



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

CAROLINA SODRÉ MENDES

**Estudo da previsibilidade de curto-prazo do sistema
HYCOM+RODAS no Atlântico Sul**

Salvador

2018

CAROLINA SODRÉ MENDES

**Estudo da previsibilidade de curto-prazo do sistema
HYCOM+RODAS no Atlântico Sul**

Trabalho de conclusão de curso de graduação em Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Clemente Augusto Souza
Tanajura

Salvador

2018

TERMO DE APROVAÇÃO

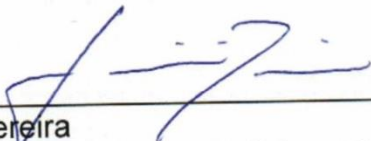
CAROLINA SODRÉ MENDES

**Estudo da previsibilidade de curto-prazo do sistema
HYCOM+RODAS no Atlântico Sul**

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Oceanografia, pela seguinte banca examinadora:



Clemente Augusto Souza Tanajura
Doutor em Meteorologia pela Universidade de Maryland, Estados Unidos
Universidade Federal da Bahia



Janini Pereira
Doutora em Oceanografia física pela Universidade de São Paulo, Brasil
Universidade Federal da Bahia



Prof. Edson Pereira Marques Filho
Doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo, Brasil
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 18 de dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por sempre me apoiarem, por me darem força e ânimo para continuar em frente quando a menor das dificuldades surge e por serem o meu porto seguro.

Ao meu orientador, Prof. Clemente Tanajura, pelo incentivo, paciência e pelos ensinamentos tanto fora quanto dentro da sala de aula.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/MCTIC) pela bolsa de iniciação científica e pela infraestrutura oferecida através do Edital Universal 14/2014 (processo 446528/2014-5), esse trabalho foi também apoiado pela Petrobras e a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) dentro do projeto de pesquisa Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO).

À equipe da REMO pela oportunidade de poder trabalhar com a oceanografia física e por estarem sempre dispostos a ajudar e a tirar minhas dúvidas.

Aos professores do curso por transmitirem seus conhecimentos e experiências em Oceanografia, essenciais para a minha formação acadêmica.

Ao Colegiado de Oceanografia, pelo suporte todas as vezes que precisei.

Agradeço por fim aos meus colegas graduandos, principalmente a turma do meu ano, pois, além dos momentos alegres que me proporcionaram, também aprendi muito com todos.

RESUMO

Este trabalho investigou a previsibilidade de curto-prazo do sistema predictor formado pelo modelo Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) e o sistema de assimilação de dados da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO), chamado de RODAS. A partir da condição inicial produzida pelo sistema HYCOM+RODAS, foram realizadas previsões oceânicas de 9 dias, a cada 3 dias, de 3 de janeiro de 2017 até 29 de dezembro de 2017. Previsões atmosféricas geradas pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP) foram empregadas na previsão do HYCOM+RODAS. O HYCOM foi configurado em duas grades, uma com resolução horizontal de $1/12^\circ$ com ênfase no Atlântico Sul aninhada a outra com $1/4^\circ$ sobre quase todo o Atlântico, ambas com 21 camadas verticais. Um total de 121 previsões foi realizado. As previsões foram avaliadas por meio do cálculo do erro quadrático médio (RMSE) e da correlação do campo previsto com observações considerando o domínio da grade HYCOM $1/12^\circ$. Para isso foram utilizados dados de anomalia da superfície do mar (ASM) do AVISO; perfis verticais de temperatura (T) e salinidade (S) do Argo; e análises de temperatura da superfície do mar (TSM) do OSTIA. Os maiores erros ocorreram no oceano superior, associado à camada de mistura e à termoclina/picnoclina, seguido por uma diminuição gradual dos mesmos com o aumento da profundidade. Na superfície os erros de T e S do HYCOM $1/12^\circ$, em média, foram superiores aos do HYCOM $1/4^\circ$, cerca de $1,0^\circ\text{C}$ e $0,3\text{ psu}$. A média de RMSE para 9 dias de previsão mostrou que o HYCOM $1/12^\circ$ possui erros menores de T/S no fundo do oceano, enquanto que o HYCOM $1/4^\circ$ apresentou RMSE de T/S menor na superfície. O RMSE de ASM e TSM da persistência do HYCOM $1/12^\circ$ – na qual a condição inicial é usada como previsão – apresentou valores 12,5% e 17% maiores que o RMSE da previsão. O erro de TSM da persistência do HYCOM $1/4^\circ$ foi cerca de 3,3% maior que o erro da previsão. Um estudo de caso verificou que o sistema HYCOM+RODAS pode reproduzir com sucesso dois eventos de ressurgência próximos a Cabo Frio (RJ) nos meses de fevereiro e março.

Palavras-chave: HYCOM; RODAS; Oceano Atlântico Sul.

ABSTRACT

This work investigated the predictability of a short-term prediction system of the Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM) and the data assimilation system of the Oceanographic Modeling and Observation Network (REMO), called RODAS. From the initial condition programmed by the HYCOM+RODAS system, the prediction led to the national forecast of 9 days, every 3 days, from January 3, 2017 until December 29, 2017. Atmospheric forecasts generated by the National Center for Environmental Prediction (NCEP) were used in the prediction of HYCOM+RODAS. HYCOM was adapted in two classes, with a horizontal resolution of $1/12^\circ$ with the South Atlantic nestled in another with $1/4^\circ$ over almost the entire Atlantic, both with 21 vertical layers. A total of 121 predictions were made. The predictions were evaluated by means of the calculation of the mean square error (RMSE) and the correlation of the predicted field with observations considering the domain of the HYCOM $1/12^\circ$ grid. For this purpose, the sea level anomaly (SLA) data of AVISO were used; vertical profiles of temperature (T) and salinity (S) of Argo; and sea surface temperature (SST) analyzes of OSTIA. The largest errors occurred in the upper ocean, associated with the mixing layer and the thermocline/pycnocline, followed by a gradual decrease of the same with the increase in depth. At the surface, HYCOM $1/12^\circ$ T and S errors on average were higher than HYCOM $1/4^\circ$, about 1.0°C and 0.3 psu . The mean RMSE for 9-day forecast showed that HYCOM $1/12^\circ$ has lower T/S errors at the bottom of the ocean, while HYCOM $1/4^\circ$ showed lower T/S RMSE at the surface. The SLA and SST persistence RMSE of HYCOM $1/12^\circ$ - in which the initial condition is used as hindcast - presented values 12.5% and 17% higher than the RMSE of the prediction. The SST persistence error of HYCOM $1/4^\circ$ was about 3.3% greater than the prediction error. A case study verified that the HYCOM+RODAS system can successfully reproduce two up-welling events near Cabo Frio (RJ) in the months of February and March.

Keywords: HYCOM; RODAS; South Atlantic Ocean.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de uma bacia oceânica ilustrando os três regimes do oceano com relação a uma coordenada vertical apropriada. A camada de mistura de superfície é representada usando coordenadas de profundidade fixa z , o interior é representado usando coordenadas p isopícnais (rastreamento da densidade potencial) e o limite de fundo é representado usando coordenadas σ de acompanhamento do fundo. Fonte: GRIFFIES et al. *Developments in ocean climate modelling*, 2000, p. 266..... 18

Figura 2. Domínios e subdomínios dos modelos REMO de baixa ($1/4^\circ$) e alta resolução ($1/12^\circ$ e $1/24^\circ$)..... 21

Figura 3. RMSE (a e b) e correlação (c e d) de temperatura ($^\circ\text{C}$) do modelo HYCOM com resolução $1/4^\circ$ (a e c) e resolução $1/12^\circ$ (b e d) para profundidades até 2000 m em relação aos perfiladores Argo no Domínio $1/12^\circ$ ($45^\circ\text{S} - 10^\circ\text{N}$, $68^\circ\text{W} - 18^\circ\text{W}$) de 3 de janeiro de 2017 a 29 de dezembro de 2017, a cada 72 horas. 25

Figura 4. RMSE (a e b) e correlação (c e d) de salinidade (psu) do modelo HYCOM com resolução $1/4^\circ$ (a e c) e resolução $1/12^\circ$ (b e d) para profundidades até 2000 m em relação aos perfiladores Argo no Domínio $1/12^\circ$ de 3 de janeiro de 2017 a 29 de dezembro de 2017, a cada 72 horas. 26

Figura 5. Média de RMSE de temperatura ($^\circ\text{C}$) do modelo HYCOM de resolução $1/4^\circ$ (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias. 29

Figura 6. Média de RMSE de temperatura ($^\circ\text{C}$) do modelo HYCOM de resolução $1/12^\circ$ (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias. 30

Figura 7. Média de RMSE de salinidade (psu) do modelo HYCOM de resolução 1/4° (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias.	31
Figura 8. Média de RMSE de salinidade (psu) do modelo HYCOM de resolução 1/12° (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias.	32
Figura 9. RMSE e correlação de ASM (m) e TSM (°C) médios para os 121 ciclos de 9 dias de previsão da resolução 1/4° .	34
Figura 10. RMSE e correlação de ASM (m) e TSM (°C) médios para os 121 ciclos de 9 dias de previsão da resolução 1/12°. O RMSE da persistência da ASM não é mostrado.	35
Figura 11. Mapas de TSM (°C) durante caso de ressurgência em 15 de fevereiro de 2017. Dados observados do OSTIA para o evento e previsões de 1, 4 e 7 dias da resolução 1/4° .	37
Figura 12. Mapas de TSM (°C) durante caso de ressurgência em 17 de março de 2017. Dados observados do OSTIA para o evento e previsões de 1, 4 e 7 dias da resolução 1/4° .	38
Figura 13. RMSE e correlação de TSM (°C) para 9 dias de previsão do evento de ressurgência nas datas 15/02/2017 (em azul) e 17/03/2017 (em vermelho). A linha pontilhada preta destaca o dia 7 na janela de previsão dos eventos de ressurgência.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Densidade potencial das 21 camadas verticais do modelo..... 20

Tabela 2. Resumo dos 121 ciclos de previsões entre o período de 03/01/2017 a 29/12/2017, nos quais, a cada 3 dias, ocorreu a assimilação dos dados e a previsão numa janela de 9 dias. O mesmo procedimento foi aplicado para as duas resoluções do modelo..... 22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. MÉTODOS	17
3.1. MODELO NUMÉRICO	17
3.2. SISTEMA DE ASSIMILAÇÃO	18
3.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO	19
3.4. AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5. CONCLUSÕES	40
6. REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre a dinâmica e as propriedades físicas do oceano desempenham uma função importante na sociedade, uma vez que o homem se apropria e faz uso de bens e serviços fornecidos pelos mares, como exploração mineral, navegação, pesca, recreação e defesa territorial. Uma compreensão científica do estado médio do oceano, bem como a sua variabilidade e estabilidade a várias formas de perturbações, representam um papel fundamental da oceanografia física e das ciências climáticas (GRIFFIES, 2004).

Para se entender o comportamento e dinâmica dos oceanos, dados observados de temperatura, salinidade, anomalia da altura da superfície do mar são fundamentais. Entretanto, a coleta de dados oceânicos por meio de um sistema de observação global ou medições *in situ*, através de XBTs (batitermográficos descartáveis) e perfiladores Argo e CTDs (*Conductivity Temperature Depth*), não são suficientes para cobrir a extensão dos oceanos. Além disso, o alto custo dos equipamentos dificulta a ampliação dos sistemas observacionais. Uma forma de melhorar a compreensão do estado físico dos oceanos e sua variabilidade é através do uso de modelos numéricos globais ou regionais dos oceanos. As simulações numéricas apresentam relativamente baixo custo operacional quando comparadas ao custo dos sistemas observacionais e possibilitam o estudo de fenômenos envolvidos na circulação oceânica que seriam impossíveis de serem realizados pela inacessibilidade às observações (CIRANO et al., 2006). Logo, a modelagem numérica é extremamente importante para o estudo e compreensão dos processos oceânicos e para complementar as observações.

Os modelos oceânicos também podem ser empregados para previsões ou *hindcasts*, isto é, simulações em modo de previsão, porém realizadas sobre uma data pretérita onde os dados observados para aquele período já estão disponíveis. Portanto, os sistemas de previsão oceânica fornecem informações sobre o estado passado, presente e futuro dos oceanos (MARTIN, 2011), permitindo assim que pesquisadores entendam e prevejam como o oceano se comporta. Temperatura, salinidade, correntes, marés, altura da superfície do mar ou mesmo poluentes são algumas grandezas físicas que podem ser previstas através desses sistemas de previsão oceânica. Seus produtos podem ser

posteriormente utilizados por autoridades reguladoras e de segurança, por agências de gerenciamento marinho e costeiro e pela indústria marítima de petróleo e gás. (MARTA-ALMEIDA et al., 2011).

Embora a modelagem oceânica descreva processos físicos e termodinâmicos no fluido, ela é essencialmente uma aproximação do sistema real. Dessa forma, a relevância das saídas de um modelo depende da sua capacidade em representar os fenômenos oceânicos com precisão. Deficiências na física dos modelos, resolução de grade, condições de contorno lateral e forçantes atmosféricas são fontes de erros comuns em modelos oceânicos (CUMMINGS et al., 2009). Os dados observacionais ajudam a minimizar consideravelmente tais erros e são essenciais para o sistema operacional dos modelos.

As feições oceânicas de mesoescala muitas vezes são geradas por eventos caóticos que evoluem com o tempo, amplificam anomalias e impõem grande dificuldade para serem previstos, porém, com o artifício da assimilação de dados, as observações podem ser usadas para inicializar e restringir tais características imprevisíveis do oceano (OKE et al., 2015). Uma maneira de aprimorar a previsibilidade dos modelos é através da melhoria das condições iniciais.

