura da superfície do mar.

Metzger *et al.* (2010) utilizaram uma interpolação pelo método do “vizinho mais próximo”, para realizar a adequação dos dados do modelo às coordenadas dos dados medidos. Para as comparações das correntes foram utilizados os parâmetros estatísticos viés (*bias*) e raiz do erro quadrático médio (*root mean square error* – RMSE) para a magnitude da corrente. A partir desses parâmetros, os autores puderam identificar melhorias nos resultados obtidos com a nova versão implementada, obtendo valores de viés de 0,027 m/s e -0,042 m/s e de RMSE de 0,288 m/s e 0,298 m/s. Dentre os resultados discutidos pelos autores, destaca-se que os melhores foram obtidos em regiões em que as correntes apresentaram maiores velocidades, apesar de haver exceções.

Posteriormente, Metzger *et al.* (2017) efetuaram a validação da versão 3.1 do GOFs, comparando-a com os resultados obtidos na versão 3.0. Desta vez, fizeram uso de boias de deriva, que efetuavam medições de velocidade a 15 m de profundidade. Foram extraídos dados de velocidade do modelo global para a mesma profundidade que foi medida, e os resultados obtidos foram de, aproximadamente, zero para o viés e de, aproximadamente, 0,16 m/s para o RMSE.

Estudos análogos a partir de boias de deriva, foram realizados por Fragoso *et al.* (2016). Os autores buscaram avaliar a eficiência da assimilação de dados no modelo *Regional Ocean Modeling System* (ROMS) para a Baía de Santos ao realizar comparações entre os dados de modelo e dados de derivadores para a intensidade da corrente superficial. Foram utilizados os parâmetros estatísticos viés e RMSE, e gráficos das séries temporais sobrepostas. Adicionalmente, destaca-se o uso do coeficiente de correlação de Pearson como métrica de avaliação dos dados modelados de temperatura superficial e elevação da superfície do mar.

Apesar de alguns autores, como Costa (2016) e Fragoso *et al.* (2016) realizarem comparações dos dados de velocidade, o controle de qualidade durante a implementação dos modelos é frequentemente realizado com base em outras variáveis, como temperatura, elevação da superfície do mar e salinidade. Tal fato pode ser observado no próprio trabalho de Fragoso *et al.* (2016) e em outros, como Bortoli (2021) e Costa (2010). Isso pode ser associado a uma maior disponibilidade de dados medidos dessas variáveis.

Entretanto, nota-se que não só os métodos de verificação dessas diferentes variáveis são semelhantes, como também há algumas similaridades nos padrões obtidos nos seus resultados, além de serem evidenciados seus potenciais e limitações. Sendo

assim, esses trabalhos também podem contribuir para o entendimento e discussão de resultados obtidos nas avaliações dos dados de correntes.

É importante destacar que ao avaliar modelos por meio de comparações diretas e de forma pontual com dados medidos, há limitações típicas e conhecidas que podem ocorrer, inerentes a esse tipo de abordagem, como por exemplo a ocorrência de uma penalização dupla (*double penalty*), conforme descrito por Gilleland *et al.* (2009) em seus estudos de modelagem atmosférica. Isso quer dizer que uma determinada variável pode estar corretamente modelada, porém deslocada espacialmente em relação ao dado observado e, assim, segundo os autores, a modelagem pode ser penalizada, primeiro por não representar o dado medido e, em segundo, por fornecer um alarme falso.

Nesse contexto, Davidson *et al.* (2019) ressaltam a necessidade de desenvolvimento de métodos mais sofisticados para esse tipo de estudo local, assim como discutido em trabalhos de previsão atmosférica por autores como Gilleland *et al.* (2009) e Tustison, Foufoula-Georgiou e Harris (2002).

4 METODOLOGIA

A simulação de correntes oceânicas no CHM é realizada com modelo HYCOM configurado pela equipe REMO para a costa brasileira e executado operacionalmente nos servidores do CHM (HYCOM-CHM). Esse modelo se encontra operacional desde 2010 e vem sendo desenvolvido e atualizado continuamente pela equipe REMO (FRANZ *et al.*, 2021).

As correntes superficiais do modelo HYCOM-CHM, da grade de maior resolução espacial ($1/24^\circ$), foram avaliadas através da comparação com dados medidos *in situ* por meio de uma boia meteoceanográfica de fundeio. Os dados medidos foram obtidos por meio do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), que é coordenado pelo CHM. O critério para seleção da boia, bem como as demais etapas da metodologia estão descritos nesta seção.

A avaliação foi realizada por meio da extração dos dados do modelo HYCOM-CHM para as coordenadas de referência da boia e da comparação com os dados medidos, para um mesmo intervalo de tempo, por meio de parâmetros estatísticos e representações gráficas das séries temporais de cada dado.

Para o processamento dos dados, cálculo dos parâmetros estatísticos e elaboração dos gráficos foram utilizados o *software* Microsoft Excel e a linguagem de programação Python, cujas planilhas e *scripts* foram elaborados como parte do trabalho.

Ademais, a fim de permitir uma análise comparativa do desempenho do modelo HYCOM-CHM, foram obtidos, também, dados de dois outros modelos hidrodinâmicos e aplicada a mesma metodologia ao estudo destes.

4.1 Dados medidos por boia

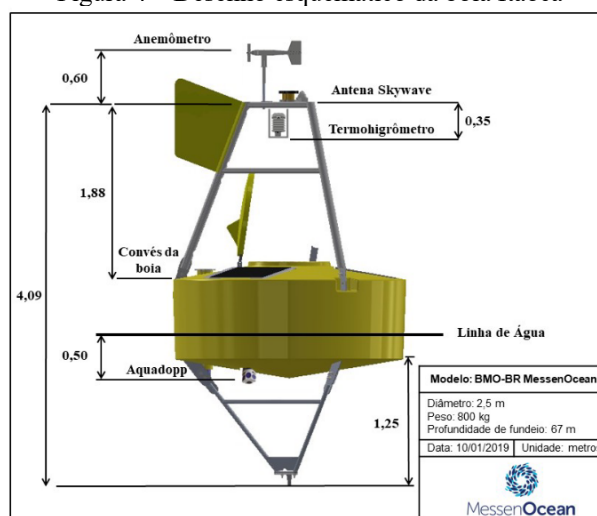
Como fonte de dados oceânicos observacionais a costa brasileira dispõe de boias de deriva e de fundeio integrantes do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), cujo objetivo geral é disponibilizar, quase em tempo real, dados meteorológicos e oceanográficos obtidos nas áreas oceânicas de interesse do Brasil para toda a comunidade de entes interessados. O programa se encontra sob a coordenação do CHM desde 1999 (GOOS, c2022).

O CHM disponibiliza em seu sítio eletrônico (CHM, 2022b) informações e dados de dezoito boias do PNBOIA fundeadas na região da METAREA V, sendo que destas, apenas dezesseis possuíam dados de corrente superficial. Para a realização deste estudo, e, tendo em vista o objetivo de avaliar as correntes superficiais, foi necessário selecionar dados coletados no período correspondente ao que se dispunha de dados da versão mais recente da grade 1/24° do modelo HYCOM-CHM. Sendo assim, das dezesseis boias mencionadas, apenas nove possuíam dados disponíveis a partir de 1° de dezembro de 2017.

Entretanto, dentre essas nove boias, apenas a boia Itaoca dispunha de dados de corrente para profundidade menor que 5 m. Tal fato permitiu que se pudesse avaliar melhor os dados de corrente superficial do modelo, que são os mais frequentemente utilizados em subsídios a operações SAR, de contenção de derramamento de óleo no mar e em planejamentos de rotas de navegação.

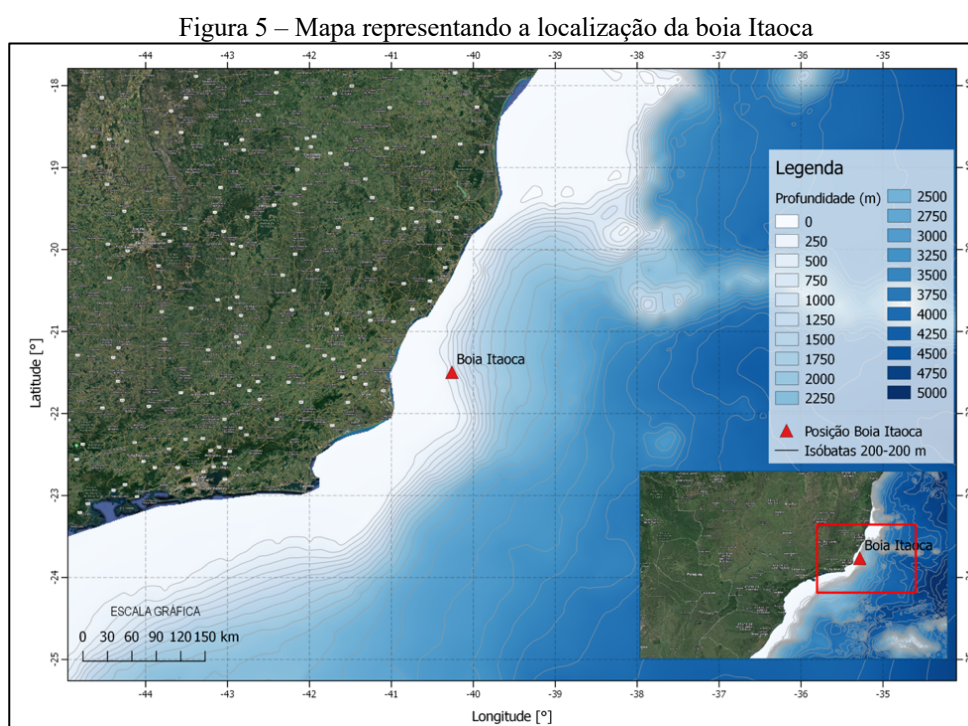
A boia Itaoca foi uma boia do modelo BMO-BR (Boia Meteorológica Nacional) *MessenOcean*, fruto de um projeto de parceria entre a empresa *MessenOcean* e o CHM (CHM, 2022a), e o desenvolvimento desse tipo de modelo de boias é brevemente descrito por Franz *et al.* (2021). Ela possuía um correntômetro pontual, modelo *Aquadopp* da fabricante *Nortek*, instalado no *moonpool* da boia. Como se pode observar no desenho esquemático da estrutura da boia, ilustrado na Figura 4, o equipamento ficava posicionado de modo a permanecer 0,5 m abaixo da linha d'água e foi configurado para adquirir dados a essa profundidade.

Figura 4 – Desenho esquemático da boia Itaoca



Fonte: BOIA (2022).

O local de lançamento desta boia foi escolhido visando à melhoria das previsões meteorológicas e oceanográficas entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, para o apoio à segurança a navegação na região e para o aprimoramento das informações destinadas ao suporte das operações navais (CHM (2022a)). Sendo assim, ela foi fundeada à profundidade de 67 metros, no ponto de coordenadas $21^{\circ}29,68'S$ e $040^{\circ}15,6'W$, a 74 quilômetros do ponto de costa mais próximo, em São Francisco do Itabapoana-RJ. A localização da boia Itaoca pode ser observada na Figura 5.



Fonte: O autor.