A condição inicial dos modelos previsores é construída com os métodos de assimilação de dados. A assimilação combina, de forma ótima ou subótima, dados observados *in situ* ou por sensoriamento remoto com saídas de modelos e corrige o estado do modelo na direção das observações. As observações são usadas para restringir o estado do modelo oceânico. Como as informações obtidas tanto por satélites quanto por boias e flutuadores são insuficientes para determinar o estado dos oceanos de forma completa, a assimilação de dados é necessária para combinar todas as observações em um modelo oceânico, criando-se assim uma descrição consistente das características oceânicas em todo o domínio tridimensional configurado no modelo (CHASSIGNET et al., 2009).

A assimilação de dados é uma metodologia sistemática que estima as variáveis do estado oceânico e tem como objetivo produzir os campos de análise mais precisos usando dados combinados de um sistema de observação em um modelo dinâmico (CUMMINGS et al., 2009; ZARON, 2011). Com essa técnica,

o modelo de previsão é forçado a diminuir o distanciamento entre a previsão e a evolução do sistema real, tornando-se mais acurado (*skillful*).

A acurácia (*skill*) de uma previsão pode ser definida como a precisão da previsão em relação à precisão de uma previsão referencial, esta última com base em um campo de referência, como climatologia ou persistência (MURPHY, 1995). A persistência é descrita como uma dependência estatística entre valores sucessivos – baseados em um tempo inicial específico – da mesma variável, ou entre ocorrências sucessivas de um dado evento. Quando a dependência é positiva, indica que valores grandes da variável tendem a ser seguidos por valores relativamente grandes, e valores pequenos da variável tendem a ser seguidos por valores relativamente pequenos (MURPHY, 1992; WILKS, 2005).

Como foi dito anteriormente, a dinâmica dos oceanos é caótica e por esse motivo as simulações são muito sensíveis às condições iniciais. Por esta razão, os modelos devem ser inicializados de forma intermitente e corrigidos usando as observações mais recentes, produzindo previsões confiáveis e em condições que representem, com a maior precisão possível, o estado real do oceano em alta resolução (BRASSEUR, 2006). Uma grande gama de fenômenos oceânicos está contida em eddies de mesoescala. Assim, o estado-da-arte dos modelos emprega resolução espacial turbulenta de $1/10^\circ$ ou maior, a qual é capaz de simular padrões mais realistas considerando mais precisamente as trocas de energia entre meso e larga-escalas (HURLBURT et al., 2009a).

Trabalhos anteriores estudaram o impacto de resoluções *eddy-resolving* (modelos de alta resolução) e *eddy-permitting* (modelos de baixa resolução) na modelagem de correntes, altura da superfície do mar e TSM (HOGAN e HURLBURT, 2000; HURLBURT et al., 1996; HURLBURT e HOGAN, 2000). HURLBURT e HOGAN (2000), por exemplo, investigaram as resoluções $1/8^\circ$, $1/16^\circ$, $1/32^\circ$ e $1/64^\circ$ na simulação da Corrente do Golfo e descobriram que a resolução de $1/16^\circ$ era a mínima para a obtenção de resultados realistas. Houve ainda uma melhoria substancial com o aumento para uma resolução de $1/32^\circ$ e apenas uma melhoria modesta com um aumento adicional para a resolução de $1/64^\circ$. De modo geral, modelos de alta resolução, como o HYCOM $1/12^\circ$, têm uma acurácia maior na dinâmica de interpolação, e na previsão, do que modelos de baixa resolução, como o HYCOM $1/4^\circ$. A habilidade previsor dos modelos

de alta resolução é capaz de em preencher com maior precisão as lacunas de tempo entre as observações, converte melhor os campos de superfície observados numa estrutura de subsuperfície, ajuda a converter as melhores forçantes atmosféricas observadas em respostas oceânicas utilizáveis e ajuda a aplicar topografia de fundo, geometria costeira e a superfície oceânica como restrições físicas e dinâmicas com camadas limites associadas (HURLBURT et al., 2009).

O projeto *Global Ocean Data Assimilation Experiment* (GODAE) foi criado em 1998 para definir, monitorar e promover ações em oceanografia operacional global por comunidades internacionais. Dentro do prazo estipulado de 10 anos, sistemas de observação remota e *in situ* desenvolveram-se o suficiente para possibilitar a observação global e em tempo real assim como a simulação por supercomputadores em alta resolução (BELL et al., 2009). O programa continuou sob o nome *GODAE Ocean View* (GOV), de 2009 até o presente, e, com novas atividades, forneceu a base para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de previsão e análises globais e regionais (BELL et al., 2015). O GODAE e o GOV permitiram o maior desenvolvimento e uso de diferentes métodos de assimilação de dados em vários países, desde esquemas relativamente simples, como Interpolação Ótima, até esquemas mais sofisticados, como técnicas variacionais tri e quadri-dimensionais e de filtros de Kalman por conjunto. (BELL et al., 2015; CUMMINGS et al., 2009).

Em colaboração com outras instituições operacionais sob o programa GOV, um sistema brasileiro de assimilação de dados foi desenvolvido e consolidado através da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO): RODAS (REMO *Ocean Data Assimilation System*). A REMO possui associação com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a Universidade Federal da Bahia (UFBA), o Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES) e o Centro Hidrográfico da Marinha do Brasil (CHM) (www.rederemo.org) (LIMA et al., 2013; TANAJURA et al., 2013, 2014). Esse sistema assimila dados de anomalia da superfície do mar (ASM) coletados por satélites, temperatura da superfície do mar (TSM) e perfis verticais de temperatura (T) e salinidade (S) de perfiladores Argo e CTDs. A REMO é um esforço para desenvolver um modelo oceânico numérico capaz de fornecer

previsões oceanográficas para plataforma/talude continental do Brasil para apoiar operações de busca e salvamento, segurança da navegação, indústria pesqueira e atividades da indústria petrolífera. (LIMA et al., 2013; MARTA-ALMEIDA et al., 2011).

A REMO emprega o modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), cuja configuração de aninhamento inclui uma grade com 1/4° de resolução horizontal cobrindo o Oceano Atlântico, uma versão com 1/12° cobrindo a chamada Metarea V (de 36°S a 10°N, de 20°W até a costa do Brasil) e outra com 1/24° com ênfase às regiões ao largo da costa S-SE do Brasil. Todas as resoluções, na configuração atual, empregam 21 camadas verticais. Entretanto, uma nova versão do sistema aninhado está em desenvolvimento e empregará 1/12° sobre todo o Oceano Atlântico com 32 camadas verticais e uma grade com 1/24° em regiões ao largo da costa brasileira ou em toda a Metarea V.

Dentro da Metarea V o fenômeno oceânico da ressurgência costeira é bastante estudado (AGUIAR et al., 2014; CALADO et al., 2010; CASTELAO e BARTH, 2006). Particularmente, ele é observado com forte intensidade na região ao largo de Cabo Frio (RJ) e Cabo de São Tomé (RJ). Como o processo de ascensão de águas mais frias e ricas em nutrientes para as camadas superficiais favorece a produção primária, esse fenômeno é capaz de tornar o local da ressurgência uma importante zona pesqueira.

Ao longo da costa brasileira, a cidade de Cabo Frio apresenta os casos de ressurgência mais frequentes e de maior intensidade, onde as águas locais chegam a ser 10 °C mais frias que as águas da Corrente do Brasil (CASTELLO e KRUG, 2015; RODRIGUES e LORENZZETTI, 2001). Isso ocorre por causa da orientação na direção leste-oeste da linha de costa em Cabo Frio, permitindo que os ventos gerados pelo sistema de alta pressão sobre o Atlântico Sul subtropical tenham suas componentes quase paralelas à costa, o que propicia a ressurgência (PETERSON e STRAMMA, 1991; SOUTELINO e MIRANDA, 2013). Os eventos de ressurgência costumam acontecer nos períodos de primavera e verão, quando os ventos de E-NE são mais atuantes e, conseqüentemente, mais favoráveis ao afloramento da Água Central do Atlântico Sul (CARBONEL, 1998; SOUTELINO e MIRANDA, 2013; STRAMMA e ENGLAND, 1999). Outros trabalhos também mostraram que a interação da Corrente do Brasil com a

topografia da plataforma continental, assim como os seus meandramentos, podem causar ou intensificar esse fenômeno (CALADO et al., 2010; RODRIGUES e LORENZZETTI, 2001; SOUTELINO e MIRANDA, 2013).

No grupo da REMO, um trabalho preliminar avaliou a previsibilidade do sistema HYCOM+RODAS, o qual foi forçado com análises atmosféricas (CARVALHO et al., 2018). Esse trabalho foi baseado nos resultados da monografia de final de curso de Bacharelado em Oceanografia da UFBA "Avaliando a previsibilidade estendida do HYCOM com o sistema de assimilação de dados da REMO (RODAS) no Oceano Atlântico Sul", por Júlia Porto Silva Carvalho, orientada por Prof. Clemente A. S. Tanajura. Nesse estudo as previsões de TSM e ASM foram geradas e avaliadas para o período de 30 dias, mostrando que o sistema implementado é capaz de prever o estado termohalino do oceano por mais de um mês.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é estudar a sua previsibilidade na escala de tempo de dias e apoiar o desenvolvimento do sistema previsor operacional da REMO. Particularmente, o sistema operacional da REMO é abrigado pelo CHM onde desde 2010 é realizada previsão de 4 e 5 dias todos os dias. No presente trabalho, o sistema que será avaliado será o sistema quase-operacional integrado na UFBA durante o ano de 2017.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Realizar previsões oceânicas de 9 dias, a cada 3 dias, ao longo do ano de 2017 e a partir da condição inicial produzida pelo RODAS. Integrar o modelo HYCOM numa resolução baixa ($1/4^\circ$) e numa resolução alta ($1/12^\circ$).
- ii) Calcular o erro quadrático médio (RMSE) e a correlação do campo previsto com observações e comparar os resultados das duas resoluções do modelo.
- iii) Investigar um estudo de caso na costa sul e sudeste do Brasil, com foco no sistema de ressurgência

Mais detalhes do sistema previsor serão oferecidos em seguida.

3. MÉTODOS

3.1. MODELO NUMÉRICO

O HYCOM é uma versão de coordenadas híbridas do MICOM (*Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model*) e, assim como seu predecessor, é um modelo de equações primitivas que contém cinco equações prognósticas: duas para componentes de velocidade horizontal, uma equação de continuidade e duas equações de conservação para um par de variáveis termodinâmicas, como sal e temperatura ou sal e densidade (BLECK, 2002). O HYCOM é um modelo de circulação que adota uma abordagem híbrida de discretização vertical, com o uso de diferentes coordenadas verticais em regiões diferentes do oceano, e permite que as superfícies coordenadas ajustem livremente o espaçamento vertical para simplificar a implementação numérica de vários processos físicos (CHASSIGNET et al., 2006, 2007; XIE e ZHU, 2010). O uso de coordenadas híbridas é recomendado principalmente por causa da degeneração que ocorre na representação de coordenadas isopícnais (ρ) em colunas de água não estratificadas ou convectivamente instáveis e se mostra vantajoso ao permitir uma transição suave do oceano profundo para os regimes costeiros (BLECK, 2002; CHASSIGNET, 2011). O HYCOM faz uma transição dinâmica suave entre os tipos de coordenadas ao escolher, a cada etapa de tempo, a distribuição ideal entre os três tipos de abordagens diferentes combinados no modelo: camadas isopícnais (de mesma densidade ρ) para o oceano estratificado profundo, camadas em níveis z com profundidades fixas e constantes em regiões de pouca estratificação, como a camada de mistura, nas proximidades da superfície, e camadas σ para regiões de grande variação topográfica, como nas áreas costeiras rasas (CHASSIGNET, 2011; CHASSIGNET et al., 2006; GRIFFIES et al., 2000). GRIFFIES et al. (2000) ilustrou os três regimes do oceano que precisam ser considerados para a discretização vertical nos três diferentes tipos de coordenadas citadas anteriormente (Figura 1).

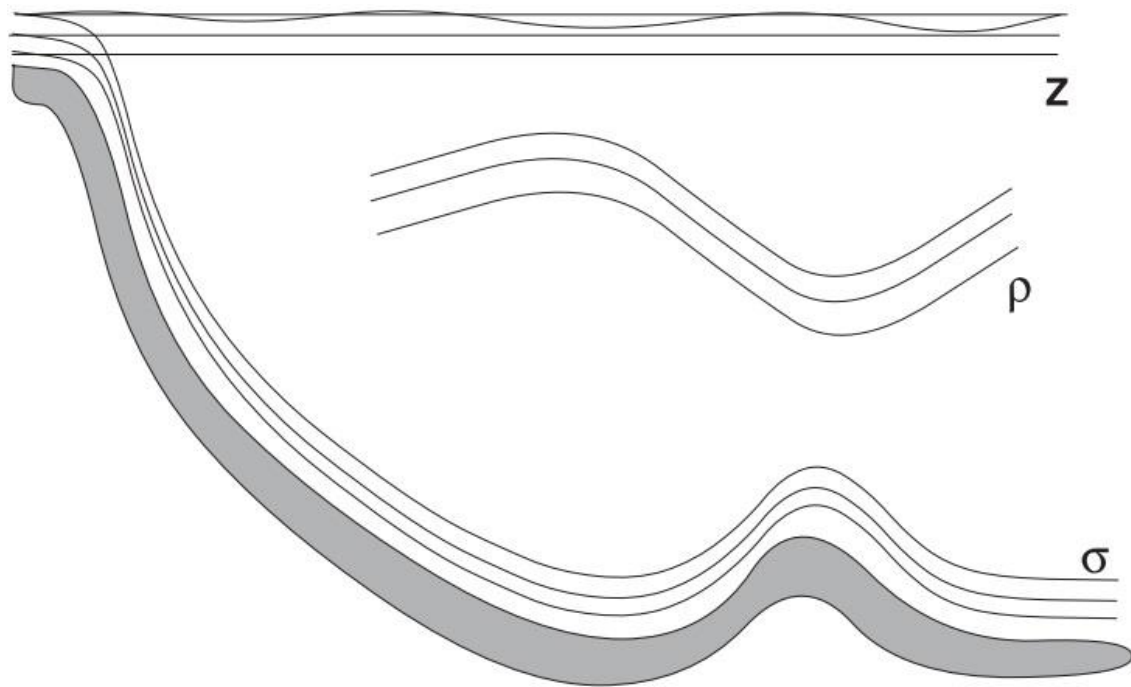


Figura 1. Esquema de uma bacia oceânica ilustrando os três regimes do oceano com relação a uma coordenada vertical apropriada. A camada de mistura de superfície é representada usando coordenadas de profundidade fixa z , o interior é representado usando coordenadas ρ isopícnais (rastreamento da densidade potencial) e o limite de fundo é representado usando coordenadas σ de acompanhamento do fundo. Fonte: GRIFFIES et al. *Developments in ocean climate modelling*, 2000, p. 266.

3.2. SISTEMA DE ASSIMILAÇÃO

O sistema HYCOM+RODAS utiliza o esquema de assimilação de dados *Ensemble Optimal Interpolation* (EnOI), originado a partir do *Ensemble Kalman Filter* (EnKF). Métodos de interpolação ótima apresentam estimativas da matriz de covariância dos erros da previsão usando um conjunto de estados do modelo que foram amostrados durante uma integração de longo tempo (EVENSEN, 2003).

O EnOI pode ser descrito pelas seguintes equações (EVENSEN, 2003; MIGNAC et al., 2015; XIE; ZHU, 2010):

$$X^a = X^b + K(Y - HX^b) \quad (1)$$

$$K = \frac{\alpha(\sigma \circ B)H^T}{\alpha H(\sigma \circ B)H^T + R} \quad (2)$$

$$B = \frac{A'A'^T}{N-1} \quad (3)$$

Na Equação (1) temos que X^a é a análise, X^b é o *background* do modelo (previsão do estado oceânico sem a assimilação de dados), K é a matriz de ganho, Y é o vetor das observações e HX^b é a projeção do *background* para o espaço de observação, onde H é o operador observacional. O termo $(Y - HX^b)$ é chamado de vetor de inovação e o termo $K(Y - HX^b)$ é o incremento da análise. A matriz de ganho K é calculada a partir da Eq. (2), onde B é a matriz de covariância dos erros do modelo e R é a matriz de covariância dos erros observacionais. O termo α é um escalar que pode ajustar a magnitude do erro do modelo em relação às observações, sendo que $\alpha \in (0,1]$. O termo σ é o operador de localização aplicado em B por meio do operador de multiplicação de Schur, representado pelo símbolo \circ . Na Eq. (3), A' é um conjunto de anomalias do modelo e N é o tamanho do conjunto.

3.3. CONFIGURAÇÃO DO MODELO

O HYCOM foi configurado em duas grades: uma grade horizontal de 733 x 601 pontos nas direções meridional e zonal, respectivamente, com uma resolução espacial de aproximadamente $0,08^\circ$ para a região do domínio $1/12^\circ 45^\circ\text{S} - 10^\circ\text{N}$, $68^\circ\text{W} - 18^\circ\text{W}$, e uma grade horizontal de 760 x 480 pontos com uma resolução espacial de aproximadamente $0,25^\circ$ para a região do domínio $1/4^\circ 78^\circ\text{S} - 50^\circ\text{N}$, $98^\circ\text{W} - 21^\circ\text{E}$, mas sem considerar o Oceano Pacífico e o Mar Mediterrâneo. Ambas configurações contêm a Metarea V. A Metarea V está sob a responsabilidade da Marinha do Brasil, esta fornece informações meteoceanográficas referentes ao Oceano Atlântico Sul que abrange a região entre as latitudes $35,5^\circ\text{S}$ a 7°N e longitudes de 55°W a 20°W (Figura 2), e corresponde a uma das áreas de divisão global dos oceanos para fins de segurança de navegação (LIMA et al., 2013). O domínio vertical para as duas grades foi dividido em 21 camadas e as densidades potenciais de cada camada são mostradas na Tabela 1 (MIGNAC et al., 2015).

Tabela 1. Densidade potencial das 21 camadas verticais do modelo.

Camada	Densidade potencial	Camada	Densidade potencial	Camada	Densidade potencial
1	19,50	8	24,70	15	27,22
2	20,25	9	25,28	16	27,38
3	21,00	10	25,77	17	27,52
4	21,75	11	26,18	18	27,64
5	22,50	12	26,52	19	27,74
6	23,25	13	26,80	20	27,82
7	24,00	14	27,03	21	27,88

As previsões oceânicas avaliadas no presente trabalho foram realizadas pelo grupo da REMO na UFBA em regime quase-operacional. As previsões foram realizadas na máquina SGI Rackable Cluster da REMO localizada no Centro de Processamento de Dados da UFBA. A máquina possui 13 nós de processamento, cada um com 16 processadores de 2,2 GHz e 128 GB de memória. Figuras com os campos previstos estão disponibilizados na página da REMO www.rederemo.org.

O processo de previsão oceânica envolveu o uso dos campos atmosféricos previstos de temperatura do ar a 2 m, umidade específica do ar a 2 m, ventos a 10 m, fluxos de radiação de onda curta e onda longa e precipitação de 6 em 6 horas produzidos pelo *Global Forecast System (GFS)* do *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* na janela de previsão atmosférica de 9 dias; captura de dados de TSM do *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA)* do UK MetOffice; captura de dados de ASM pelos satélites Jason-1, Jason-2 e Envisat processados pelo sistema AVISO (*French Archiving, Validation et Interpretation des données des Satellites Océanographique*); e captura de dados de perfis verticais de temperatura e salinidade até 2000 m de profundidade do sistema Argo. A assimilação de TSM, ASM e perfis T/S ocorrem separadamente. Primeiramente, às 00 UTC, a TSM é assimilada e três horas

depois os perfis T/S são assimilados para a correção da estrutura termohalina do modelo. Às 06 UTC ocorre a assimilação de ASM. Esse ciclo se realiza a cada 3 dias na máquina da REMO em regime quase-operacional.

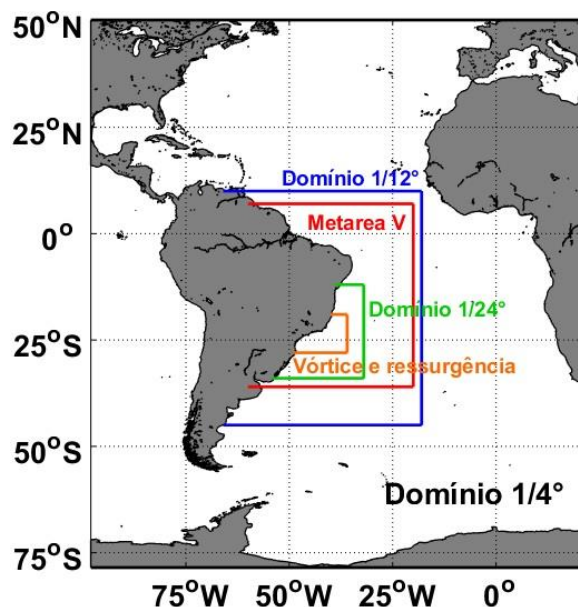


Figura 2. Domínios e subdomínios dos modelos REMO de baixa ($1/4^\circ$) e alta resolução ($1/12^\circ$ e $1/24^\circ$).

3.4. AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES

Para averiguar a previsibilidade de curto-prazo do sistema HYCOM+RODAS os modelos *eddy-permitting* (resolução horizontal correspondente a $1/4^\circ$) e *eddy-resolving* ($1/12^\circ$) foram integrados para o período de um ano (de 3 de janeiro de 2017 a 29 de dezembro de 2017). A cada 3 dias a assimilação dos dados foi realizada tanto no HYCOM $1/12^\circ$ como no $1/4^\circ$ e forneceu a condição inicial para que os modelos produzissem as previsões de 9 dias, ou seja, no dia 03/01/2017 às 00UTC o modelo assimilou dados de TSM, às 03 UTC assimilou perfis T/S e às 06 UTC assimilou, por fim, dados de ASM, como dito anteriormente. Após a última assimilação os modelos foram integrados por 9 dias, gerando previsões até o dia 12/01. Um novo ciclo se iniciou no dia 06/01, gerando previsões até o dia 15/01 e assim sucessivamente até a data 29/12/2017, como é exemplificado na Tabela 2. Ao todo foram produzidos 121 ciclos de previsões. Paralelamente, foram rodadas previsões nas quais a condição inicial foi mantida fixa em toda a janela de previsão (persistência) para que dessa maneira seja possível avaliar

se o modelo insere, ao longo das previsões, viés de aumento nas variáveis investigadas.

Tabela 2. Resumo dos 121 ciclos de previsões entre o período de 03/01/2017 a 29/12/2017, nos quais, a cada 3 dias, ocorreu a assimilação dos dados e a previsão numa janela de 9 dias. O mesmo procedimento foi aplicado para as duas resoluções do modelo.

Data da condição inicial	Horário (UTC)	Assimilação	Data da previsão final
	00	TSM	
03/01/2017	03	T/S	12/01/2017
	06	ASM	
	00	TSM	
06/01/2017	03	T/S	Integração: 9 dias de previsão
	06	ASM	15/01/2017
	00	TSM	
09/01/2017	03	T/S	18/01/2017
	06	ASM	
Ciclos correspondentes ao período de 12/01/2017 a 26/12/2017			
	00	TSM	
29/12/2017	03	T/S	Integração: 9 dias de previsão
	06	ASM	07/01/2018

As saídas dos modelos foram avaliadas objetivamente por meio do cálculo do erro quadrático médio (RMSE) e da correlação (CORR) com os dados observacionais do Argo, AVISO e OSTIA. As avaliações das duas resoluções do modelo foram realizadas para o domínio 1/12° 45°S – 10°N, 68°W – 18°W, correspondente ao Domínio 1/12° (Figura 2).

Nas equações (4) e (5) temos as fórmulas empregadas no cálculo do RMSE e da correlação, onde $y_i, i = 1, \dots, N$, é um conjunto de dados de verificação com N observações, de valor médio igual a \bar{y} e $x_i, i = 1, \dots, N$, é o valor do modelo no mesmo tempo e local que as observações e tem valor médio igual a \bar{x} (MARTIN, 2011).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 / N} \quad (4)$$

$$\text{CORR} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

Um estudo de caso foi realizado em uma área próxima a Cabo Frio (23 °S) para investigar a capacidade do sistema HYCOM+RODAS em prever um fenômeno oceânico de mesoescala. Foram estudados dois eventos de ressurgência costeira, no domínio 19 °S – 28 °S, 36 °W – 49 °W, com relação aos campos de TSM do OSTIA. Os afloramentos selecionados ocorreram nas datas 15 de fevereiro de 2017 e 17 de março de 2017. O desenvolvimento do fenômeno ao longo do tempo foi acompanhado em três ciclos de previsões diferentes do HYCOM 1/4°: (i) a primeira previsão correspondeu a 24 horas (do dia 14/02 para o dia 15/02 e, paralelamente, do dia 16/03 para o dia 17/03); (ii) a segunda previsão de 96 h (do dia 11/02 ao dia 15/02 e do dia 13/03 ao dia 17/03); (iii) a terceira previsão foi de 168 h, o equivalente uma previsão de sete dias à frente (do dia 08/02 ao dia 15/02 e, para março, do dia 10/03 ao dia 17/03). Os campos de TSM foram plotados para cada período de previsão (e persistência), assim como cada dia correspondente ao dado observado. O RMSE e a correlação foram calculados para sete dias e mais dois dias, completando a janela de 9 dias de previsão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal critério usado para a avaliação da previsão produzida pelo sistema HYCOM+RODAS foi através do cálculo do erro quadrático médio (RMSE) para TSM, ASM e T/S com relação ao OSTIA, AVISO e Argo, respectivamente.

Nas Figuras 3 e 4 temos uma visão geral do erro e da correlação de T e S ao longo da coluna d'água para todo o ano de 2017 em relação aos dados do Argo, para previsões de 72 horas. O RMSE e a correlação de T e S das resoluções 1/12° e 1/4° foram calculados considerando as saídas diárias e as observações diárias de cada previsão de 9 dias desde a superfície até a profundidade de 2000 metros durante o período de 03/01/2017 a 29/12/2017. Em subsuperfície, o RMSE de T da resolução 1/12° foi superior ao da resolução 1/4°, sendo, respectivamente, 1,2 °C e 1,0 °C. O erro da resolução 1/4° aumentou 0,20 °C nos meses de novembro e dezembro. No fundo, o erro da resolução 1/12° foi praticamente constante e igual a 0,10 °C, enquanto que para a resolução 1/4° o erro variou entre 0,40 e 0,90 °C. O menor valor do erro produzido pela resolução de 1/4° foi de 0,30 °C em 1250 m. Para os as duas resoluções a correlação foi positiva até aproximadamente 1000 m de profundidade. Em subsuperfície a resolução 1/4° obteve correlação de 0,66 e a partir de 500 m diminuiu para 0,50 e atingiu valores negativos abaixo de 1000 m, aproximadamente. A correlação da resolução 1/12° foi de 0,82 até aproximadamente 1250 m, profundidade a partir da qual a correlação passou a variar entre valores negativos e 0,34. Assim, pode-se afirmar que a correlação do HYCOM 1/12° com dados de T do Argo foi substancialmente melhor que a do HYCOM 1/4° em toda a coluna até 2000 m.