Para a realização do estudo, os dados foram baixados do sítio eletrônico do CHM (CHM, 2022b). Os dados de corrente medidos por meio da boia estavam disponibilizados como valores de magnitude e direção a 0,5 m de profundidade e com resolução temporal horária, para o período compreendido entre 04.12.2018 e 08.01.2019 e entre 16.01.2019 e 14.03.2019. De acordo com CHM (2022a), a direção não foi corrigida para o norte verdadeiro (geográfico), ou seja, é referenciada ao norte magnético.

Em função disso e, uma vez que nas bases de dados dos modelos numéricos hidrodinâmicos as direções obtidas a partir das componentes u e v são referenciadas ao norte geográfico, fez-se necessário efetuar correções visando à compatibilização das séries.

A fim de realizar a mudança de referencial da direção do norte magnético para o norte geográfico foi necessário definir a declinação magnética do local em que a boia se encontrava posicionada. Para isso, foi utilizado o modelo do Campo de Referência Geomagnética Internacional, ou, em inglês, *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), disponível em sítio eletrônico da NOAA (NOAA, 2022).

O valor encontrado para a declinação magnética média calculada para o ponto, durante o período de observação, foi de 23°41'30"W. Este valor foi somado às direções da série de dados baixados, obtendo-se, assim, a direção corrigida para o norte geográfico.

4.2 Caracterização da área de estudo

A Corrente do Brasil (CB) é a corrente superficial dominante na costa brasileira e integra a porção oeste do giro subtropical do Atlântico Sul da circulação oceânica de larga escala, que possui orientação anticiclônica. Sua formação está relacionada à bifurcação do ramo sul da Corrente Sul-Equatorial (CSE) ao incidir na costa brasileira, que dá origem à CB, a qual se direciona para o sul, e à Corrente Norte do Brasil (CNB), que flui em direção ao equador (PETERSON; STRAMMA, 1991).

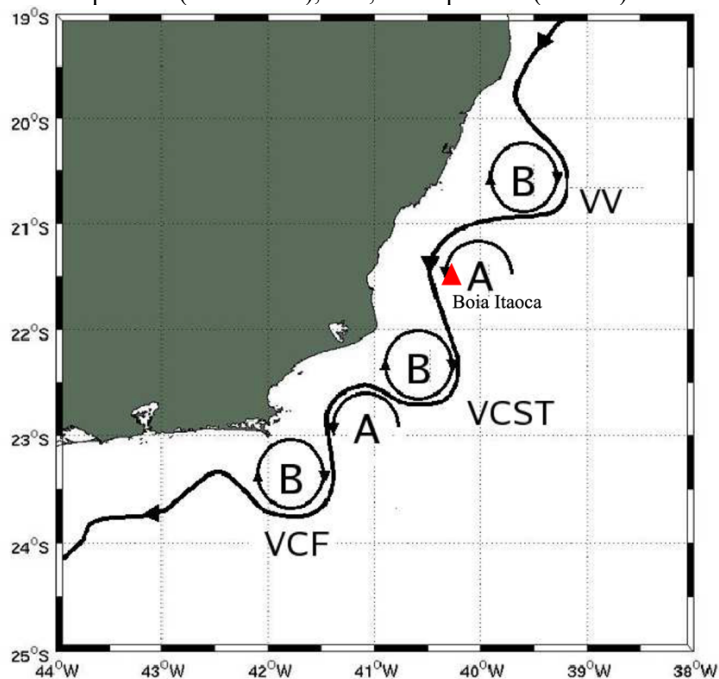
Segundo Calado (2006), a CB desenvolve intensa atividade de mesoescala ao longo da costa sul-americana, com a ocorrência de “largos meandros formados e principalmente observados na costa sudeste brasileira entre Vitória (20°S) e Cabo de Santa Marta Grande (28°S)”. Nessa região, três importantes sistemas caracterizam o local: o Vórtice de Vitória (VV), o Vórtice do Cabo de São Tomé (VCST) e o Vórtice de Cabo Frio (VCF), conforme se pode observar na Figura 6.

Dentre as hipóteses existentes na literatura para explicar a presença desses vórtices, figura o estudo pioneiro do VCF de Campos, Gonçalves e Ikeda (1995). Os autores fundamentam sua explicação na existência de um intenso gradiente batimétrico no local e na mudança abrupta da direção da linha de costa, de orientação predominantemente norte-sul para aproximadamente leste-oeste na região de Cabo Frio, como se pode notar no mapa da Figura 7.

Calado (2006) expandiu o raciocínio dos autores para o VCST e para o VV, sugerindo que o início do processo de meandramento devido à mudança da geometria da margem continental começaria mais ao norte, devido à necessidade de a CB contornar o

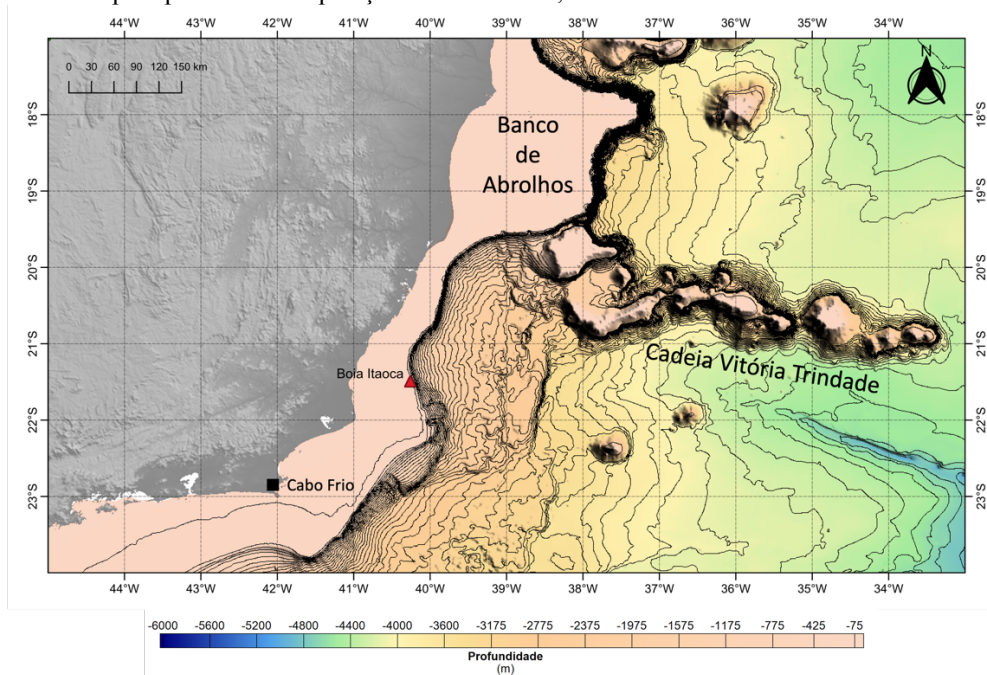
Banco de Abrolhos e atravessar a Cadeia Vitória Trindade, promovendo, assim, a formação dos vórtices.

Figura 6 – Mapa representando os meandramentos da circulação de mesoescala da CB no sudeste brasileiro, evidenciando o Vórtice de Vitória (VV), o Vórtice de Cabo de São Tomé (VCST), o Vórtice de Cabo Frio (VCF) e a posição aproximada da boia Itaoca (triângulo vermelho). “A” significa centro de alta pressão (anticiclone), “B”, baixa pressão (ciclone)



Fonte: Adaptado de Calado (2006).

Figura 7 – Mapa representando a posição da boia Itaoca, de Cabo Frio e o relevo submarino na região



Fonte: Adaptado de DHN (2022a).

Ao analisar a posição em que se encontra a boia= Itaoca, observa-se que ela está localizada no sistema anticiclônico entre o VV e o VCST (Figura 6), e próximo a um local de intenso gradiente batimétrico (Figura 7), onde ocorre a quebra da plataforma continental, ou seja, próximo ao talude. Nessa região, Evans *et al.* (1983 apud Silveira *et al.*, 2000) descrevem que a interação da CB com o relevo marinho faz com que a corrente se mantenha confinada e organizada sobre o talude continental. Dessa forma, tendo em vista a orientação noroeste-sudeste das feições topográficas submarinas no local de fundeio da boia Itaoca (Figura 7), é esperado que o sentido predominante das correntes oceânicas medidas por meio dela seja para sudeste.

4.3 Dados dos modelos hidrodinâmicos

Como já mencionado, a versão mais recente do sistema de previsão do modelo HYCOM-CHM, utilizada nos prognósticos diários de circulação oceânica do CHM, dispõe de um domínio regional com resolução horizontal de $1/24^\circ$, ou 4,6 km, cobrindo a METAREA V (Figura 3) e com resolução vertical discretizada em 32 níveis híbridos. A grade computacional do domínio horizontal é delimitada pelas longitudes de 68°W a 24°W e latitudes aproximadas de 45°S a 10°N . A resolução temporal do modelo é de seis horas para os dados tridimensionais e de uma hora para os dados do campo superficial de correntes.

As condições iniciais e de contorno são obtidas do modelo de menor resolução que abrange a bacia do Atlântico ($1/12^\circ$), a partir do aninhamento de grades. Além dessas condições, são incorporadas componentes harmônicas de marés nos contornos abertos da grade de maior resolução, de modo a modelar sua propagação em toda a sua extensão, as quais não são incorporadas na grade de $1/12^\circ$ (DHN, 2022b).

Com relação às forçantes da circulação atmosférica, o sistema HYCOM-CHM considera os dados do modelo atmosférico regional COSMO (*Consortium for Small-scale Modeling*), implementado para a METAREA V pelo CHM, com resolução horizontal de 7 km. Como contingência, é utilizado o modelo global GFS (*Global Forecast System*) de $1/4^\circ$ de resolução. Essas forçantes são atualizadas no modelo hidrodinâmico a cada três horas, o que significa dizer que todos os cálculos no intervalo de tempo entre as atualizações são realizados utilizando as mesmas condições atmosféricas. Essas características do sistema devem ser consideradas ao avaliar os resultados do modelo.

A fim de realizar as comparações que possibilitaram a avaliação do HYCOM-CHM, os seus resultados de corrente superficial foram interpolados para a coordenada da boia, utilizando o método de interpolação do “vizinho mais próximo”, de modo a preservar os valores originais fornecidos pelo modelo para a coordenada da grade mais próxima à localização da boia. Os dados do modelo HYCOM-CHM foram obtidos por meio de solicitação à Divisão de Previsão Numérica do CHM.

A fim de permitir análises comparativas do desempenho do HYCOM-CHM em representar a realidade, foram obtidos dados de dois outros sistemas operacionais disponíveis na internet: o sistema norte-americano GOFS 3.1 e o sistema fornecido pelo serviço europeu CMEMS. Suas características estão descritas a seguir.

O Sistema de Previsão Oceânica Global, em inglês, *Global Ocean Forecasting System* (GOFS) foi desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa Naval com o propósito de uso operacional por parte da Marinha Norte-Americana (METZGER *et al.*, 2017). O sistema é baseado no modelo hidrodinâmico global HYCOM 1/12°, desenvolvido pelo consórcio HYCOM e utiliza as técnicas de assimilação *Navy Couple Ocean Data Assimilation* (NCODA) para fornecer informações oceanográficas como velocidade zonal e meridional das correntes, temperatura, salinidade e elevação.