O RMSE de S do HYCOM 1/4° variou entre 0,20 e 0,50 psu na superfície e em dezembro houve casos de erro igual a 0,50 psu em subsuperfície. A partir de 500 m o erro diminuiu para 0,10 psu. No HYCOM 1/12°, a maioria dos meses obteve erro igual a 0,20 psu nos primeiros 250 m e, a partir de 500 m o erro diminuiu para 0,10 e 0,05 psu no fundo. A correlação de S também foi maior para o HYCOM 1/12° do que para o HYCOM 1/4°, com valores iguais a 0,90 da superfície à profundidade de 1000 m. A correlação de S do HYCOM 1/4° variou entre de 0,20 e 0,90 até 500 m e, no fundo, variou entre 0,20 e 0,40. Não ocorreu casos de correlação de S negativa para nenhuma das resoluções.

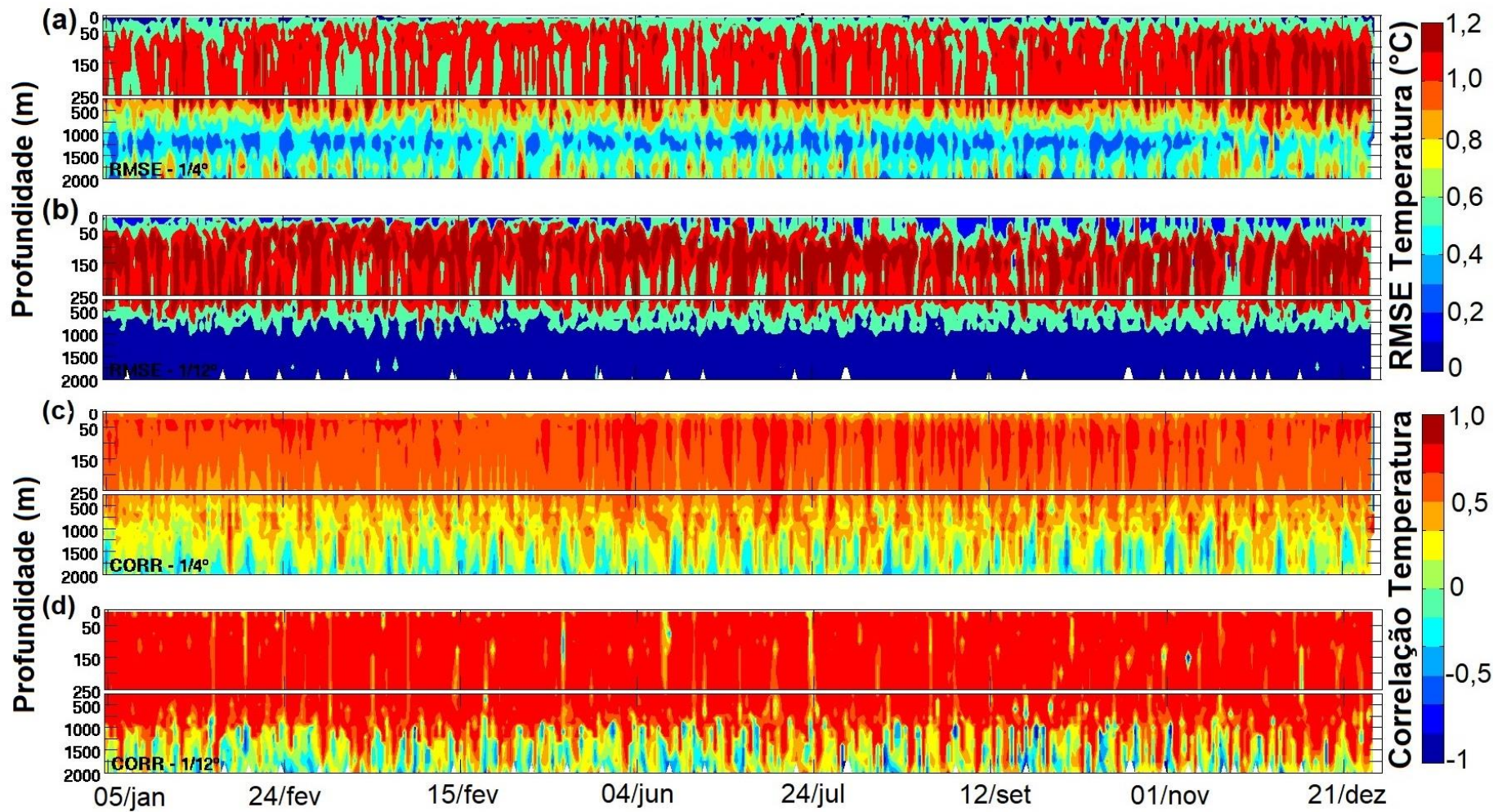


Figura 3. RMSE (a e b) e correlação (c e d) de temperatura (°C) do modelo HYCOM com resolução 1/4° (a e c) e resolução 1/12° (b e d) para profundidades até 2000 m em relação aos perfiladores Argo no Domínio 1/12° (45°S – 10°N, 68°W – 18°W) de 3 de janeiro de 2017 a 29 de dezembro de 2017, a cada 72 horas.

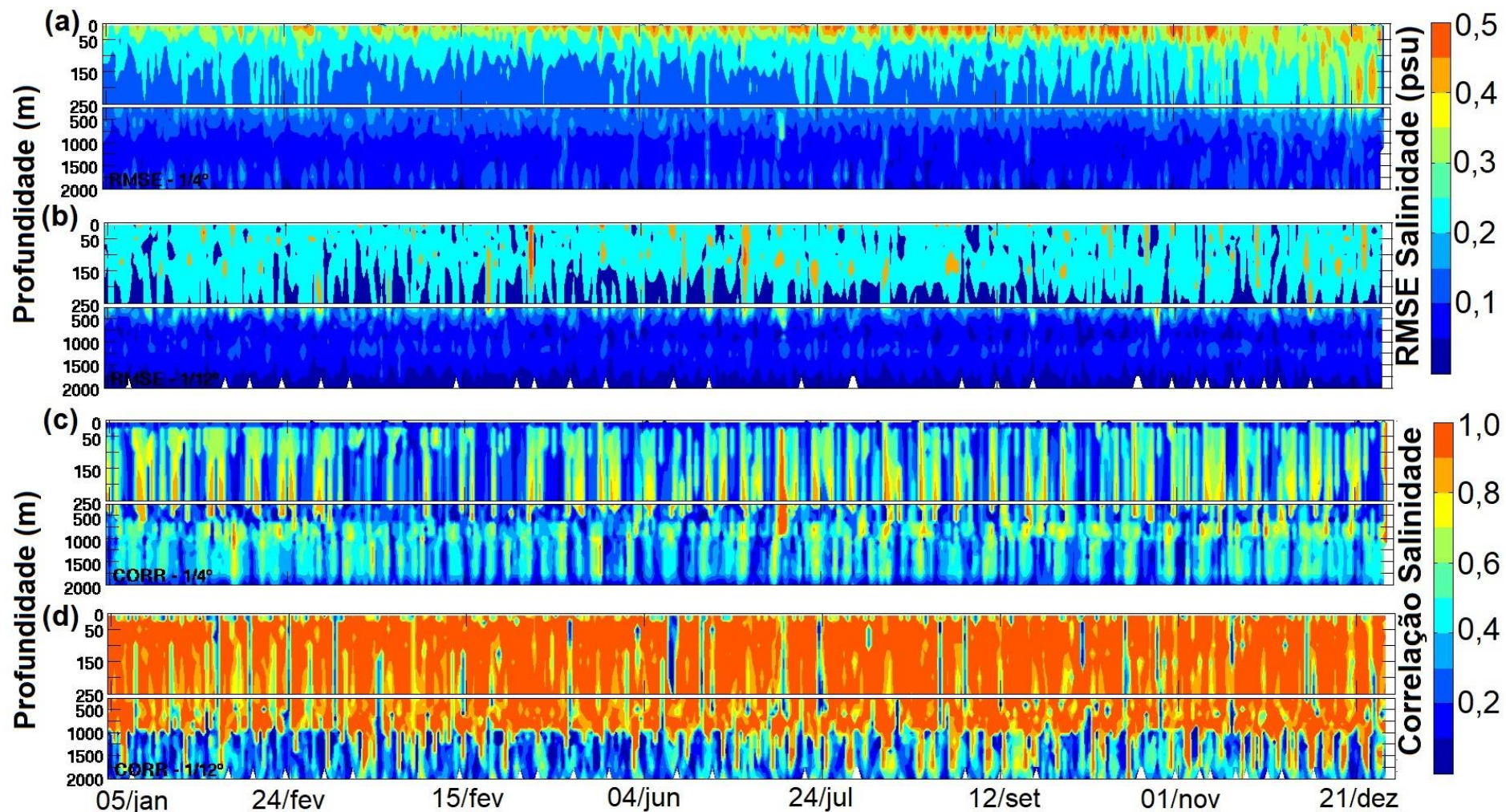


Figura 4. RMSE (a e b) e correlação (c e d) de salinidade (psu) do modelo HYCOM com resolução 1/4° (a e c) e resolução 1/12° (b e d) para profundidades até 2000 m em relação aos perfiladores Argo no Domínio 1/12° de 3 de janeiro de 2017 a 29 de dezembro de 2017, a cada 72 horas.

De modo geral, o HYCOM 1/12° apresentou RMSEs de T e S menores no fundo do oceano, enquanto que para o HYCOM 1/4° esses erros foram menores em superfície e subsuperfície. O HYCOM 1/12° também atingiu correlação maior com os dados do Argo, tanto para a T quanto para a S, ou seja, o modelo configurado para a grade de alta resolução foi capaz de prever melhor as tendências de aumento ou diminuição de T e S, quando comparado às previsões do modelo configurado para a grade de resolução menor.

Em ambas as resoluções os maiores erros ocorreram no oceano superior. Por outro lado, com o aumento da profundidade, houve a diminuição gradativa dos mesmos até o oceano profundo. Como exemplo, o HYCOM 1/12°, nos primeiros 500 m, variou 0,90 °C e 0,21 psu, enquanto que nos níveis mais profundos a variação foi de 0,40 °C e 0,05 psu. Esse mesmo comportamento é observado no modelo de resolução 1/4°: na superfície, a variação de temperatura foi de 0,45 °C e de 0,35 psu para a S; no fundo, a temperatura passou a variar 0,35 °C e a salinidade 0,10 psu. A ocorrência de erros maiores no oceano superior e a diminuição gradual dos erros com a profundidade está relacionada à presença da camada de mistura e da termoclina/picnoclina (DIVAKARAN et al., 2015). A camada de mistura tem sua dinâmica regida principalmente pela superfície, através dos fluxos de calor e de massa e da tensão de cisalhamento do vento. Já a termoclina/picnoclina é caracterizada pela alta taxa de decréscimo da temperatura/densidade com a profundidade. Tais estruturas verticais do oceano superior estão sempre presentes em baixas e médias latitudes entre 200 e 1000 m (TALLEY et al., 2011) e destoam da baixa variabilidade do oceano profundo.

As Figuras 5, 6, 7 e 8 apresentam a média da evolução do RMSE de temperatura e salinidade da previsão (*hindcast*) e da persistência nos 500 m superiores do oceano para os 121 ciclos de 9 dias de previsão. Nas duas resoluções o maior erro de temperatura ocorreu na profundidade de 100 m, em dias distintos de previsão. No quarto dia (previsão de 96 horas) o modelo configurado com alta resolução obteve erro máximo de 1,85 °C, enquanto que o modelo configurado com menor resolução teve seu erro máximo igual a 1,28 °C, apenas no oitavo dia de previsão (192 horas). Para a salinidade esse aspecto foi contrário: o maior RMSE de salinidade (0,41 psu) foi atingido pelo modelo integrado com menor resolução e no terceiro dia de previsão. O HYCOM 1/12° apresentou 0,31 psu

no quinto dia de previsão. Tanto para a temperatura quanto para a salinidade o RMSE da persistência foi superior ao RMSE da previsão para o HYCOM 1/4°.

Contudo, ao contrário do que se esperava o erro da previsão evoluiu mais rápido que a persistência nas duas resoluções. Por exemplo, na saída do HYCOM 1/4°, o erro da previsão de salinidade chegou a 0,31 psu no quinto dia de previsão, sendo que o erro da persistência alcançou o mesmo valor no oitavo dia de previsão. É importante ressaltar que esse padrão anômalo aconteceu na superfície. Como foi dito anteriormente, essa região está mais suscetível a erros devido à grande variação de propriedades físicas do mar em poucos metros de coluna d'água. Ainda deve-se levar em consideração possíveis erros oriundos das medições dos equipamentos ou mesmo erros originados pelo GFS, como a incidência de radiação de onda curta e/ou longa e precipitação, influenciando na geração da condição inicial ideal. Entretanto, sabe-se que essa configuração do HYCOM 1/12° e do HYCOM 1/4° apresenta rodadas livres com viés quente em grande parte do domínio (MIGNAC et al., 2015). Dessa forma, mesmo com uma boa condição inicial, o modelo em modo de previsão desenvolve esse viés quente. Isso reduz sua capacidade previsora e deve ser sanado para que o sistema HYCOM+RODAS melhore sua previsibilidade.

Os perfis verticais mostraram que no HYCOM 1/4°, o erro da persistência de T é aproximadamente 2% maior do que o erro da previsão de T e, para a S, o erro da persistência foi aproximadamente 15% maior do que o erro da previsão. No HYCOM 1/12°, o erro da persistência de T é aproximadamente 1% maior que o erro da previsão. Para a S o erro da persistência foi aproximadamente 3,2% maior do que o erro da previsão.

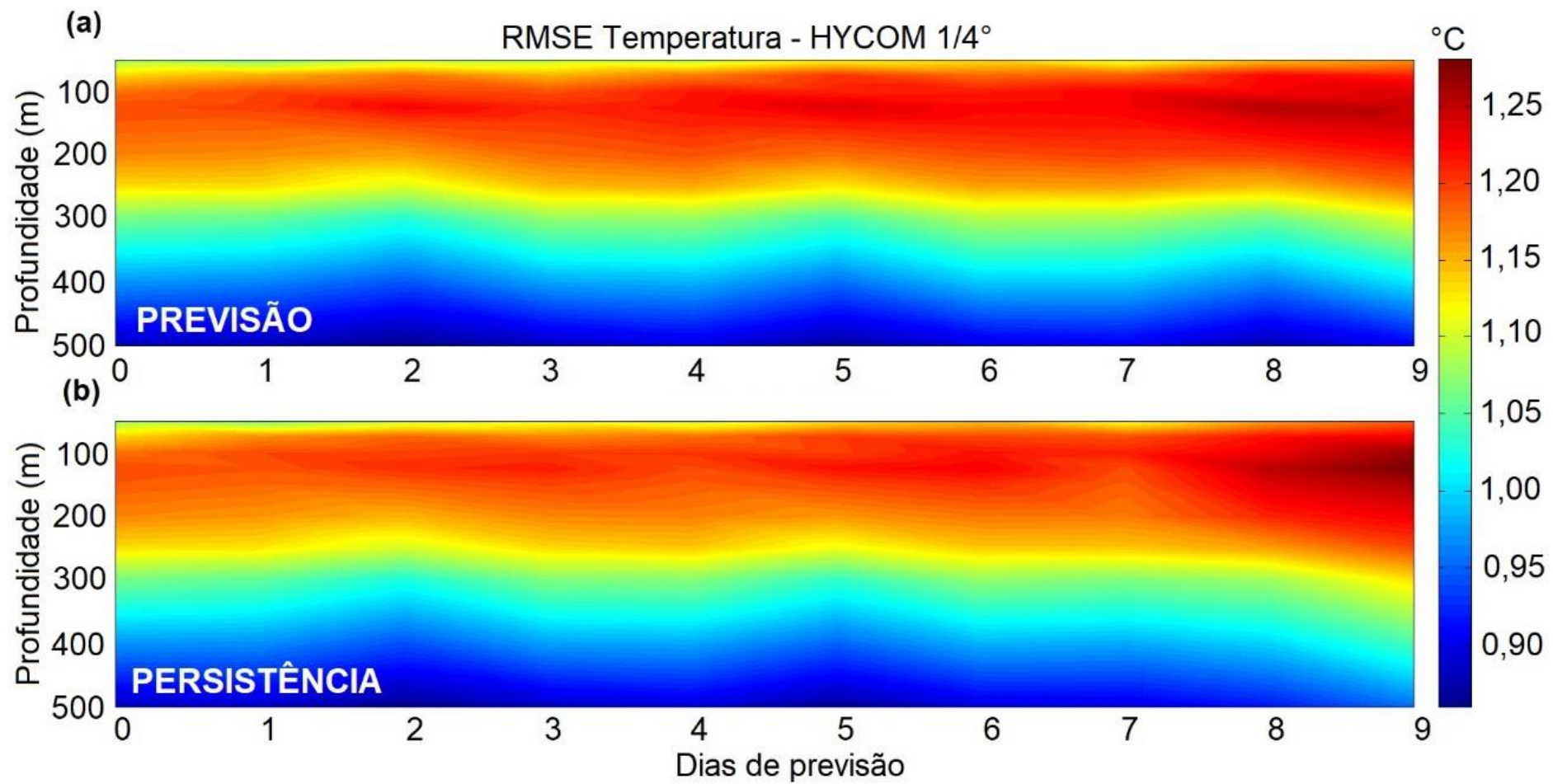


Figura 5. Média de RMSE de temperatura (°C) do modelo HYCOM de resolução 1/4° (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias.

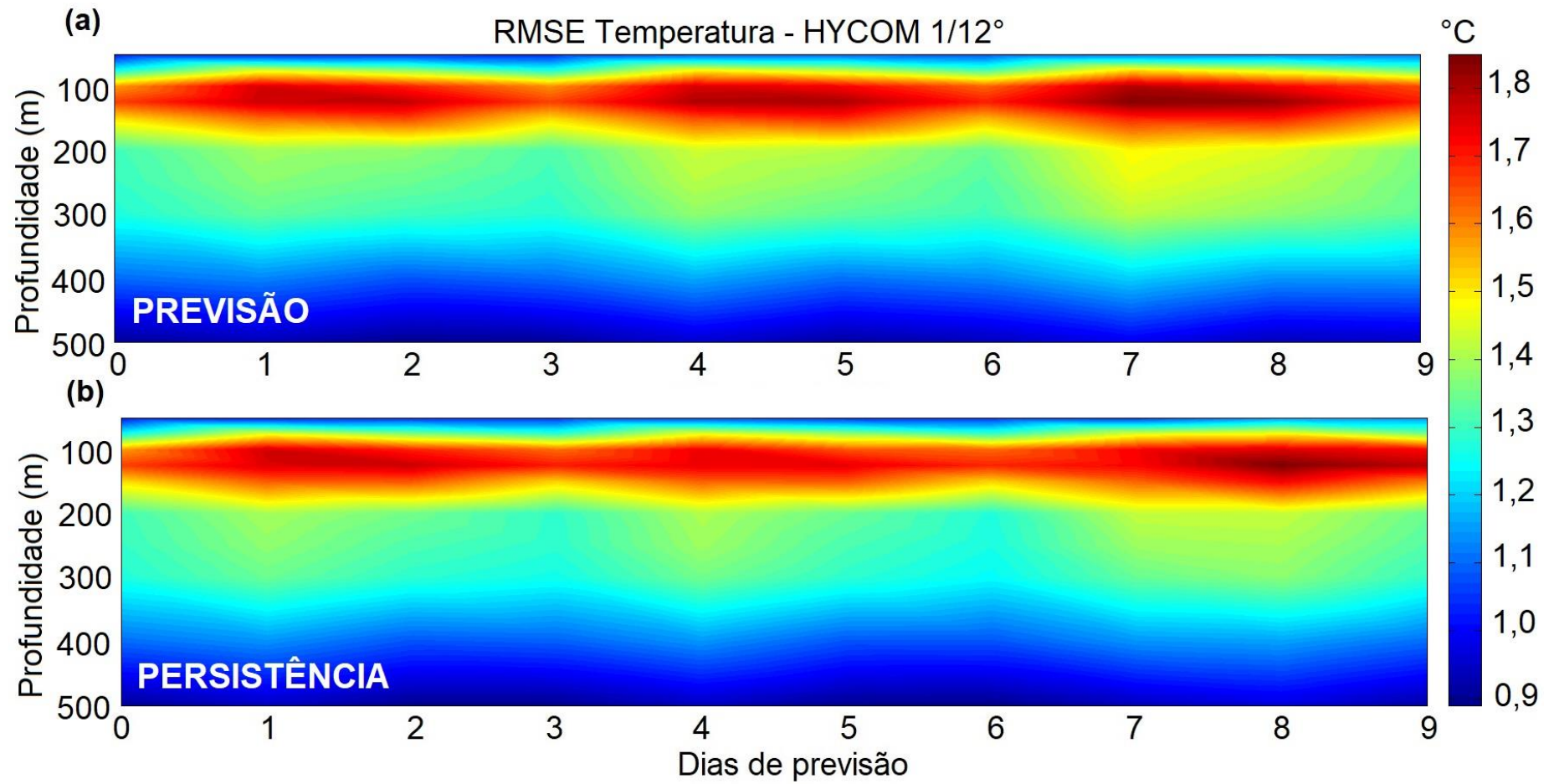


Figura 6. Média de RMSE de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do modelo HYCOM de resolução $1/12^{\circ}$ (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias.

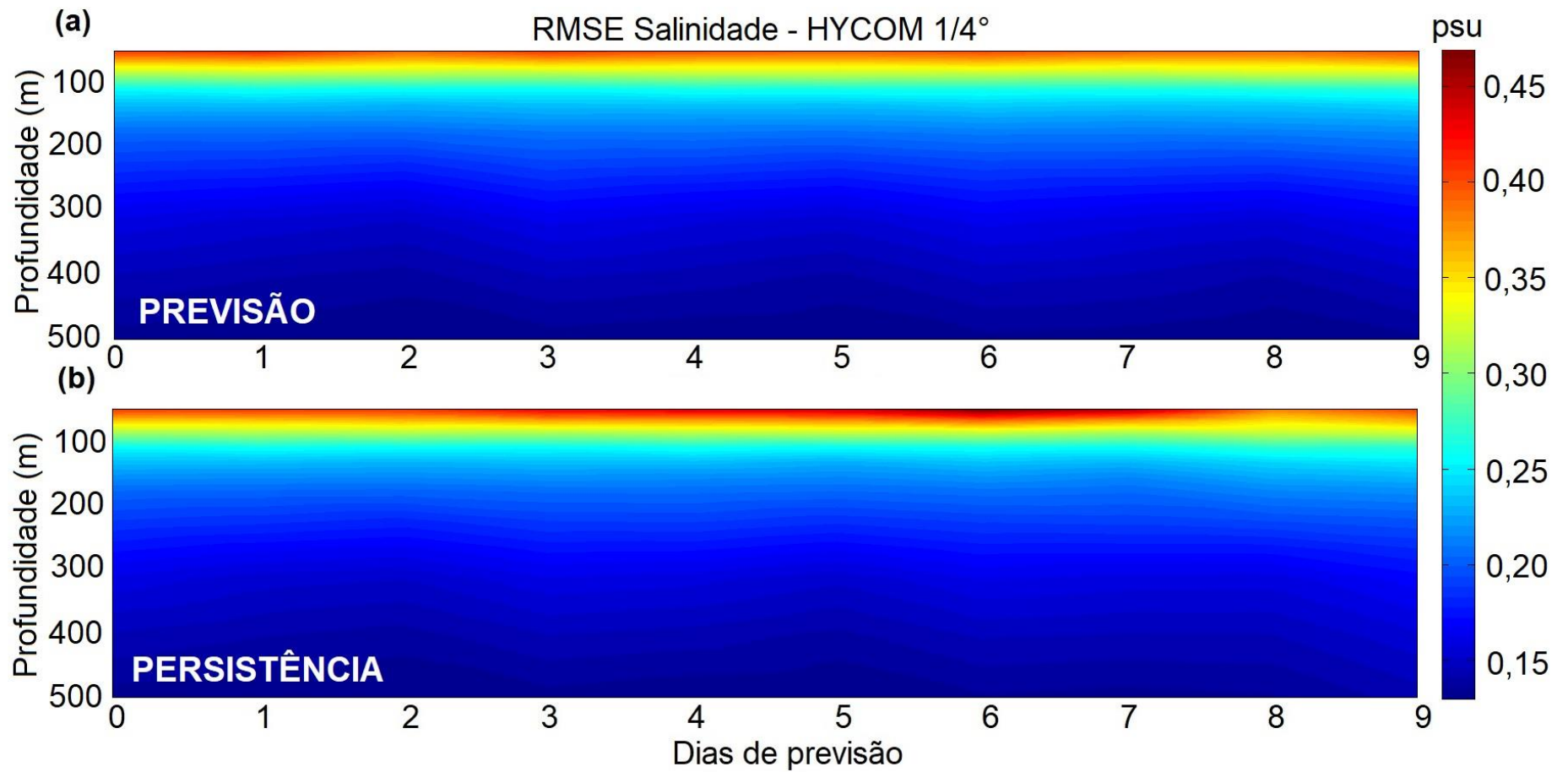


Figura 7. Média de RMSE de salinidade (psu) do modelo HYCOM de resolução 1/4° (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias.