A versão mais recente disponível na *internet* deste sistema – e que foi utilizada neste estudo – é o GOFS 3.1, denominado neste trabalho de HYCOM-NCODA. Tal versão, com domínio global, possui resolução horizontal em uma grade tripolar, considerando aproximadamente 9 km no equador, 7 km em médias latitudes e 3,5 km no Polo Norte. Quanto à resolução vertical, o modelo utiliza 41 camadas para realizar seus cálculos (METZGER *et al.*, 2017). Os dados do sistema se encontram disponíveis com uma resolução temporal de três horas e as variáveis do campo superficial de corrente foram obtidas para o ponto da grade com maior proximidade das coordenadas da boia no sítio eletrônico do consórcio multi-institucional HYCOM (HYCOM, 2022).

O Serviço de Monitoramento Marinho Copernicus, ou, em inglês, *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) é um serviço da União Europeia que fornece dados de características físicas e biogeoquímicas do oceano e gelo marinho (MERCATOR, 2022b). Faz parte do programa de observação da Terra, *Copernicus*, da organização *Mercator Ocean International* (MOi) (MERCATOR, 2022a) e fornece mais de duzentos produtos oceânicos operacionais.

O produto cujos dados foram utilizados para fins comparativos neste estudo foi o GLORYS12V1, que consiste em conjunto de dados de reanálise de domínio global, com resolução horizontal regular de $1/12^\circ$, aproximadamente 8 km, calculados com uso do modelo hidrodinâmico NEMO (DRÉVILLON; FERNANDEZ; LELLOUCHE, 2021). O produto possui resolução vertical discretizada em 50 níveis e disponibiliza como resultados as médias diárias e mensais das variáveis físico-oceanográficas.

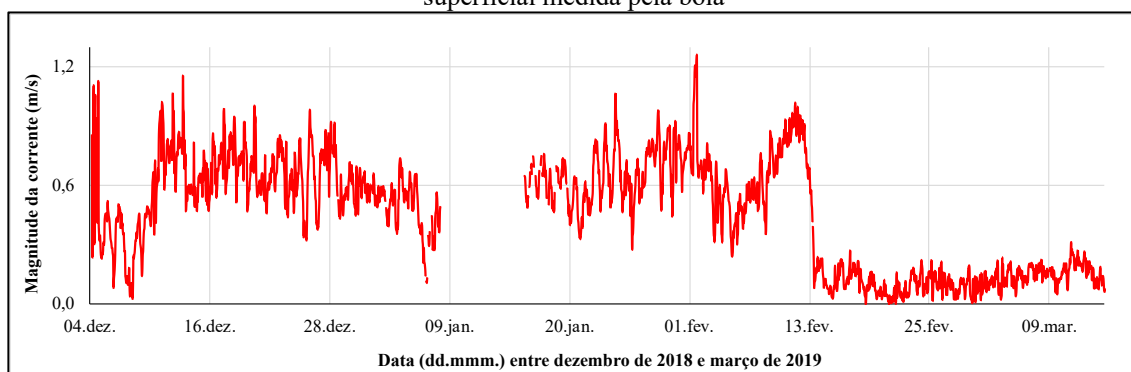
Para este trabalho, foram obtidos os dados de corrente superficial de maior resolução temporal do produto GLORYS12V1 – médias diárias – para o ponto da grade mais próximo às coordenadas da boia, por meio do sítio eletrônico da Mercator (MERCATOR, 2022c). Neste trabalho, para se referir aos dados provenientes dessa fonte, será utilizado o termo Mercator.

4.4 Processamento, seleção e compatibilização dos dados

Considerando o intervalo temporal no qual se dispunha de dados medidos e a resolução temporal horária da série, seriam esperados 2394 dados horários. A partir dos dados de velocidade obtidos referentes à boia Itaoca, foram identificados 207 horários com ausência de informação e 17 com o indicativo de erro de “-9999” ou com informação de magnitude da corrente nula, resultando em um conjunto de 2170 registros.

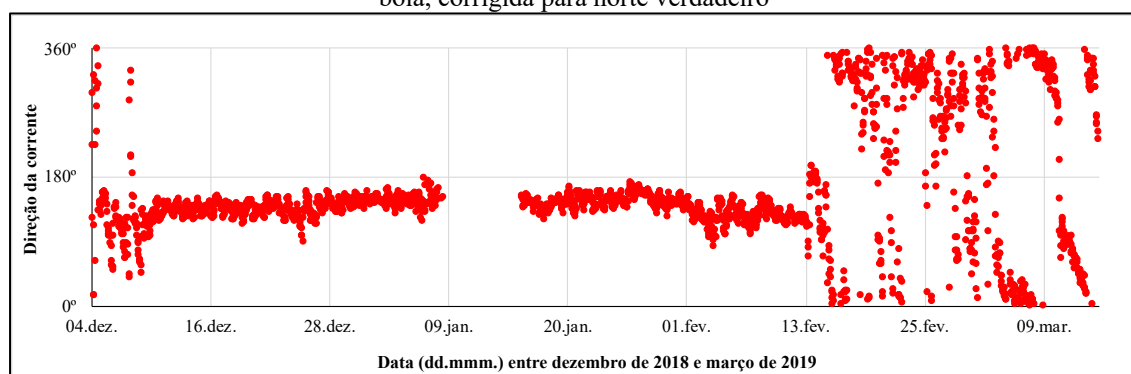
Como intuito de avaliar a consistência dos dados disponibilizados pelo PNBOIA ao longo do período de medição foi realizada uma análise preliminar dos gráficos da série temporal de magnitude (Figura 8) e direção (Figura 9). Dessa forma, foi possível identificar que os 23 primeiros dados disponíveis apresentavam padrão anômalo de variação, o que pode estar relacionado com a estabilização dos sensores após lançamento ou posicionamento da boia. Optou-se, então, por desconsiderá-los.

Figura 8 – Gráfico de linha da série temporal dos dados brutos de magnitude da corrente oceânica superficial medida pela boia



Fonte: O autor.

Figura 9 – Gráfico de pontos da série temporal de direção da corrente oceânica superficial medida pela boia, corrigida para norte verdadeiro



Fonte: O autor.

Além disso, foi observada uma mudança expressiva nos padrões de magnitude e direção a partir de 13 de fevereiro de 2019, com uma redução expressiva da magnitude da velocidade da corrente medida por meio da boia. No sítio eletrônico do CHM (CHM, 2022a), é descrito que a boia começou a derivar em 14 de março de 2019, devido a problemas de vandalismo.

Sendo assim, tendo em vista que os dados não dispõem da série temporal concomitante das coordenadas geográficas da boia, o que permitiria verificar o instante em que ocorreu o incidente com a boia, os dados a partir de 17h00 de 13.02.2019 foram desconsiderados. Admitidos os critérios supracitados, a análise prosseguiu com 1457 dados considerados válidos.

No que se refere ao modelo HYCOM-CHM, dos 1457 horários para os quais poderia ser realizada a avaliação, não foi possível acessar os 35 últimos do ano de 2018. Dessa forma, obteve-se um total de 1422 registros horários em comum entre as séries da boia e do modelo para efetuar o estudo.

Quanto à obtenção dos dados dos sistemas HYCOM-NCODA e Mercator, foram obtidos inicialmente 797 e 102 dados para o período completo, respectivamente. Após a compatibilização com as demais séries de dados, a partir das interseções entre elas, foram considerados, para as análises, 474 dados do HYCOM-NCODA e 61 do Mercator.

Destaca-se que, apesar de o sistema Mercator dispor de dados de médias diárias das componentes horizontais da corrente, não foram realizadas médias diárias dos dados medidos para efetuar comparação, optando-se por comparar com o horário de referência do dado modelado obtido. Tal abordagem foi adotada com o intuito de representar a forma como este dado poderia ser empregado em subsídios em operações de Busca e Salvamento e no enfrentamento à poluição marinha, como em simulações de dispersão de objetos SAR ou de óleo no mar, por exemplo.

4.5 Pós-processamento dos dados

De posse dos dados e realizadas as adequações necessárias a fim de compatibilizar as séries, foram calculados parâmetros estatísticos a fim de possibilitar uma comparação quantitativa dos dados e, assim, avaliar o desempenho do modelo HYCOM-CHM. Os parâmetros estatísticos utilizados foram a média amostral e o desvio padrão amostral de cada série (DP), o erro absoluto médio (EAM) e o desvio padrão do erro absoluto (DPEA), o erro absoluto médio relativo à média (EAMR), o RMSE, o viés e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

Em cada uma das expressões abaixo, que descrevem os parâmetros mencionados, “ y ” representa dados de velocidade superficial calculados por modelos, que podem ser de magnitude ou de suas componentes ortogonais, e “ o ” representa dados medidos por meio da boia. A letra “ x ” simboliza uma variável genérica que pode representar tanto dados modelados quanto medidos. O índice i indica cada instante de tempo considerado ao longo da série e n representa a quantidade de dados de uma determinada série.

A média amostral (\bar{x}) foi escolhida como a medida de tendência central para representar cada uma das séries de dados. Foi calculada por meio da média aritmética simples dos dados disponíveis para cada uma das fontes, cuja expressão está explicitada na Equação 1.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

A fim de quantificar a dispersão dos dados em cada uma das séries estudadas, foi utilizado o desvio padrão amostral (s). O parâmetro é definido como a raiz quadrada da variância amostral e pode ser calculado por meio da Equação 2.

$$s_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Quanto às medidas de erro dos modelos, o primeiro parâmetro utilizado foi o erro absoluto médio (EAM), ou, em inglês, MAE (*mean absolute error*), descrito na Equação 3. Por se tratar de uma média aritmética simples dos desvios absolutos dos modelos em relação às observações, traz consigo a vantagem de não apresentar distorções na mensuração do erro (WILLMOT; MATSURA, 2005).