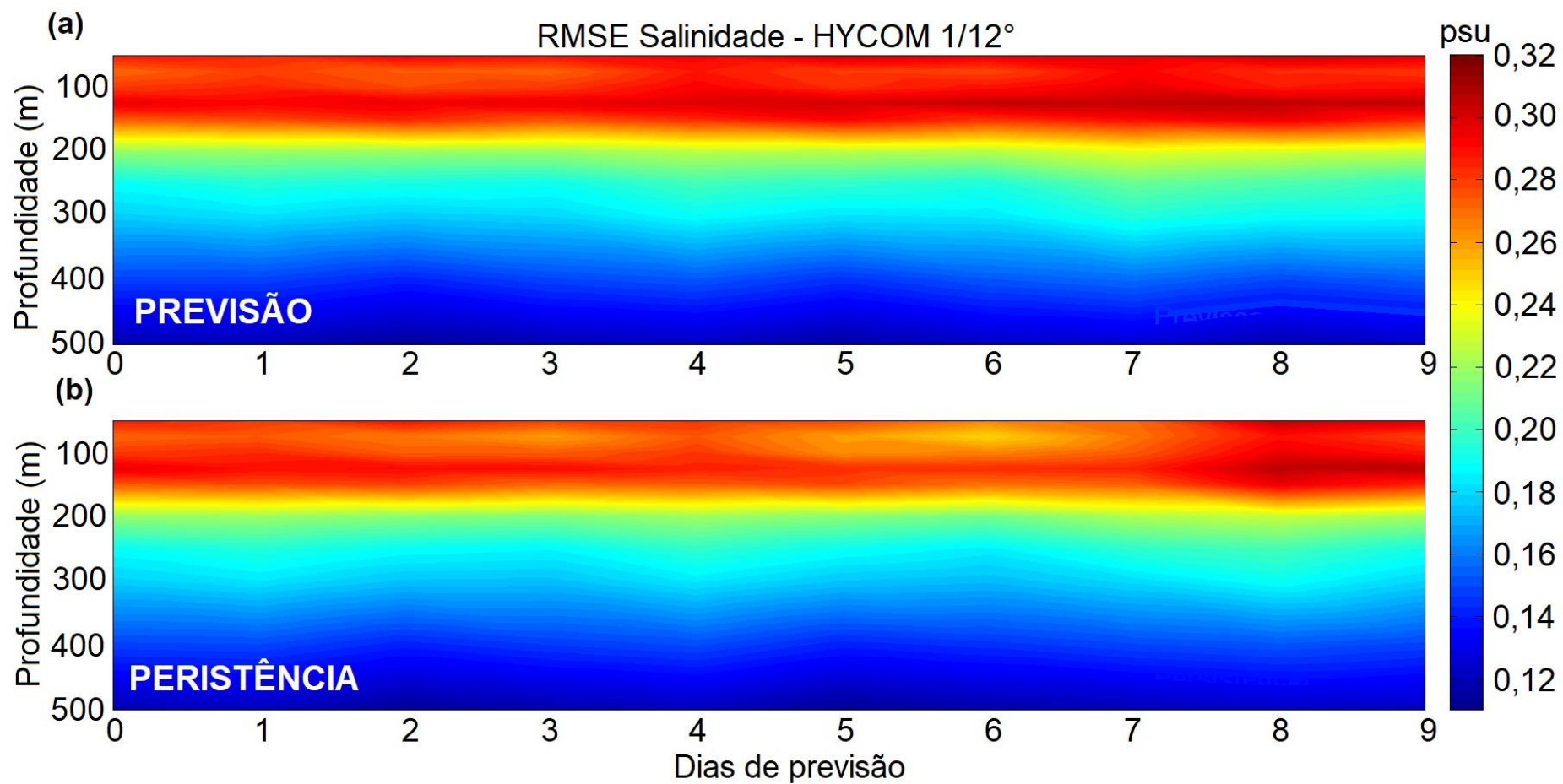


Figura 8. Média de RMSE de salinidade (psu) do modelo HYCOM de resolução 1/12° (a e b) até a profundidade de 500 m e para a janela de previsão de 9 dias.

As Figuras 9 e 10 fornecem uma estimativa da redução da acurácia do sistema predictor ao longo dos 9 dias de previsões. Foram geradas médias do RMSE e da correlação de TSM e ASM para cada dia de previsão considerando as previsões propriamente ditas e a persistência. Para as duas resoluções o RMSE da previsão de TSM apresentou valores maiores do que as suas respectivas persistências. Na Figura 9, o RMSE e a correlação de TSM tanto para a previsão quanto para a persistência tiveram comportamento semelhante, porém variaram de 0,4 °C para 0,6 °C e de 0,97 para 0,92, respectivamente. Esse comportamento está associado ao viés quente do modelo mencionado anteriormente. Com relação à Figura 10, no primeiro dia, o RMSE da previsão de TSM é igual a 0,4 °C e, no último dia de previsão, cresce para 0,6 °C. O RMSE da persistência seguiu o mesmo padrão, porém no último dia ele foi igual 0,5 °C. Nos quatro primeiros dias a correlação da previsão de TSM diminuiu numa taxa mais rápida que a da persistência, de aproximadamente 0,95 para 0,93 na previsão e de aproximadamente 0,95 para 0,94 na persistência. Do quarto dia em diante a correlação da persistência e da previsão passaram a diminuir em taxas similares. No primeiro dia o RMSE da previsão e persistência valiam 0,4 °C e não variaram muito até o nono dia (0,5 °C e 0,6 °C, respectivamente).

Nos gráficos de ASM do HYCOM 1/12° a persistência apresentou valores maiores que a previsão, como era esperado. O RMSE da previsão de ASM diminuiu de 0,089 m para 0,085 m entre o primeiro e o terceiro dia de previsão, e então aumenta para 0,091 no dia 9. O RMSE da persistência de ASM diminuiu de 0,089 para 0,088 m entre os dias 1 e 2 e então aumenta até o dia 9, com valor de 0,092 m. A correlação da previsão de ASM entre os dias 2 e 3 aumenta 0,05 m e passa a diminuir suavemente até o dia 9, atingindo 0,53. A correlação da persistência de ASM não apresenta crescimento ou diminuição bruscos, variando de 0,54 no primeiro dia para 0,51 no nono dia de previsão.

No caso do HYCOM 1/4° o erro da persistência de ASM se mostrou constante, sendo assim, por possível problema na obtenção dos dados, ele foi descartado da avaliação. O RMSE da previsão de ASM variou pouco, entre 0,079 e 0,081 m. Entre os dias 1 e 3 a correlação da persistência de ASM foi menor que a correlação da previsão, com diferença de 0,1 entre elas. Entre os dias 3 e 4 as duas correlações passaram a ter valor igual a 0,48 e, a partir do dia 6, a

correlação da persistência diminuiu para 0,44 e ficando maior em 0,02 que a correlação da previsão.

Nas duas resoluções o erro de TSM e de ASM aumentou entre o primeiro e último dia de previsão e, conseqüentemente, a correlação com as observações tendeu a diminuir.

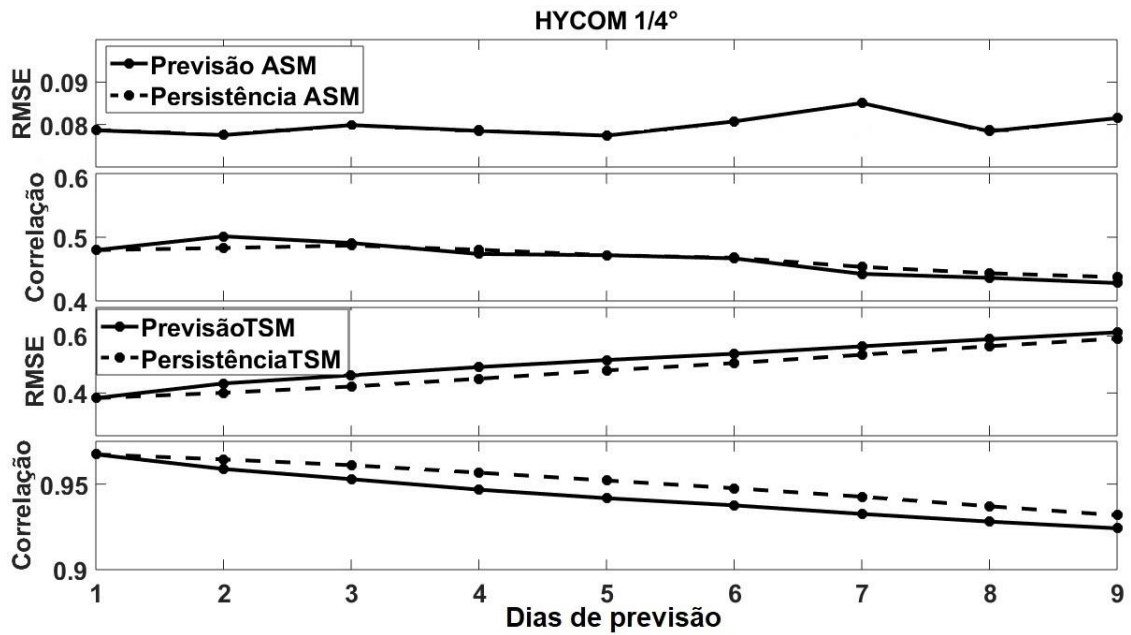


Figura 9. RMSE e correlação de ASM (m) e TSM (°C) médios para os 121 ciclos de 9 dias de previsão da resolução 1/4°.

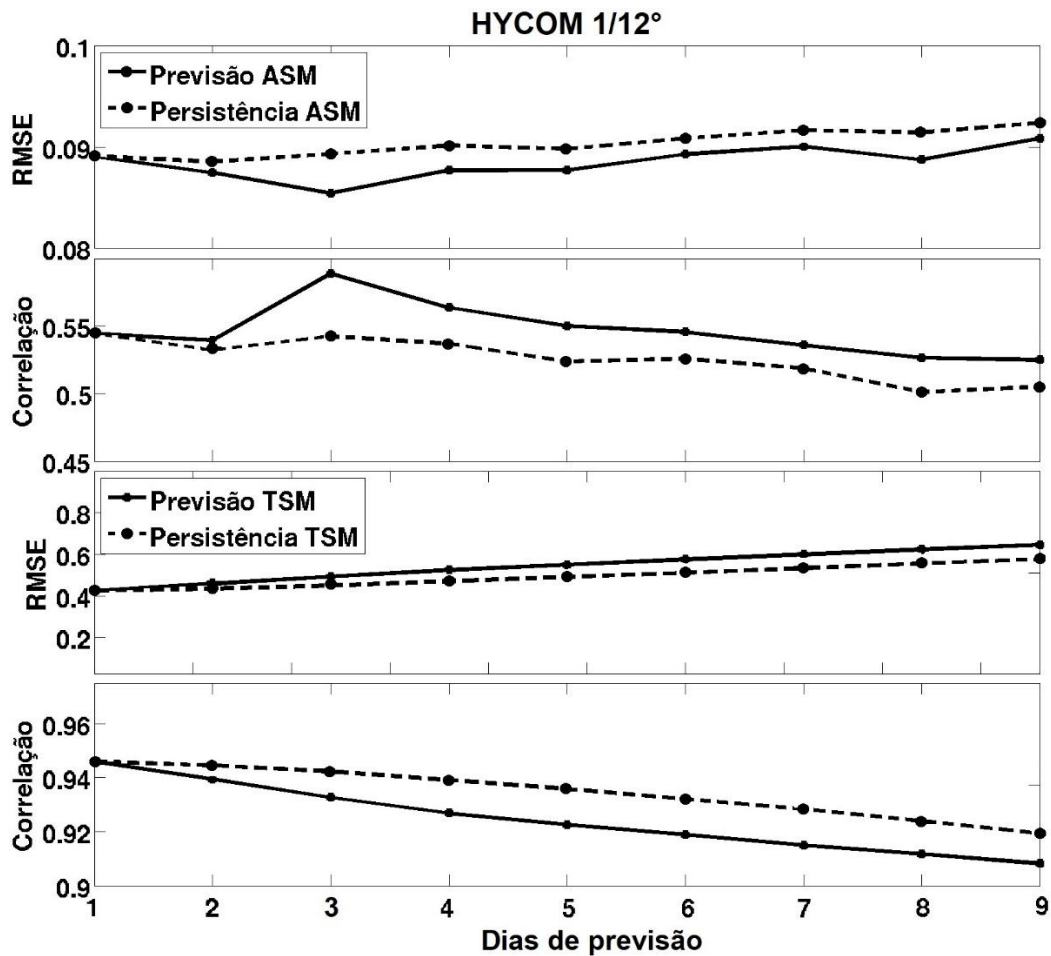


Figura 10. RMSE e correlação de ASM (m) e TSM (°C) médios para os 121 ciclos de 9 dias de previsão da resolução 1/12°. O RMSE da persistência da ASM não é mostrado.

O estudo de caso investigou campos de TSM em dois fenômenos de ressurgência na costa do Rio de Janeiro. O primeiro caso em 15 de fevereiro de 2017 (Figura 11) e o segundo em 17 de março de 2017 (Figura 12). Como a assimilação dos dados pelo sistema HYCOM+RODAS ocorre a cada três dias, foi possível selecionar datas anteriores ao evento de ressurgência e verificar a previsibilidade do sistema predictor para 1 dia, 4 dias e 7 dias de previsão, correspondendo às datas de 14/02 e 16/03; 11/02 e 13/03; e 08/02 e 10/03, respectivamente. Os dados do OSTIA mostram que a pluma de água mais fria formada no dia 15/02 se estende até aproximadamente 46 °W 26 °S e com temperaturas variando entre 24,5 °C e 25 °C. Os campos das previsões nos dois casos apresentam menores magnitudes da temperatura. Nas previsões de 1 e 4 dias a temperatura mínima foi de 20 °C e na previsão de 7 dias a temperatura mínima foi de 20,60 °C. Isso mostra que a ressurgência simulada e prevista pelo

HYCOM é intensa. Esse fenômeno não é bem capturado pelo OSTIA, como observado por CARVALHO (2017), que analisou dados *in situ* do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), coletados próximo a Cabo Frio (22,98° S – 42,10° W), no período entre 13 de março de 2012 e 26 de fevereiro de 2013. Essa análise mostrou que os dados de satélites empregados na construção do OSTIA muitas vezes são incapazes de capturar a magnitude real dos eventos de ressurgência na região.

A TSM do OSTIA foi, em média, 2,76 °C mais alta do que as medições *in situ* na região da ressurgência. Assim, o evento é bem desenvolvido nos campos modelados de TSM visto que ele é promovido pelo vento. Portanto, a assimilação do sistema HYCOM+RODAS produz uma condição inicial com TSM mais quente nos eventos de ressurgência. Isso limita a capacidade previsora do modelo. Por exemplo, mesmo depois de 7 dias, a previsão da extensão da pluma foi menor que a observação, atingindo até aproximadamente 45° W e 25° S. Os mapas de persistência para as previsões de 4 e 7 dias mostram o fenômeno mais restrito à região 43° W 24° S, mas se estendo para norte.

O caso ocorrido no dia 17/03/2017 apresentou características semelhantes ao anterior. Mapas do OSTIA mostram temperaturas entre 25,70 e 24,30 °C e cobrindo uma área até aproximadamente 46° W 26° S. A previsão de 7 dias apresentou menor temperatura, igual a 23,4 °C e com menor extensão, aproximadamente 45° W 25° S. Sua persistência indicou temperatura mínima de 22,10 °C e se estendendo mais ao norte, até 20° S. Os dias 1 e 4 tiveram temperatura mínima de 24 °C. A temperatura mínima da persistência do dia 1 foi de 24,10 °C e a temperatura mínima da persistência do dia 4 foi de 23°C.

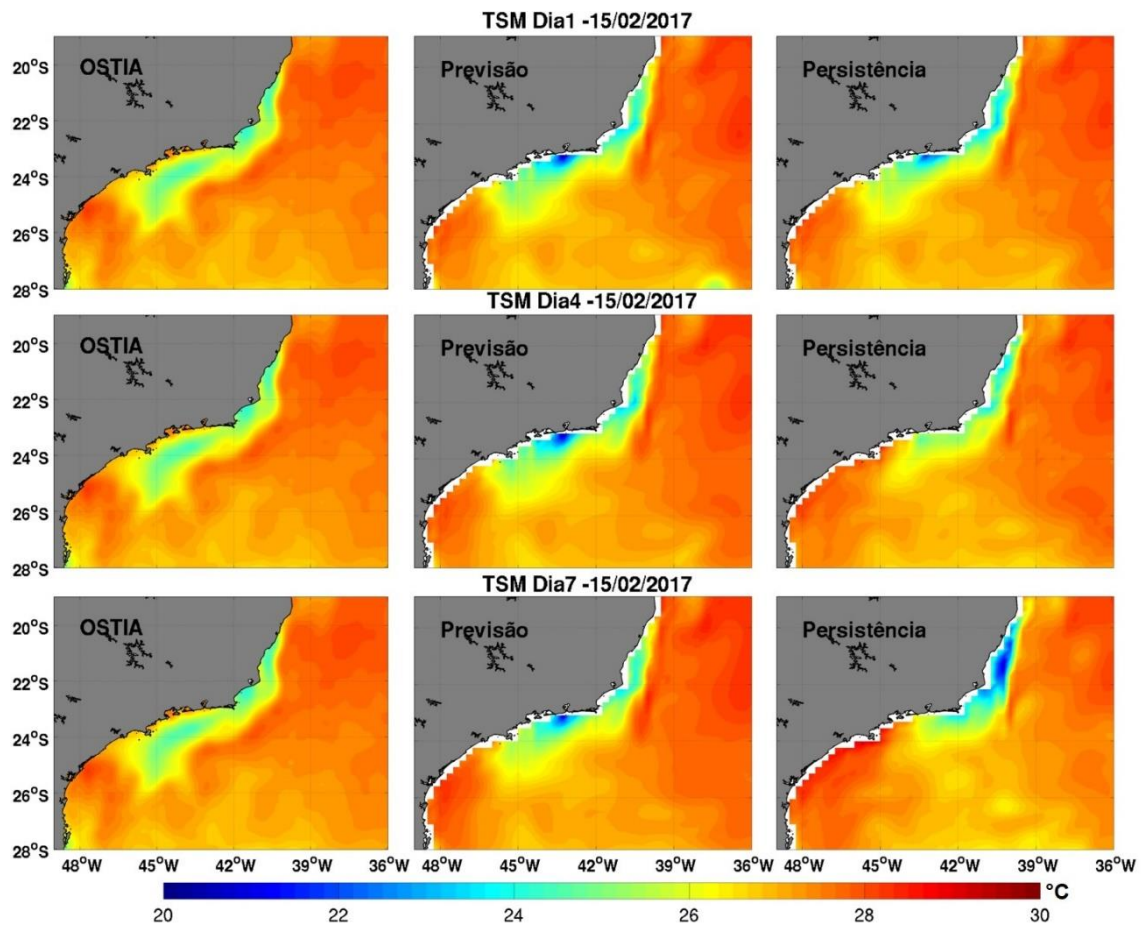


Figura 11. Mapas de TSM (°C) durante caso de ressurgência em 15 de fevereiro de 2017. Dados observados do OSTIA para o evento e previsões de 1, 4 e 7 dias da resolução 1/4°.

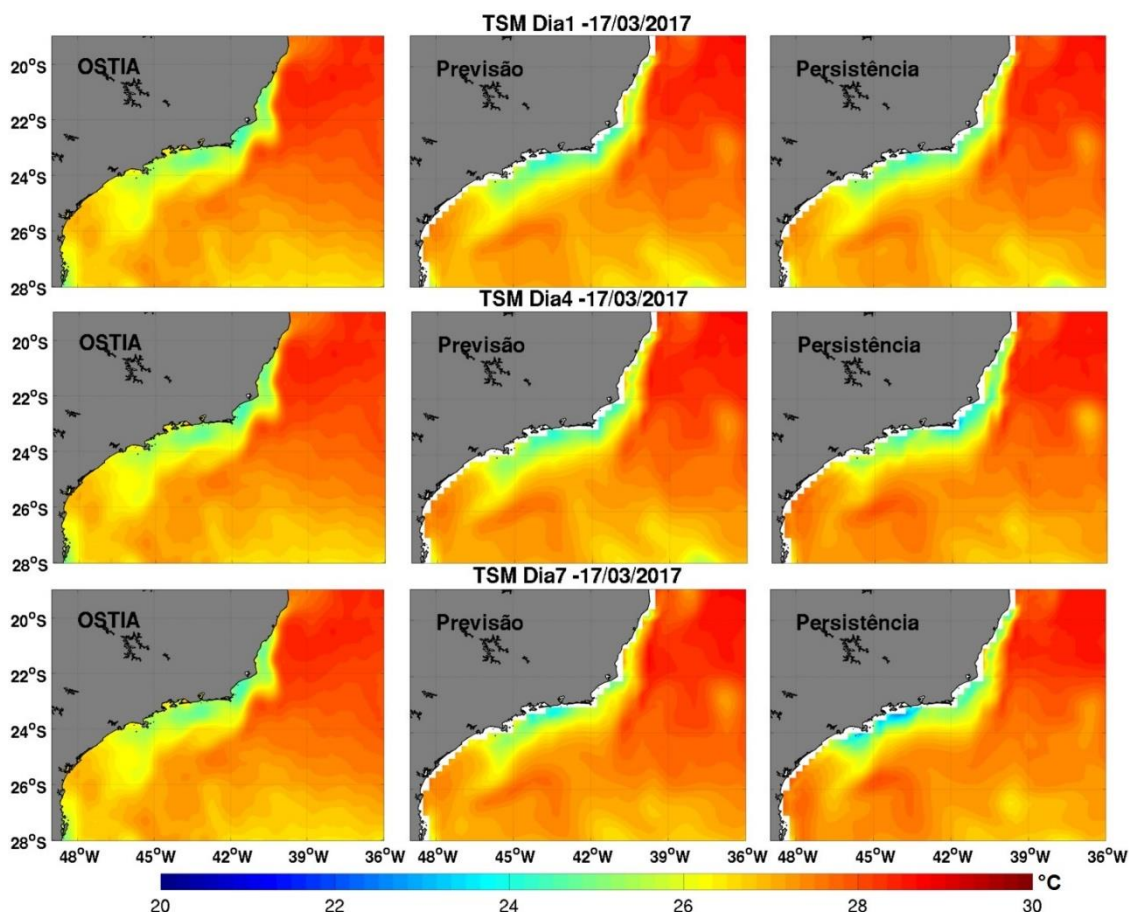


Figura 12. Mapas de TSM (°C) durante caso de ressurgência em 17 de março de 2017. Dados observados do OSTIA para o evento e previsões de 1, 4 e 7 dias da resolução 1/4°.

De modo geral, o modelo foi capaz de prever o desenvolvimento da pluma de ressurgência com cerca de 0,6 °C de diferença do valor observado. O RMSE de TSM da persistência foi maior do que o RMSE da previsão nos dois eventos (Figura 13).

Na data 15/02/2017, o RMSE da previsão e da persistência foram iguais a aproximadamente 0,34 °C no dia 1. No dia 4, o RMSE da persistência foi 0,05 °C maior que o RMSE da previsão e, no dia 7, essa diferença subiu para 0,14 °C. O erro da data 17/03/2017 seguiu um comportamento semelhante: no dia 1, o RMSE da previsão e persistência eram iguais (0,30 °C), no dia 4 o RMSE da persistência foi 0,03 °C maior que o RMSE da previsão e, no dia 7, foi 0,14 °C maior.

A correlação da persistência foi menor que a correlação da previsão. Para a data 15/02/2017 a correlação da previsão passou de aproximadamente 0,60 °C no dia 1 para 0,50 °C no dia 7. A correlação da persistência caiu mais, de 0,60 °C

para 0,20 °C. Já a correlação da previsão para a data 17/03/2017 foi de 0,40 °C no dia 1 para 0,51 °C. A correlação da persistência diminuiu de 0,40 °C para 0,35 °C.

Tais resultados mostram que o modelo HYCOM configurado com resolução de 1/4° tendeu a diminuir a temperatura superficial em pelo menos 0,30 °C nos casos de ressurgência avaliados. Demonstra ainda que o HYCOM 1/4° teve previsibilidade melhor que a condição inicial na janela de 9 dias nos dois eventos de ressurgência investigados.

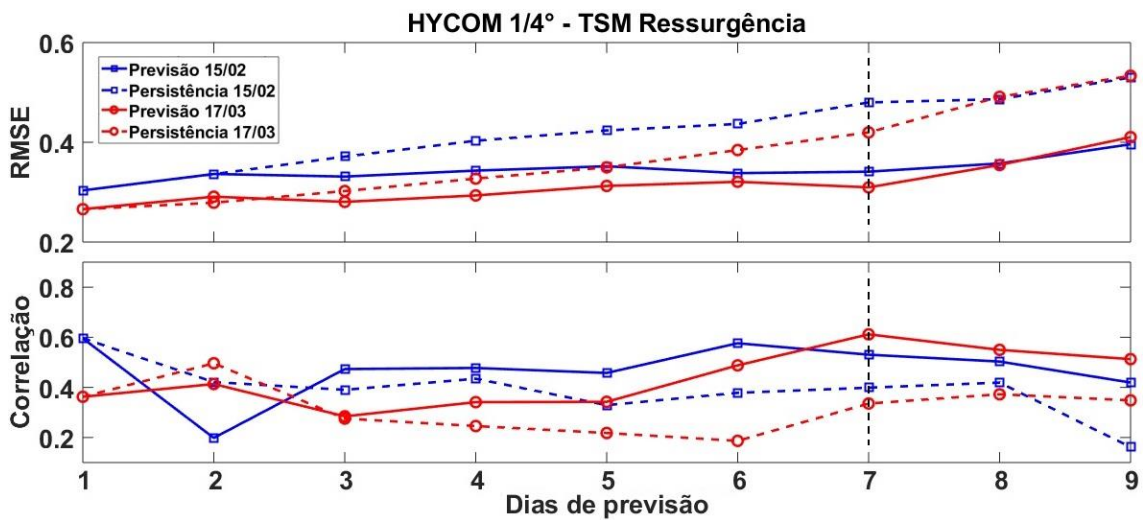


Figura 13. RMSE e correlação de TSM (°C) para 9 dias de previsão do evento de ressurgência nas datas 15/02/2017 (em azul) e 17/03/2017 (em vermelho). A linha pontilhada preta destaca o dia 7 na janela de previsão dos eventos de ressurgência.

5. CONCLUSÕES

O trabalho estudou quantitativamente as saídas do sistema HYCOM+RODAS comparando RMSE e correlação de TSM, ASM e T/S para previsão e persistência ao longo do ano de 2017, na região da Metarea V. Foram gerados 121 ciclos de previsões de 9 dias. Os resultados mostraram que na superfície os erros de T e S do HYCOM 1/12°, em média, foram superiores aos do HYCOM 1/4°, cerca de 1,0 °C e 0,3 psu. Em subsuperfície (50 – 500 m), os RMSEs de T e S do HYCOM 1/12° foram superiores aos do HYCOM 1/4° em aproximadamente 1,0 °C e 0,1 psu. No fundo, o erro de T do HYCOM 1/12° foi praticamente constante e igual a 0,10 °C e o erro de S foi de 0,03 psu, enquanto que para o HYCOM 1/4° o erro chegou a 0,90 °C e 0,05 psu. A correlação de T e S foi maior para o HYCOM 1/12°, principalmente até 1000 m de profundidade. O erro da previsão de T e S do HYCOM 1/12° foi superior ao erro da persistência em 0,5% e 3%, respectivamente. Para o HYCOM 1/4° o erro da persistência de T e S foi 2% e 15% maior que o erro da previsão.