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - o_i|}{n} \quad (3)$$

A fim de avaliar a dispersão do erro absoluto, foi calculado, também, o desvio padrão do erro absoluto, por meio da Equação 4, que pode ser vista como uma variação da Equação 2.

$$DPEA = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (|y_i - o_i| - EAM)^2}{(n - 1)} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Com o intuito de avaliar o percentual da média dos dados medidos que o erro absoluto dos modelos representou, foi calculado o erro absoluto médio relativo à média (EAMR), descrito por Harari (2015). A expressão do EAMR está figura na Equação 5 e foi utilizada apenas para avaliar a magnitude da corrente.

$$EAMR = \frac{EAM}{\bar{o}} \times 100\%. \quad (5)$$

A fim de permitir a comparação dos resultados de magnitude obtidos a partir do HYCOM-CHM com os de Novais (2019), foi utilizada uma adaptação do EAMR. Para isso, foi calculado o erro percentual, com base nas médias dos resultados do modelo e dos dados medidos, representado pela Equação 6.

$$\text{Erro percentual} = \frac{|\bar{y} - \bar{o}|}{\bar{o}} \times 100\%. \quad (6)$$

Outro parâmetro utilizado para dimensionar o erro dos modelos foi o RMSE, cuja expressão pode ser observada na Equação 7. Destaca-se, entretanto, que, apesar de largamente utilizado na literatura (BORTOLI, 2021; COSTA, 2010; FRAGOSO *et al.*, 2016; METZGER *et al.*, 2010; METZGER *et al.*, 2017) na avaliação de modelos, este parâmetro apresenta distorções em seus resultados, amplificando-os. Isso ocorre, em virtude da presença do expoente quadrático na sua formulação, o que torna o RMSE mais sensível que o EAM a grandes desvios do modelo em relação a dados observados, acentuando-os, conforme destacam Willmot e Matura (2005).

$$\text{RMSE} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2}{n - 1} \right]^{1/2} \quad (7)$$

A fim de identificar e quantificar a tendência de erro do modelo, ou seja, se está subestimando ou superestimando a corrente, foi empregado o viés, cujo cálculo está apresentado na Equação 8, e que será negativo para o primeiro caso e positivo para o segundo.

$$\text{Viés} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - o_i)}{n} \quad (8)$$

Além desses, para indicar o grau de correlação linear entre as séries modeladas e a observada será empregado o coeficiente de correlação de Pearson (r), calculado por meio da Equação 9.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n - 1) \cdot s_Y \cdot s_O} \quad (9)$$

Com o intuito de complementar as análises estatísticas realizadas por meio dos parâmetros descritos, foram confeccionados gráficos de linha e de pontos das séries temporais de magnitude e de direção da corrente medida e das correntes resultantes dos modelos.

Ademais foram utilizados histogramas direcionais para representar as frequências de ocorrência das velocidades em cada direção, de modo a possibilitar uma avaliação visual e qualitativa dos resultados dos modelos em relação aos dados observados.

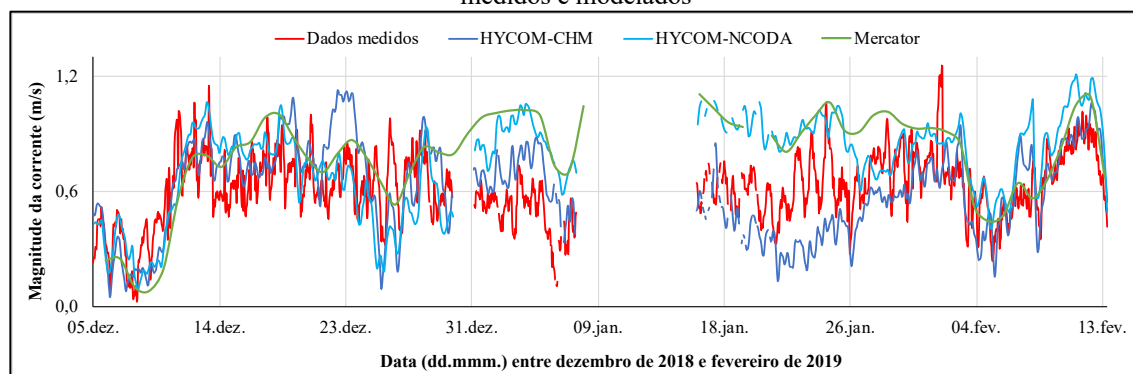
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de organizar melhor o raciocínio, esta seção foi segmentada em quatro subseções. A subseção 5.1 se refere aos resultados e à discussão relacionados à magnitude da corrente no local de estudo; a subseção 5.2 aborda os aspectos da direção da corrente; a subseção 5.3 apresenta e discute os resultados obtidos para as componentes meridional e zonal da corrente e; a subseção 5.4 apresenta uma análise simplificada da magnitude e da direção de alguns pontos próximos às coordenadas do estudo, visando à busca por possíveis deslocamentos da boia ou das feições hidrodinâmicas modeladas e, assim, resultados melhores.

5.1 Análise da magnitude da corrente

Após o processamento e compatibilização dos dados a serem analisados, foi gerado um gráfico sobreposto com as quatro séries temporais da magnitude de corrente, a fim de avaliar visualmente o comportamento da variável. O gráfico pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 – Gráfico de linha das séries temporais de magnitude da corrente oceânica superficial dos dados medidos e modelados



Fonte: O autor.

Quanto aos parâmetros estatísticos calculados para a magnitude da corrente, estes foram sumarizados na Tabela 2, e os melhores resultados foram realçados em negrito.

Tabela 2 – Parâmetros estatísticos calculados para a magnitude da corrente oceânica superficial relativos às séries de dados medidos, do HYCOM-CHM (H-CHM), do HYCOM-NCODA (H-NCODA) e do Mercator. Os melhores resultados encontrados foram realçados em negrito

Dado	Medido	H-CHM	H-NCODA	Mercator
Média ± DP (m/s)	0,619 ± 0,183	0,604 ± 0,235	0,753 ± 0,236	0,790 ± 0,246
EAM ± DPEA (m/s)	–	0,169 ± 0,121	0,215 ± 0,141	0,207 ± 0,142
EAMR (%)	–	27%	35%	33%
RMSE (m/s)	–	0,208	0,258	0,253
Viés (m/s)	–	-0,015	0,134	0,137
r	–	0,53	0,47	0,54

Fonte: O autor.

Ao analisar os dados de magnitude da corrente medida no local de estudo, foi encontrada uma média de 0,619 m/s, com DP de 0,235. O modelo cuja média mais se aproximou deste valor foi o HYCOM-CHM, para o qual foi encontrado um valor de 0,604 m/s, enquanto para o HYCOM-NCODA e o para o Mercator foram obtidos 0,753 m/s e 0,790 m/s como as médias, respectivamente.

Para comparar os resultados do HYCOM-CHM com os de Novais (2019), foi calculado o erro percentual (Equação 6). A partir disso, foi encontrado um valor de 2% para a série de dados do HYCOM-CHM, e de 6% para Novais (2019), o que demonstra resultados coerentes e de ordem similar.

No que se refere ao EAM, foi constatado um valor de 0,169 m/s para o HYCOM-CHM, com DPEA de 0,121 m/s. Ao comparar com os demais modelos este também se mostrou o menor e com erro absoluto menos disperso, uma vez que para o HYCOM-NCODA foi encontrado um valor de EAM de 0,215 m/s, com DPEA de 0,141 m/s e para o Mercator, EAM de 0,207 m/s, com DPEA de 0,142 m/s.

Ao analisar o EAMR, observou-se que o HYCOM-CHM apresentou um erro de 27% em relação a média dos dados medidos para o local e período de estudo, enquanto

os erros do HYCOM-NCODA e do Mercator representaram 35% e 33% da mesma média, respectivamente. A partir dos dados expostos, pode-se avaliar que o HYCOM-CHM apresentou desempenho ligeiramente superior aos demais modelos nas condições estudadas, apesar de os erros evidenciados serem ordem similar.

Quanto ao RMSE, foi encontrado o valor de 0,208 m/s para o HYCOM-CHM e este se mostrou o menor ao comparar com os demais modelos, cujos resultados foram de 0,258 m/s para HYCOM-NCODA e 0,253 m/s para o Mercator. Ao comparar os resultados de RMSE com os obtidos por Metzger *et al.* (2010) – de 0,288 m/s a 0,298 m/s – e por Metzger *et al.* (2017) – de 0,16 m/s – nota-se que o erro do HYCOM-CHM foi inferior àqueles, porém superior a este. Apesar disso, os valores de RMSE se encontram em ordem próxima.

Em relação ao viés, foi verificado um valor de -0,015 m/s para o HYCOM-CHM, de 0,134 m/s para o HYCOM-NCODA e de 0,137 m/s para o Mercator. Assim, observa-se que o modelo implementado pelo CHM apresentou uma tendência a subestimar a magnitude da corrente para o local de estudo, enquanto os demais modelos mostraram tendência a superestimá-la. Metzger *et al.* (2010) e Metzger *et al.* (2017) obtiveram valores para o viés de ordem próxima à zero, portanto, também puderam-se observar resultados de ordem similar.

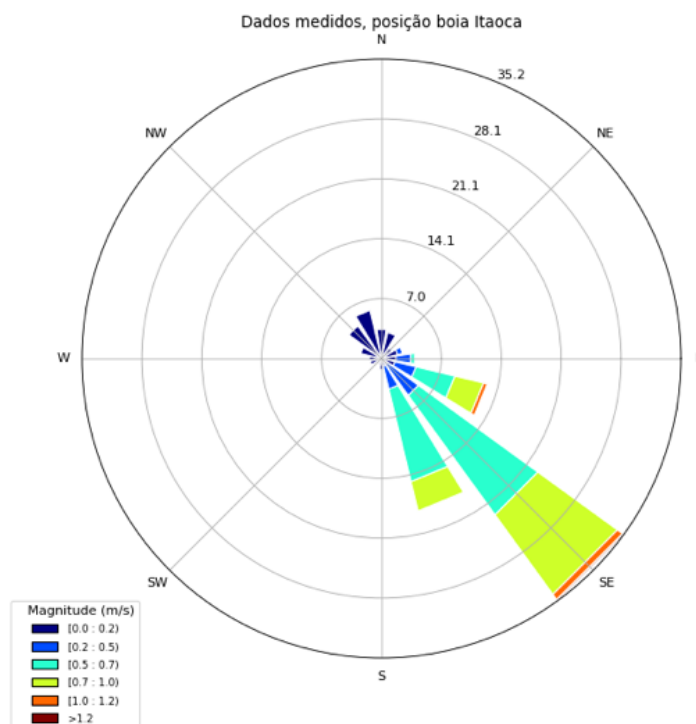
No tocante à correlação, foi encontrado um índice de Pearson de 0,53 entre os valores modelados pelo HYCOM-CHM e os valores medidos pela boia Itaoca. Tal valor mostrou um desempenho ligeiramente melhor em relação ao HYCOM-NCODA, para o qual foi encontrado um índice de correlação de 0,47. No entanto, a maior correlação foi obtida ao analisar os dados do modelo Mercator, que foi calculada em 0,54. Apesar disso, observou-se que os três modelos apresentaram grau de correlação similar, todos em torno de 0,5.

5.2 Análise da direção da corrente

Para analisar os dados de direção da corrente, o histograma direcional se mostrou bastante adequado, uma vez que representa visualmente a distribuição de frequências relativas das velocidades em termos percentuais, em função da orientação do vetor. A Figura 11 apresenta um gráfico deste tipo, com base na série de dados de corrente medida por meio da boia Itaoca. A partir dele, pode-se observar uma predominância da orientação

no sentido sudeste, coerente com o esperado para a região, conforme apresentado na seção 4.2.

Figura 11 – Histograma direcional da corrente oceânica superficial medida a partir dos dados da boia Itaoca

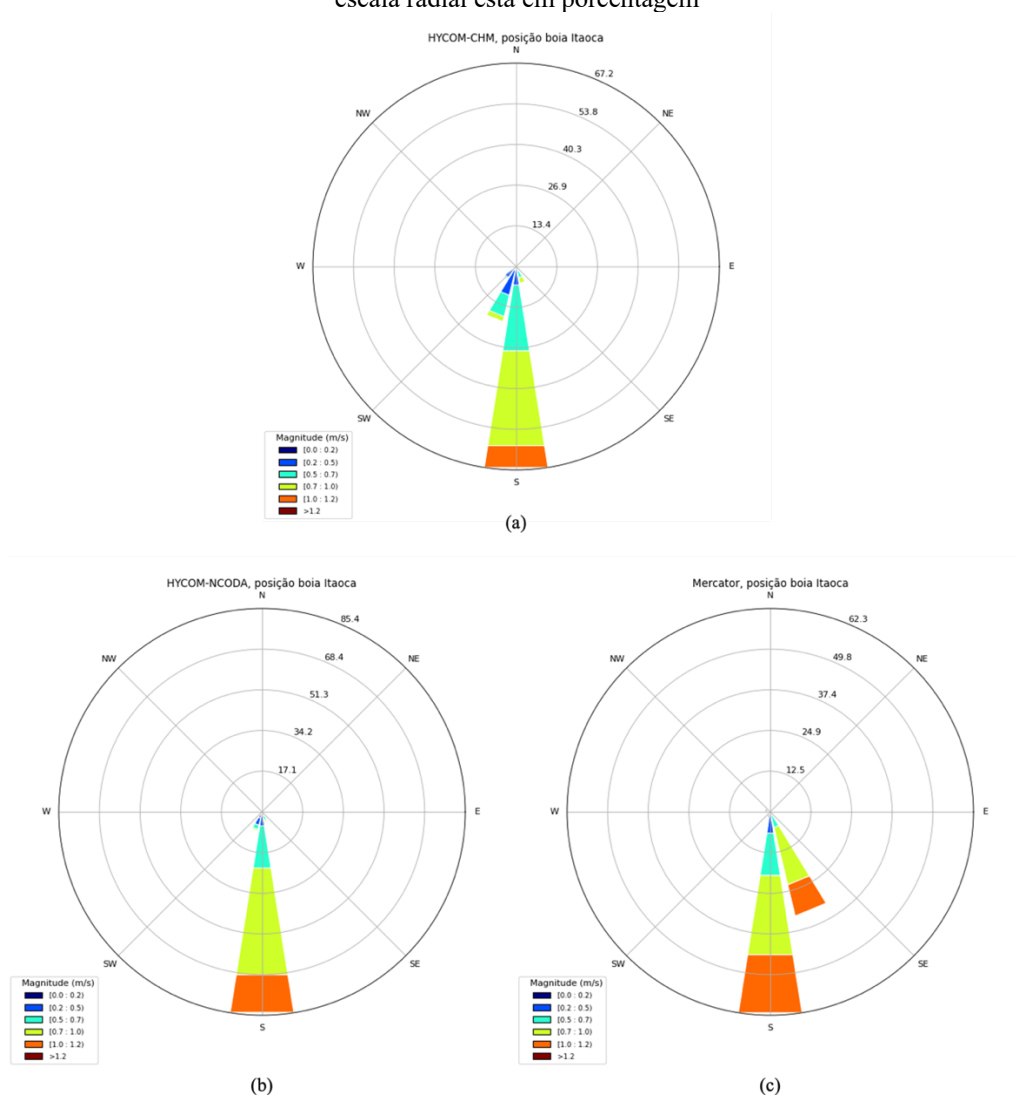


Fonte: O autor.

Apesar disso, os dados de corrente superficial obtidos a partir dos modelos HYCOM-CHM, HYCOM-NCODA e Mercator apresentaram a direção sul como a predominante (Figura 12), divergindo dos dados medidos e do padrão esperado para a região. A coerência entre os modelos pode ser observada, também, ao analisar o gráfico da evolução temporal da direção da corrente, apresentada na Figura 13.

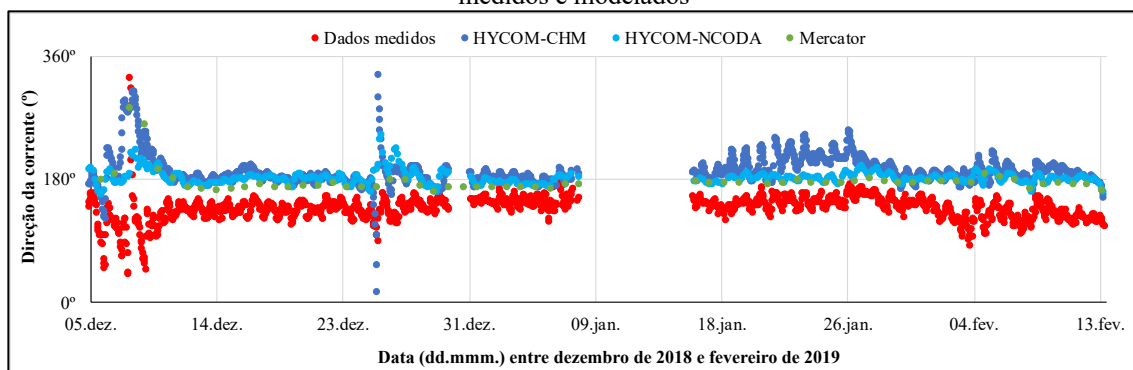
A divergência entre os modelos e os dados medidos pode estar associada ao fato de suas resoluções não serem suficientes para representar os elevados gradientes batimétricos da região. Em que pese a interação da CB com as províncias geomorfológicas do leito marinho, para a caracterização da direção de escoamento das correntes da região, é esperado que limitações na representação desses gradientes se configurem, também, como uma limitação na representação das direções das correntes superficiais locais.

Figura 12 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados dos modelos (a) HYCOM-CHM, (b) HYCOM-NCODA e (c) Mercator para as coordenadas da boia Itaoca. A escala radial está em porcentagem



Fonte: O autor.

Figura 13 – Gráfico de pontos das séries temporais de direção da corrente oceânica superficial dos dados medidos e modelados

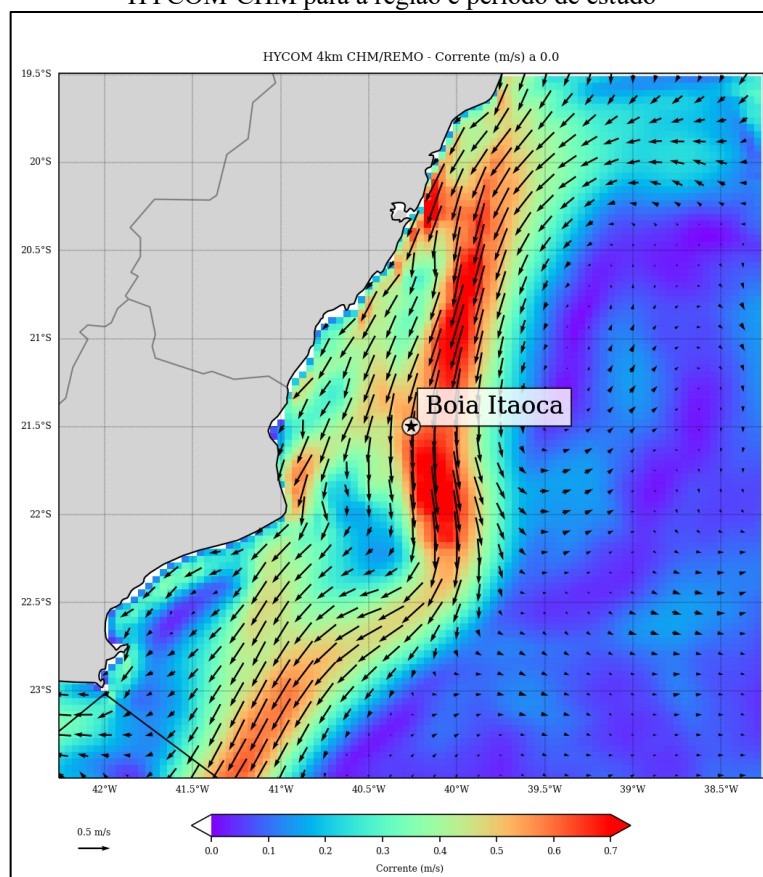


Fonte: O autor.

A fim de elucidar a situação descrita, foi gerado um mapa do campo superficial de correntes, com base nos dados da simulação do HYCOM-CHM, ilustrado pela Figura 14. O mapa representa a intensidade e a direção médias das correntes superficiais calculadas, considerando o período de estudo, para a região nas proximidades das coordenadas da boia Itaoca. A representação das direções foi subamostrada a fim de não prejudicar a visualização com excesso de informação.

Ao observar o mapa, pode-se depreender que, na região próxima à boia, há uma alta variabilidade da corrente superficial. Em função disso, é possível que a resolução do modelo não seja capaz de representar de forma acurada as variadas feições hidrodinâmicas presentes no local, trazendo prejuízos para o correto cálculo da direção da corrente.

Figura 14 – Mapa do campo superficial médio de correntes oceânicas calculadas a partir do modelo HYCOM-CHM para a região e período de estudo

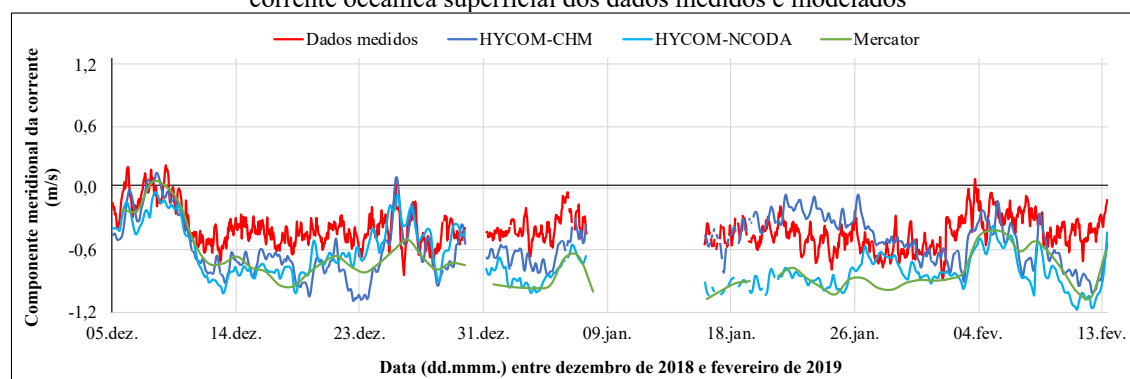


Fonte: O autor.

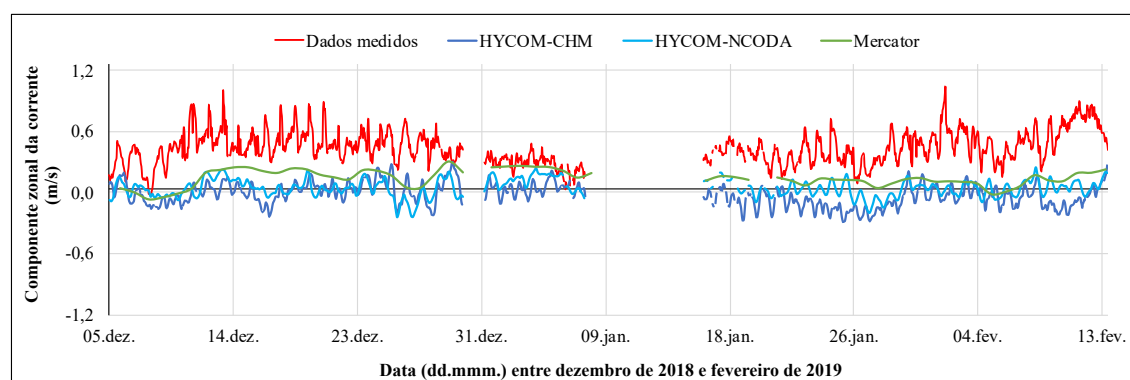
5.3 Análise das componentes meridional (v) e zonal (u) da corrente

A fim de complementar as análises da direção da corrente, buscou-se, também, realizar análises gráfica e estatística das componentes meridional (v) e zonal (u) da velocidade. Os gráficos das séries temporais de v e u estão ilustrados na Figura 15 e os parâmetros estatísticos calculados estão compilados na Tabela 3, na qual os melhores resultados foram realçados em negrito.