Para as duas resoluções os maiores erros ocorreram no oceano superior, associado à camada de mistura e à termoclina/picnoclina, seguidos por uma diminuição gradual dos mesmos com o aumento da profundidade devido à menor variabilidade do oceano profundo. A média de RMSE para cada dia de previsão mostrou que o HYCOM 1/12° tem erros menores de T/S no fundo do oceano, indicando uma melhor previsibilidade de fenômenos a partir de 500 m de profundidade. Por outro lado, o HYCOM 1/4° apresentou RMSE de T/S menor na superfície, sendo capaz de descrever melhor fenômenos que atuam até 500 m. O erro da persistência de T e S do HYCOM 1/4° foi 2% e 15% maior que o erro da previsão. Para o HYCOM 1/12° o erro da persistência de T e S foi superior ao erro da persistência em 0,5% e 3%, respectivamente.

As médias de erros e de correlações de ASM e TSM em relação aos dados observados do AVISO e do OSTIA, para cada dia de previsão (24h - dia 1, 48h - dia 2, e assim sucessivamente), fornecem uma estimativa da redução da precisão do sistema predictor ao longo do período de previsões. Para as duas resoluções o RMSE da previsão de TSM apresentou valor maior do que o RMSE da persistência, o que não era esperado. Entretanto, esse comportamento pode ser explicado pelo viés quente que o modelo, em sua rodada livre sem

assimilação, tem em relação às observações (MIGNAC et al., 2015). Como a superfície do oceano está mais susceptível às forçantes atmosféricas – ou mesmo a fatores como encobrimento de nuvens (diminuição da radiação) – a formação e a evolução de fenômenos de mesoescala, em regiões mais superficiais e rasas, são mais difíceis de prever. Na região da Confluência Brasil-Malvinas, por exemplo, o RMSE de TSM foi, em média, 2,7 °C maior do que as demais áreas do domínio, assim como na desembocadura do rio Amazonas, com RMSE médio de 2,0 °C.

O RMSE de ASM da persistência do HYCOM 1/12° apresentou valores maiores que o RMSE da previsão, cerca de 0,18 m. O erro de TSM da persistência do HYCOM 1/4° e HYCOM 1/12° foi maior que o erro da previsão de, aproximadamente, 3,3% e 17%, respectivamente. A correlação da persistência de ASM e TSM do HYCOM 1/4° foi aproximadamente 2,4% e 1,1% maior que a correlação da previsão. Já a correlação da persistência de ASM e TSM do HYCOM 1/12° foi aproximadamente 4% e 2% maior que a previsão.

Avaliando um fenômeno de ressurgência costeira no litoral do Rio de Janeiro, com as saídas do modelo de resolução 1/4°, foi possível separar dois casos distintos em fevereiro e março. A correlação de TSM aumentou do primeiro ao último dia de previsão, porém o valor mais alto foi no dia 7 de previsão correspondendo a 0,61, para a data 17/03/2017. Nos dois casos o sistema HYCOM+RODAS previu o evento de ressurgência com RMSE variando entre aproximadamente 0,27 °C e 0,49 °C. O estudo de caso mostrou que o sistema é capaz de reproduzir afloramentos de águas mais frias com erros de 0,26 °C para 24 h de previsão, 0,31 °C para 96 h de previsão e 0,6 °C para previsões de 168 h. Além disso, tendo em vista que a ressurgência costeira é induzida principalmente pelo vento, os forçantes atmosféricos forneceram ao modelo uma boa precisão em reproduzir esse evento, enquanto que a persistência não foi capaz de oferecer um campo de TSM com magnitude e extensão adequadas.

De forma geral, a avaliação do sistema HYCOM+RODAS no domínio do HYCOM 1/12° para o ano de 2017 demonstra que a simulação e previsão na região da termoclina é um grande desafio, tendo em vista que é nessa região que o modelo desenvolve os maiores erros. Ainda, a previsibilidade de TSM, apesar do conhecido viés de aquecimento do modelo, é relativamente boa na janela de 9

dias, partindo de cerca de 0,4 °C e subindo para cerca de 0,5 – 0,6 °C para o HYCOM 1/4° e HYCOM 1/12°. A previsibilidade de ASM é mais limitada pela qualidade de sua condição do que pelos forçantes atmosféricos e pela dinâmica, pois o erro de ASM na condição inicial é de cerca de 0,08 – 0,09 m e correlação cerca de 50% e, ao final de 9 dias, o erro e a correlação são praticamente os mesmos. Para a ASM, o HYCOM 1/12° exibe uma acurácia um pouco maior que a do HYCOM 1/4°. O que demonstra o potencial que o aumento da resolução pode trazer na melhor representação de estruturas e circulação de mesoescala.

Isso mostra que, na janela de 9 dias, a acurácia da previsão é dominada pela acurácia da condição inicial. Por exemplo, o erro da persistência de ASM do HYCOM 1/12° na janela de 9 dias é apenas 12,5% maior que o erro da previsão. Já o erro da persistência de TSM do HYCOM 1/12°, para a mesma janela de tempo, é 17% maior que o erro da previsão. Entretanto, se a janela de tempo da previsão for estendida, a diferença entre a qualidade da previsão e da persistência deve aumentar substancialmente (CARVALHO et al., 2018).

Uma nova grade do HYCOM está em elaboração na qual o domínio do HYCOM 1/4° será resolvido com resolução horizontal de 1/12° e 32 camadas verticais. O presente trabalho servirá de base para identificar benefícios que esse sistema em desenvolvimento pode produzir em relação ao sistema que foi avaliado. Em trabalhos futuros, poderá também ser avaliada a previsibilidade de fenômenos específicos, como a ressurgência e os meandramentos da Corrente do Brasil, em sub-regiões da Metarea V. Além disso, complementar as comparações entre o modelo HYCOM configurado para a grade de 1/4° e 1/12° e também repetir as mesmas métricas com o novo sistema que será implementado para descobrir o quanto ele irá agregar no âmbito da previsão.

6. REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. L. et al. Upwelling processes along a western boundary current in the Abrolhos – Campos region of Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 85, p. 42–59, 2014.
- BELL, M. J. et al. GODAE The Global Ocean Data Assimilation Experiment. **Oceanography**, v. 22, n. 3, p. 14–21, 2009.
- BELL, M. J. et al. An introduction to GODAE OceanView. **Journal of Operational Oceanography**, v. 8, n. S1, p. s2–s11, 2015.
- BLECK, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. **Ocean Modelling**, v. 4, n. 1, p. 55–88, 2002.
- BRASSEUR, P. Ocean Data Assimilation using sequential methods based on the Kalman Filter: from theory to practical implementations. In: CHASSIGNET, E. P.; VERRON, J. (Eds.). **Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography**. Springer, 2006. p. 271–316.
- CALADO, L. et al. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 10–11, p. 1181–1188, 2010.
- CARBONEL, C. Modelling of upwelling in the coastal area of Cabo Frio (Rio de Janeiro - Brazil). **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 46, n. 1, p. 1–17, 1998.
- CARVALHO, J. P. S. **Avaliando a Previsibilidade Estendida do HYCOM com o Sistema de Assimilação de Dados da REMO (RODAS) no Oceano Atlântico Sul**. UFBA, 2017.
- CARVALHO, J. P. S. et al. Assessing the extended-range predictability of the Ocean Model HYCOM with the REMO Ocean Data Assimilation System (RODAS) in the South Atlantic. **Journal of Operational Oceanography**, submetido, em revisão, 2018.
- CASTELAO, R. M.; BARTH, J. A. Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 3, p. 2–5, 2006.
- CASTELLO, J. P.; KRUG, L. C. **Introdução às Ciências do Mar**. 1. ed. Pelotas, RS: Editora Textos, 2015.
- CHASSIGNET, E. P. et al. Ocean prediction with the HYBRID Coordinate Ocean Model (HYCOM). In: CHASSIGNET, ERIC P.; VERRON, J. (Ed.). **Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography**. Springer, 2006. p. 413–426.
- CHASSIGNET, E. P. et al. The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. **Journal of Marine Systems**, v. 65, n. 1–4 SPEC. ISS., p. 60–83, 2007.
- CHASSIGNET, E. P. et al. US GODAE: Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). **Oceanography**, v. 22, n. 2, p. 64–75, 2009.
- CHASSIGNET, E. P. Isopycnic and Hybrid Ocean Modeling in the Context of GODAE. In: SCHILLER, A.; BRASSINGTON, G. B. (Eds.). **Operational**

- Oceanography in the 21st Century.** Dordrecht: Springer, 2011. p. 263–293.
- CIRANO, M. et al. A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global occam. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 2, p. 209–230, 2006.
- CUMMINGS, J. A. et al. Ocean Data Assimilation Systems for GODAE. **Oceanography**, v. 22, n. 3, p. 96–109, 2009.
- DIVAKARAN, P. et al. GODAE OceanView Inter-comparison for the Australian Region. **Journal of Operational Oceanography**, v. 8, n. sup1, p. s112–s126, 2015.
- EVENSEN, G. The Ensemble Kalman Filter: Theoretical formulation and practical implementation. **Ocean Dynamics**, v. 53, n. 4, p. 343–367, 2003.
- GRIFFIES, S. M. et al. Developments in ocean climate modelling. **Ocean Modelling**, v. 2, n. 3–4, p. 123–192, 2000.
- GRIFFIES, S. M. **Fundamentals of ocean climate models.** Princeton: Princeton University Press, 2004.
- HOGAN, P. J.; HURLBURT, H. E. Impact of Upper Ocean–Topographical Coupling and Isopycnal Outcropping in Japan/East Sea Models with 1/8° to 1/64° Resolution*. **Journal of Physical Oceanography**, v. 30, n. 10, p. 2535–2561, 2000.
- HURLBURT, H. et al. High-Resolution Global and Basin-Scale Ocean Analyses and Forecasts. **Oceanography**, 2009a.
- HURLBURT, H. E. et al. Dynamics of the Kuroshio/Oyashio current system using eddy-resolving models of the North Pacific Ocean. **Journal of Geophysical Research C: Oceans**, v. 101, n. C1, p. 941–976, 1996.
- HURLBURT, H. E. et al. Eddy-Resolving Global Ocean Prediction. **NAVAL RESEARCH LAB STENNIS SPACE CENTER MS OCEANOGRAPHY DIV**, v. 177, p. 353–381, 2009b.
- HURLBURT, H. E.; HOGAN, P. J. Impact of 1/8° to 1/64° resolution on Gulf Stream model–data comparisons in basin-scale subtropical Atlantic Ocean models. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 32, p. 283–329, 2000.
- 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, n. 2, p. 209–228, 2013.
- MARTA-ALMEIDA, M.; PEREIRA, J.; CIRANO, M. Development of a pilot Brazilian regional operational ocean forecast system, REMO-OOF. **Journal of Operational Oceanography**, v. 4, n. 2, p. 3–15, 2011.
- MARTIN, M. Ocean Forecasting Systems – product evaluation and skill. In: SCHILLER, A.; BRASSINGTON, G. B. (Eds.). **Operational oceanography in the 21st century.** Dordrecht: Springer, 2011. p. 611–631.
- MIGNAC, D. et al. Argo data assimilation into HYCOM with an EnOI method in the Atlantic Ocean. **Ocean Science**, v. 11, n. 1, p. 195–213, 2015.

MURPHY, A. H. **Climatology, Persistence, and Their Linear Combination as Standards of Reference in Skill Scores** *Weather and Forecasting*, 1992. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0434%281992%29007%3C0692%3ACPATLC%3E2.0.CO%3B2>>

MURPHY, A. H. The coefficients of correlation and determination as measures of performance in forecast verification. **Weather and forecasting**, v. 10, n. 4, p. 681–688, 1995.

OKE, P. R. et al. Assessing the impact of observations on ocean forecasts and reanalyses: Part 2, Regional applications. **Journal of Operational Oceanography**, 2015.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.

RODRIGUES, R. R.; LORENZZETTI, J. A. A numerical study of the effects of bottom topography and coastline geometry on the Southeast Brazilian coastal upwelling. **Continental Shelf Research**, v. 21, n. 4, p. 371–394, 2001.

SOUTELINO, R. G.; MIRANDA, J. A. A semi-idealized study to evaluate the role of topography on the coastal upwelling at Cabo Frio, RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 7, n. 1, p. 101–114, 2013.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999.

TALLEY, L. D. et al. Typical Distributions of Water Characteristics. In: **Descriptive Physical Oceanography**. 6. ed. Elsevier, 2011. p. 67–110.

TANAJURA, C. A. S. et al. Assimilation of sea surface height anomalies into HYCOM with an optimal interpolation scheme over the Atlantic ocean METAREA V. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 31, n. 2, p. 257–270, 2013.

TANAJURA, C. A. S. et al. The REMO Ocean Data Assimilation System into HYCOM (RODAS_H): General Description and Preliminary Results. **Atmospheric and Oceanic Science Letters**, v. 7, n. 5, p. 464–470, 2014.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2. ed. Elsevier Inc, 2005.

XIE, J.; ZHU, J. Ensemble optimal interpolation schemes for assimilating Argo profiles into a hybrid coordinate ocean model. **Ocean Modelling**, v. 33, n. 3–4, p. 283–298, 2010.

ZARON, E. Introduction to Ocean Data Assimilation. In: SCHILLER, A.; BRASSINGTON, G. B. (Eds.). **Operational Oceanography in the 21st Century**. Dordrecht: Springer, 2011. p. 321–350.