Figura 15 – Gráfico de linha das séries temporais das componentes meridional v (a) e zonal u (b) da corrente oceânica superficial dos dados medidos e modelados



(a)



(b)

Fonte: O autor.

Em relação à componente v da velocidade, pode-se observar que a média de todos os modelos apresentou sinal negativo, indicando o sentido sul como o predominante e condizente com o esperado para a região, devido à atuação da CB. Dentre os modelos, o HYCOM-CHM apresentou a média para essa componente que mais se aproximou da média dos valores medidos, diferindo de 0,148 m/s.

Ao comparar os parâmetros EAM, RMSE e viés de v , observa-se que os melhores resultados foram alcançados pelo modelo HYCOM-CHM, apresentando os menores

erros, sendo eles 0,244 m/s, 0,291 m/s e -0,147 m/s, respectivamente. O sinal negativo do viés dos três modelos significa que todos possuem a tendência a subestimar o valor dessa componente da corrente, coerente com o esperado a partir do gráfico da série temporal (Figura 15a).

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos calculados para as componentes meridional (v) e zonal (u) da corrente oceânica superficial relativos às séries de dados medidos, do HYCOM-CHM (H-CHM), do HYCOM-NCODA (H-NCODA) e do Mercator. Os melhores resultados encontrados foram realçados em negrito

Parâmetro	Dado	v	u
	Medido	-0,433 ± 0,175	0,413 ± 0,166
Média ± DP (m/s)	H-CHM	-0,581 ± 0,258	-0,057 ± 0,112
	H-NCODA	-0,746 ± 0,240	0,010 ± 0,087
	Mercator	-0,776 ± 0,253	0,111 ± 0,085
EAM ± DPEA (m/s)	H-CHM	0,244 ± 0,159	0,470 ± 0,182
	H-NCODA	0,330 ± 0,184	0,401 ± 0,169
	Mercator	0,352 ± 0,170	0,357 ± 0,175
RMSE (m/s)	H-CHM	0,291	0,504
	H-NCODA	0,378	0,435
	Mercator	0,394	0,400
Viés (m/s)	H-CHM	-0,147	-0,470
	H-NCODA	-0,312	-0,401
	Mercator	-0,352	-0,356
r	H-CHM	0,38	0,19
	H-NCODA	0,51	0,23
	Mercator	0,74	-0,02

Fonte: O autor.

Além disso, o HYCOM-CHM apresentou a menor dispersão do erro absoluto, representada pelo DPEA de 0,159 m/s, o que indica uma menor aleatoriedade para o erro dessa componente. Ainda assim, a maior correlação encontrada para v com os dados medidos foi com a série de dados do Mercator.

Por outro lado, ao analisar a série temporal de u percebe-se uma considerável diferença entre os níveis médios de todos os modelos e dos dados observados, diferindo, inclusive quanto ao seu sentido, no caso do HYCOM-CHM. Foram registradas correntes

zonais medidas de sentido predominantemente leste, entretanto a solução dos modelos se encontra dispersa em torno de valores próximos a zero. Tal fato resultou em correntes médias calculadas pelos modelos de direção predominante sul, como se pôde observar na Figura 12, diferindo dos resultados observados a partir dos dados medidos, cuja direção predominante registrada foi de sudeste.

Para a componente u da velocidade, os dados Mercator foram os que apresentaram as menores diferenças, de forma geral, como indicado pelos parâmetros EAM e RMSE. Entretanto, o HYCOM-NCODA foi o que apresentou melhor correlação. Apesar disso, as diferenças entre os resultados obtidos pelo HYCOM-CHM foram pouco expressivas em relação aos demais modelos. Sendo assim, notou-se que os modelos divergiram dos dados medidos de forma similar, apresentando padrão coerente entre si.

Portanto, pode-se observar que os dados dos modelos demonstraram uma contribuição relativamente menor da componente u para a magnitude, em relação à componente v , diferentemente dos dados medidos. Essa diferença fica evidente, também, nos histogramas direcionais (Figura 11 e Figura 12).

5.4 Análise de pontos vizinhos

Além da questão levantada da resolução dos modelos, uma segunda hipótese que poderia explicar as diferenças nos resultados modelados de direção da corrente em relação aos dados observados, está relacionada a um possível deslocamento da boia em relação a sua posição de fundeio, ou, até mesmo, um deslocamento dos resultados do modelo no campo simulado, sendo este último caso, descrito por Gilleland *et al.* (2009).

A fim de verificar esta suposição, foram avaliadas séries de dados do HYCOM-CHM de doze pontos da grade próximos ao ponto mais próximo da boia, por meio do parâmetro EAM da magnitude da corrente e de histogramas direcionais. Os pontos escolhidos correspondem às 3 células de grade adjacentes à célula mais próxima às coordenadas da boia, nos sentidos norte (N1, N2, N3), sul (S1, S2, S3), leste (E1, E2, E3) e oeste (W1, W2, W3). Quanto maior o índice associado ao ponto, mais distante ele está da célula de referência.

Na Figura 16 pode ser observado um diagrama esquemático, com uma representação das posições dos pontos escolhidos e seus respectivos EAM, em relação ao ponto da grade mais próximo à boia. A partir da figura, nota-se que não há melhoria

6 CONCLUSÃO

Os resultados apontaram que o HYCOM-CHM apresentou o melhor desempenho em representar a magnitude da corrente no local de estudo em relação aos demais modelos, o que era esperado, tendo em vista sua maior resolução, de $1/24^\circ$, enquanto os demais, de escala global, possuem resolução horizontal de $1/12^\circ$. A média da magnitude da corrente medida ao longo do período estudado, no local da boia Itaoca, foi de 0,619 m/s, enquanto a média calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM foi de 0,604 m/s.

O erro absoluto médio (EAM) do HYCOM-CHM foi calculado em 0,169 m/s, o que representou um erro de 27% em relação ao valor médio da magnitude da corrente para o local no período de estudo (EAMR), enquanto, para os modelos HYCOM-NCODA e Mercator, o EAMR calculado foi de 35% e 33%, respectivamente. A partir disso, pode-se dizer que é esperada uma melhora ao considerar os dados advindos do HYCOM-CHM, em detrimento dos modelos globais comparados, em cálculos realizados para a elaboração de subsídios de apoio à decisão e em outros estudos, como a sua utilização em modelagens lagrangeanas para apoio a operações de SAR, e na determinação de trajetórias de dispersão de óleo ou outros poluentes no mar.

Cabe destacar que, enquanto os modelos globais mostraram tendência a superestimar a velocidade da corrente, indicado pelo valor positivo do viés, o HYCOM-CHM apresentou tendência a subestimá-la em relação aos dados medidos, com viés calculado em -0,015 m/s para este.

No tocante à direção da corrente, foi observado um sentido preferencial de escoamento para sudeste a partir dos dados medidos, o que pode ser explicado pela proximidade do local de fundeio da boia com a quebra da plataforma continental e pela orientação horizontal do talude no sentido noroeste-sudeste. No entanto, os resultados dos modelos avaliados se mostraram divergentes dos dados medidos e coerentes entre si, apresentando direção predominante para o sul.

Ao analisar as componentes horizontais, notou-se que as componentes meridionais dos modelos apresentaram resultados médios condizentes com o esperado, com valores negativos, indicando sentido sul. Entretanto a componente zonal teve sua média próxima a zero, o que implicou em uma direção resultante para sul.

Uma hipótese que foi levantada para explicar a divergência entre os resultados modelados e os medidos reside na existência do intenso gradiente batimétrico nas proximidades do local da boia, acompanhado de uma acentuada variabilidade das correntes oceânicas nas proximidades da região. Assim, é admissível dizer que as resoluções dos modelos podem não ter sido suficientes para representar corretamente as feições oceanográficas das correntes superficiais no local, resultando nos desvios observados, principalmente para a direção, mas também para as magnitudes das velocidades fornecidas por eles.

A fim de resolver essa questão e proporcionar resultados mais acurados para serem utilizados em modelagens de dispersão no mar e outros subsídios, é possível que o desenvolvimento e implementação de grades ou modelos com resoluções cada vez melhores para a região, aprimore a capacidade de representação das componentes das correntes oceânicas, e, assim, da direção do vetor resultante.

Uma segunda hipótese levantada para fundamentar a discordância do modelo em relação aos dados medidos, estaria relacionada a um eventual deslocamento da boia ou dos resultados da variável modelada no campo superficial de correntes simulado. Na tentativa de comprovar a suposição, foram obtidos dados de doze pontos da grade do modelo próximos ao ponto de referência que representou a boia. Buscou-se, assim, encontrar resultados que mais se aproximassem do padrão apresentado pelos dados medidos, todavia não foi observada melhora expressiva em nenhuma das direções de deslocamento que indicasse um erro desse tipo. Dessa maneira, os resultados obtidos inicialmente se mostraram como os mais representativos do ponto avaliado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLECK, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. **Ocean Modelling**, v. 4, p. 55-88, 2002.

BOIA Itaoca. Disponível em:

<https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br.chm/files/u1947/itaoca.pdf>
Acesso em: 19 abr. 2022.

BORTOLI, N. **Validação de um modelo numérico de circulação oceânica de alta resolução para o oceano atlântico sudoeste**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

BRASIL. Decreto nº 70.092, de 2 de fevereiro de 1972. Inclui nas atribuições dos Ministérios da Marinha e da Aeronáutica, as atividades de meteorologia marítima e aeronáutica, respectivamente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1972.

BRASIL. DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). **NORMAM-19**: Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima. 1. rev. Niterói: DHN, 2018

BRYAN K. A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean. **Journal of Computational Physics**, v.4, p. 347-376, 1969.

BUENO, L. F. *et al.* Um Sistema Operacional de Previsão Oceânica para a Costa Leste-Sudeste Brasileira. In: Simpósio sobre ondas, marés, engenharia oceânica e oceanografia por satélite, XIV, 2021, **Anais de Resumos**. Arraial do Cabo, 2022. p. 79-82.

CALADO, L. **Dinâmica da interação da atividade de meso-escala da Corrente do Brasil com o fenômeno da ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ**. 2006. Tese (Doutor em Ciências, área de Oceanografia Física) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

CAMPOS, E. J. D.; GONÇALVES, J. E.; IKEDA, Y. Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil Bight: Summer of 1991. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C9, p. 18537-18550, 1995.

CASTALDI, B. **Spatial and Temporal Variability of the Volume Transport across the Indonesian Straits and Connections with the Indian Ocean Circulation**. 2018. Tese (Doutorado em Oceanografia Física) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

CIRM. **Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/leplac>. Acesso em 6 out. 2022.

CHM. Centro de Hidrografia da Marinha. **Boia Itaoca**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-pnboiaboias-11>. Acesso em: 15 abr. 2022.

CHM. Centro de Hidrografia da Marinha. **Dados PNBOIA**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>. Acesso em: 15 abr. 2022.

COSTA, F. B. **Avaliação do impacto da assimilação de dados altimétricos no modelo oceânico HYCOM sobre o Atlântico Sul**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

COSTA, V. S. **Assimilação de dados altimétricos na modelagem oceânica em alta resolução do Atlântico Sul**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DAVIDSON, F. *et al.* Synergies in Operational Oceanography: The Intrinsic Need for Sustained Ocean Observations. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.

DRÉVILLON, M.; FERNANDEZ, E.; LELLOUCHE, J. M. **Product User Manual For the Global Ocean Physical Multi Year product GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030**. Copernicus Marine Service. 2021

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Mapa de relevo submarino e toponímia da margem brasileira**. Rio de Janeiro. 2022.

DHN. PAM [Previsão Ambiental Marinha]. **Modelo HYCOM**. Disponível em: <https://pam.dhn.mar.mil.br>. Acesso em: 6 out. 2022.

FIEDLER, M. F. M. **Dinâmica estuarina em cenários de aumento do nível do mar: estuário de Santos, SP**. 2015. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Geológica) – Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

FRAGOSO, M. R. *et al.* A 4D-variational ocean data assimilation application for Santos Basin, Brazil. **Ocean Dynamics**. v. 66, 2016.

FRAGOSO, M.R. **Um modelo numérico da circulação oceânica para as bacias leste e sudeste do Brasil**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004

FRANZ, G. *et al.* Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives. **Frontiers in Marine Science**. v. 8, 2021.

GFDL. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. **The Modular Ocean Model (MOM)**. Disponível em: <https://www.gfdl.noaa.gov/mom-ocean-model/>. Acesso em: 23 abr. 2022

GILLELAND, E. *et al.* Intercomparison of spatial forecast verification methods.

Weather and Forecasting, v. 24, p. 1416-1430, 2009.

GOOS-Brasil. **PNBOIA**, Programa Nacional de Boias, c2022. Disponível em: <http://www.goosbrasil.org/pnboia/>. Acesso em: 15 abr. 2022.

HARARI, J. **Fundamentos de modelagem numérica em Oceanografia**. São Paulo: SALT - Sea & Limno Technology, 2015.

HYCOM. **NCSS Grids As Point Data**. Dataset:

/thredds/ncss/GLBy0.08/expt_93.0/uv3z. Disponível em:

https://ncss.hycom.org/thredds/ncss/grid/GLBy0.08/expt_93.0/uv3z/pointDataset.html.

Acesso em: 25 maio 2022.

LIMA, J. A. M. *et al.* Design and Implementation of the Oceanographic Modeling and Observation Network (REMO) for operational oceanography and ocean forecasting.

Revista Brasileira de Geofísica, v. 31, p. 209-228, 2013.

LOF. Laboratório de Oceanografia Física – LOF/COPPE/UFRJ. **Apresentação**.

Disponível em: http://www.lof.oceanica.ufrj.br/presentation/pt_BR. Acesso em 6 out. 2022.

MCWILLIAMS, J. C. Modeling the oceanic general circulation. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 28, p. 215-248, 1996.

MERCATOR Ocean International. **About Mercator Ocean International**. Disponível em: <https://www.mercator-ocean.eu/en/about-mercator-ocean-international/>. Acesso em: 27 set. 2022.

MERCATOR Ocean International. **Copernicus Marine Service**. Disponível em: <https://www.mercator-ocean.eu/place/cmems-copernicus-marine-environment-monitoring-service/>. Acesso em: 27 set. 2022.

MERCATOR Ocean International. **Global Ocean Physics Reanalysis**. Disponível em: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/DATA-ACCESS. Acesso em 22 ago. 2022.

METZGER, E.J. *et al.* **Global Ocean Forecast System 3.1 Validation Testing**.

Relatório Técnico NRL/MR/7320--17-9722, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS 39529-5004. 2017.

METZGER, E.J. *et al.* **Validation Test Report for the Global Ocean Forecast**

System V3.0 – 1/12° HYCOM/NCODA: Phase II. Relatório Técnico NRL/MR/7320--10-9236, Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS 39529-5004. 2010.

NOAA. National Oceanic and Atmosphere Administration, National Centers for Environmental Information. **Magnetic Field Calculators: Magnetic Declination Estimated Value**. Disponível em: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#declination>. Acesso em 5 maio 2022.

NOVAIS, D.R.B. **Investigação do uso de simulações numéricas de circulação para realização de análise de extremos de correntes na Bacia de Campos**. 2019. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

PAIVA, A. M. *et al.* **Modelagem Numérica da Circulação do Oceano Atlântico Sul e Equatorial e Estudos de Processos Oceanográficos no Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ para Atender a Demandas da Indústria de Petróleo: Relatório Técnico 05 – Base Hidrodinâmica Leste Sudeste – Base-LSE24**. Termo de cooperação: 0050.0094389.14.9. Projeto COPPETEC no.: 18573. [Rio de Janeiro], 2019.

PEREIRA, J. *et al.* A Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO): Breve Histórico e Estágio Atual. *In*: RODRIGUES, T. A.; NETO, J. L.; GALVÃO, D. O. (org.). **As Ciências do Mar em todos os Seus Aspectos** [recurso eletrônico]. Ponta Grossa: Atena, 2019. p. 78-87.

PETERSON, R. G., STRAMMA, L. Upper-level South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, pp. 1-73. 1991.

REMO. **Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica**. Disponível em: <https://rederemo.org>. Acesso em: 6 out. 2022.

SEMTNER, A. J. Modeling Ocean Circulation. **Science**, New York, v. 269, p. 1379-1385, 1995.

SILVEIRA, I. C. A. da *et al.* A Corrente do Brasil ao largo da Costa Leste Brasileira, **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000

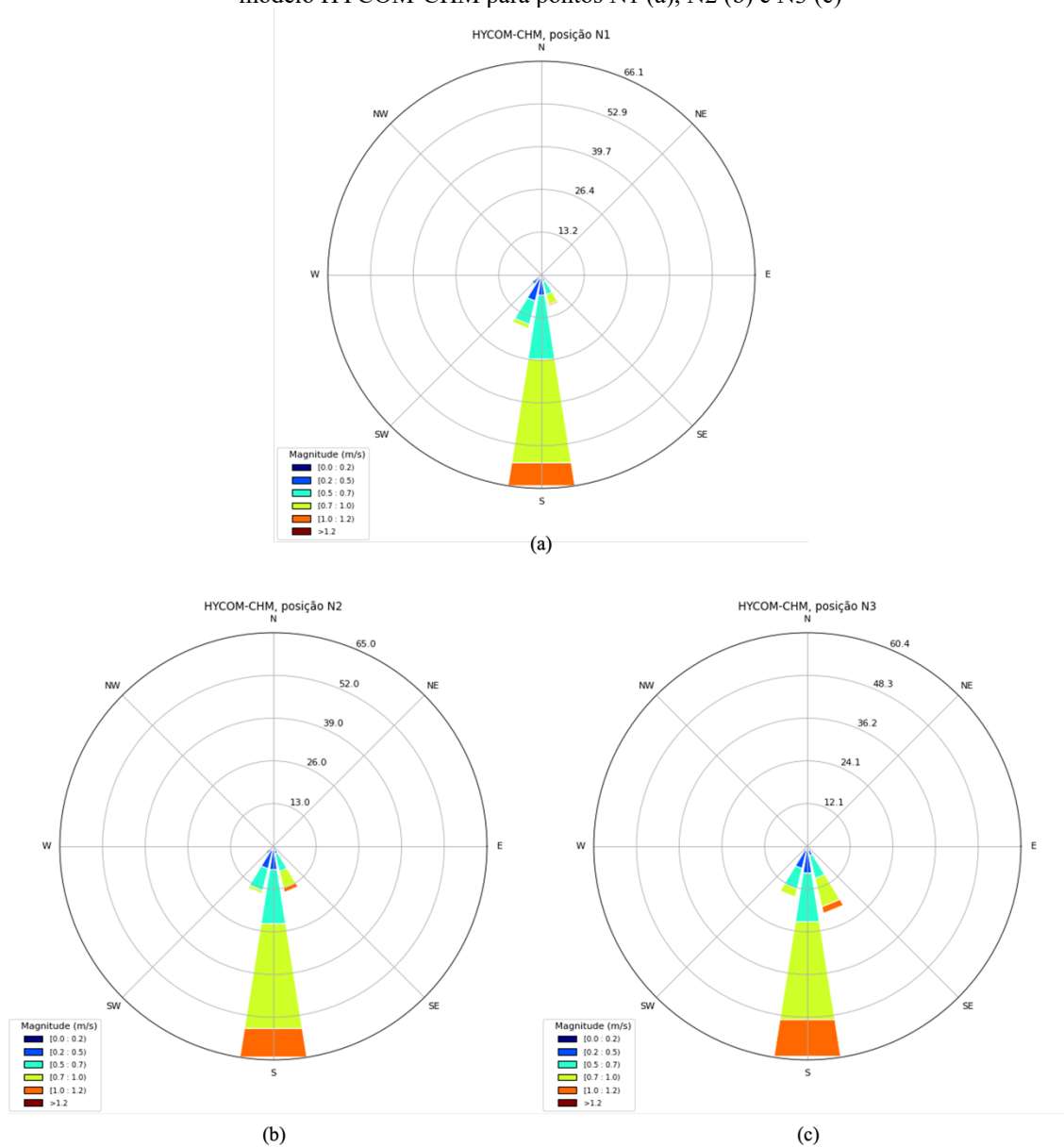
SMAGORINSKY J. The Beginnings of Numerical Weather Prediction and General Circulation Modeling: Early Recollections. **Advances in Geophysics**, v. 25, p. 3-37, 1983.

TUSTISON, B.; FOUFOULA-GEORGIU, E.; HARRIS, D. Scale-recursive estimation for multisensor Quantitative Precipitation Forecast verification: A preliminary assessment. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 8377-8390, 2002.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82. 2005.

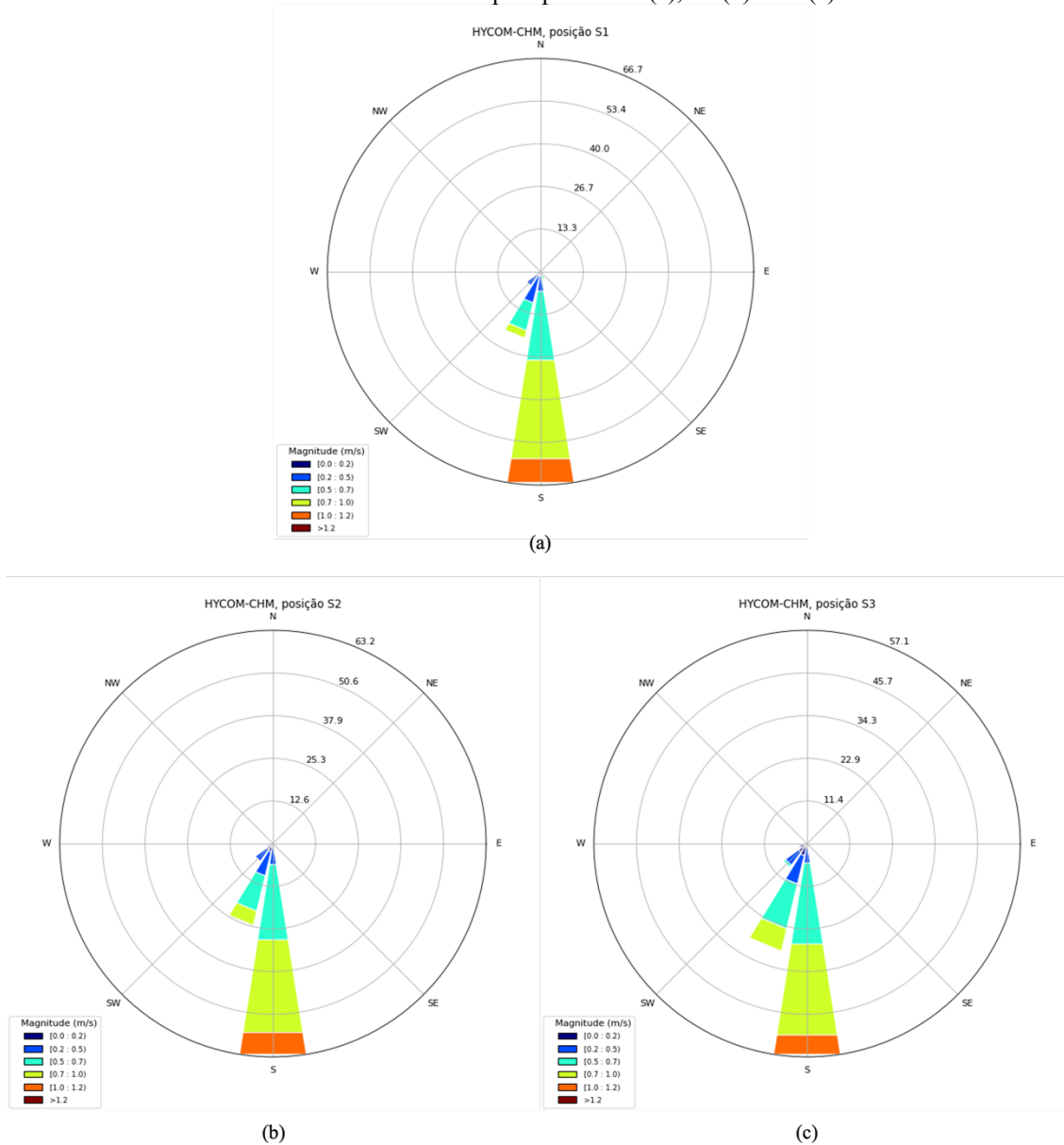
APÊNDICE – Histogramas direcionais dos doze pontos nas proximidades das coordenadas da boia

Figura 17 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos N1 (a), N2 (b) e N3 (c)



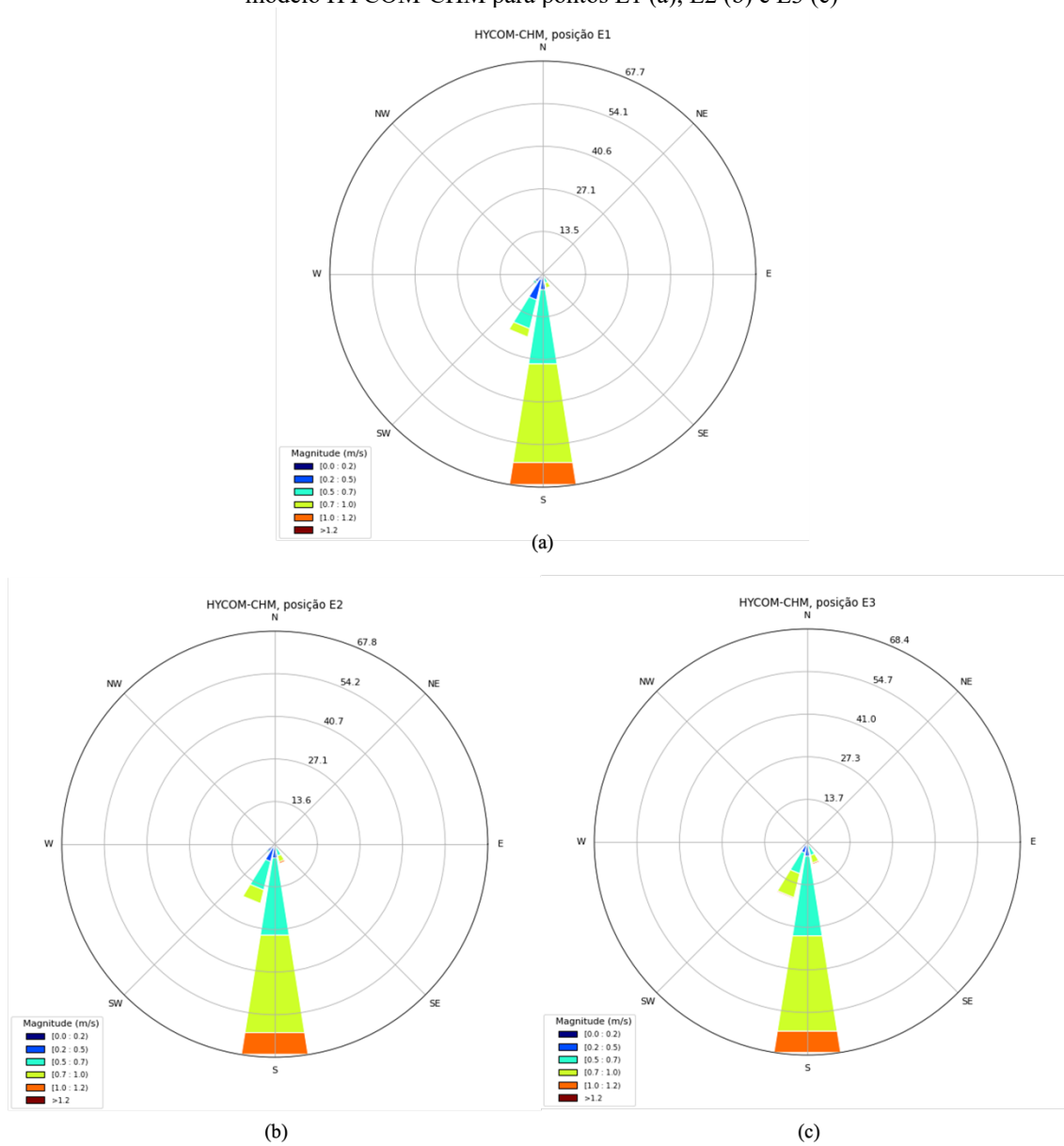
Fonte: O autor.

Figura 18 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos S1 (a), S2 (b) e S3 (c)



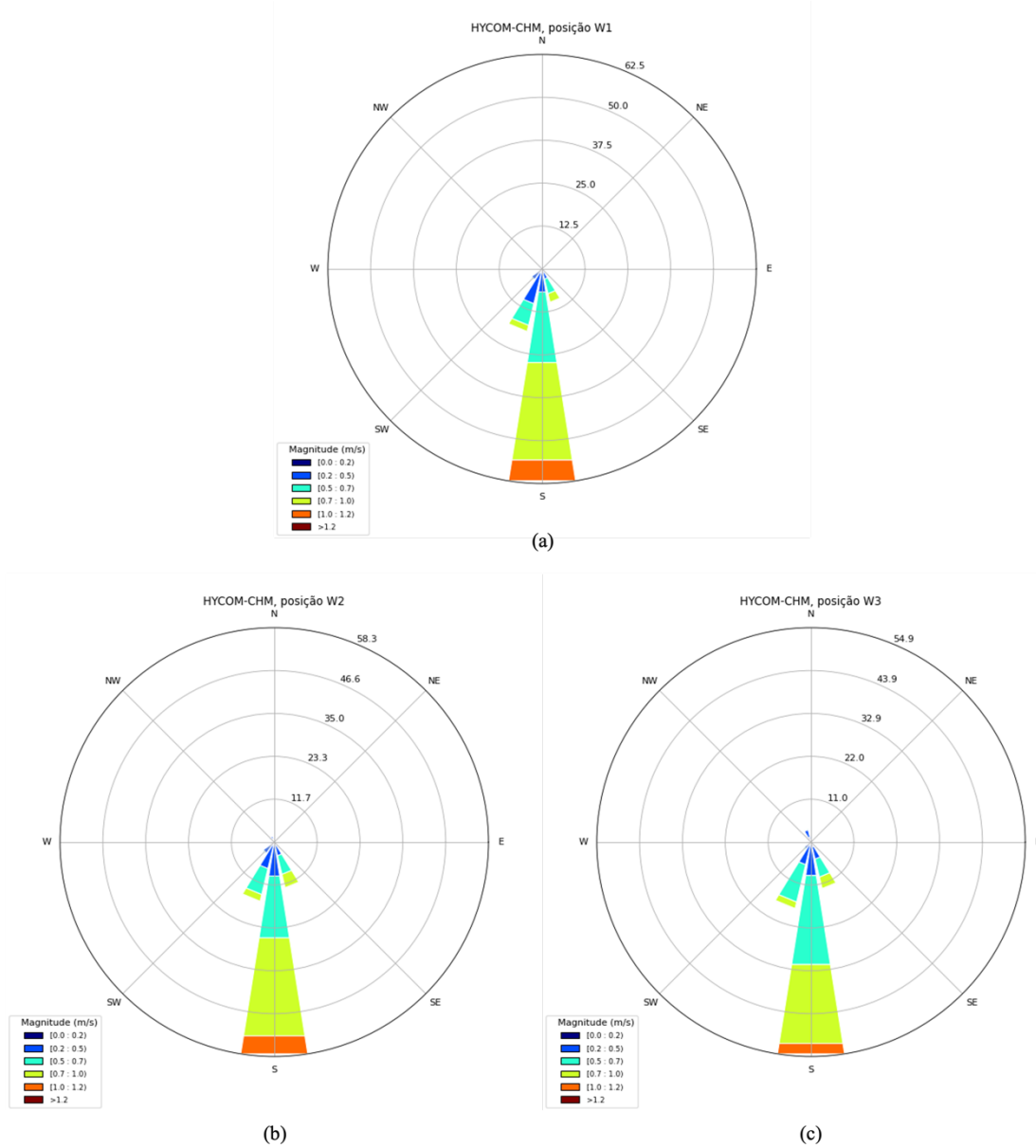
Fonte: O autor.

Figura 19 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos E1 (a), E2 (b) e E3 (c)



Fonte: O autor.

Figura 20 – Histogramas direcionais da corrente oceânica superficial calculada a partir dos dados do modelo HYCOM-CHM para pontos W1 (a), W2 (b) e W3 (c)



Fonte: O autor.