



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CONJUNTOS DE
DADOS METEOROLÓGICOS PARA
CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DA BACIA DE
SANTOS**

Natasha Oliveira de Carvalho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia)

Orientadoras:

Prof.^a Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

Prof.^a Dra. Claudine Pereira Dereczynski

Rio de Janeiro, RJ
Abril, 2022

AValiação DE DIFERENTES CONJUNTOS DE DADOS METEOROLÓGICOS
PARA A CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DA BACIA DE SANTOS

NATASHA OLIVEIRA DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Orientadores:

Prof.^a Dra. Fernanda C. Vasconcellos

Prof.^a Dra. Claudine P. Dereczynski

Aprovada por:

Prof.^a Dra. Fernanda C. Vasconcellos

Prof.^a Dra. Claudine P. Dereczynski

Prof. Dr. Mauro Cirano

Prof.^a Dra. Renata Libonati

Dr. Renato Parkinson Martins

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2022

CIP - Catalogação na Publicação

OCaa Oliveira de Carvalho, Natasha
AVALIAÇÃO DE DIFERENTES CONJUNTOS DE DADOS
METEOROLÓGICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DA
BACIA DE SANTOS / Natasha Oliveira de Carvalho. --
Rio de Janeiro, 2022.
108 f.

Orientadora: Fernanda Cerqueira Vasconcellos.
Coorientadora: Claudine Pereira Dereczynski.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia, 2022.

1. Reanálises. 2. ASCAT. 3. Boia. 4. Vento. 5.
Oceano Atlântico Sul. I. Cerqueira Vasconcellos,
Fernanda, orient. II. Pereira Dereczynski,
Claudine, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

“Sempre parece impossível, até que é feito.”

(“It always seems impossible until it's done.”)

Nelson Mandela

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que em seu infinito amor, me presenteou com lições de compaixão, bondade e amor ao longo da minha caminhada até aqui.

Aos meus pais, Eliane e Antonio, a quem amo de todo coração, agradeço pela bravura de me criarem encorajando o pensamento crítico e por sempre me incentivarem, em todas as minhas decisões. É uma honra compartilhar e dedicar mais esse marco da minha vida a vocês.

À minha irmã, Stephanie, e à minha querida tia Nathalia, agradeço as risadas, as conversas, os momentos felizes e os tristes que passamos juntas também. Acredito que juntas somos mais fortes.

Italo, compartilhamos o apreço pela pesquisa e pela ciência. Mais do que isso, compartilhamos sonhos, frustrações e alegrias. Obrigada pelo apoio, não só ao longo do mestrado, mas em todas as áreas da minha vida. Foi e é maravilhoso partilhar todos esses momentos com você, a quem amo de todo o coração.

Aos meus avós, de sangue e de coração, que sei que compartilham a alegria e orgulho por esse momento. Aos meus familiares, amigos, colegas dos laboratórios LPM e GEPAC e do trabalho que, mesmo à distância, torceram por mim deixo aqui o meu muito obrigado.

Minhas orientadoras, Claudine e Fernanda, sou muito grata pela dedicação, paciência e confiança depositada em mim ao longo de toda a graduação e agora, do mestrado. Vocês são um exemplo do profissionalismo que me inspira a querer evoluir sempre mais, como pessoa e como profissional.

Agradeço a UFRJ e a Petrobras, através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Caracterização da Meteorologia e do Clima de Ondas na Bacia de Santos” - Processo 2018/00067-1, pelo suporte financeiro e fomento a esta pesquisa. Agradeço também a todo o departamento de Meteorologia.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

AValiação DE DIFERENTES CONJUNTOS DE DADOS METEOROLÓGICOS PARA CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DA BACIA DE SANTOS

Natasha Oliveira de Carvalho

Abril/2022

Orientadores: Prof.^a Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

Prof.^a Dra. Claudine Pereira Dereczynski

Programa de Pós-graduação em Meteorologia

Dados meteorológicos coletados in situ são importantes para a caracterização de uma região, porém, séries longas são raras em áreas oceânicas. Dados de sensoriamento remoto ou reanálises são possíveis soluções, sendo necessário realizar uma validação prévia para a área desejada. A fim de definir o melhor conjunto de dados para caracterizar o clima da Bacia de Santos, localizada no Oceano Atlântico, entre Florianópolis (SC) e Cabo Frio (RJ), elaborou-se uma avaliação de algumas reanálises: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), ERA-Interim, ERA5 e Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application version 2 (MERRA-2). As variáveis avaliadas, confrontadas com os dados da boia de Santos no período 2011-2017, são: Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar (PNMM), Temperatura do ar a 2 metros de altura (T2M), Umidade Relativa a 2 metros de altura (UR2M), Magnitude e Direção do vento a 10 metros de altura. As reanálises conseguiram representar os dados coletados pela boia. Para a PNMM (T2M), o CFSR (MERRA-2) se destacou, apresentando os melhores resultados. Para a UR2M e para o vento, o ERA5 se destacou, contudo, o ciclo anual e os ventos mais intensos foram melhor representados pelo CFSR. Ademais, foi feita uma avaliação espacial do vento do CFSR e do ERA5, no período 2009-2017, confrontando-as com dados do *Advanced Scatterometer*. Com pequenas exceções, a correlação (CORR) foi acima de 0,80 e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) foi menor que o desvio padrão da observação. O ERA5 apresentou maior CORR e menor RMSE que o CFSR. Recomenda-se, portanto, a utilização do ERA5 para representar o vento no Atlântico Sul.

Palavras-chave: ASCAT; Boia; Vento; Atlântico Sul; Reanálises; Comparação.

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ASSESSMENT OF VARIOUS METEOROLOGICAL DATASETS FOR CHARACTERIZATION OF THE SANTOS BASIN REGION

Natasha Oliveira de Carvalho

April/2022

Advisors: Dr. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

Dr. Claudine Pereira Dereczynski

Department: Meteorology

Meteorological data collected locally are important for the characterization of a region, however, extensive data series are scarce in oceanic areas. Remote sensing data or Reanalysis are possible solutions for this lack of data, although, they require prior validation for the desired area. To define the best dataset to characterize the climate of Santos Basin, located in the Atlantic Ocean between the coastal cities of Florianópolis (SC) and Cabo Frio (RJ), an assessment of four Reanalysis has been made: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), ERA-Interim, ERA5 e Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application version 2 (MERRA-2). The variables listed below are evaluated by comparing them with the data from the Santos buoy: Atmospheric Pressure at Mean Sea Level (PNMM), Air Temperature at 2 meters high (T2M), Relative Humidity at 2 meters high (UR2M), Magnitude and Wind Direction at 10 meters high. Analyses were carried out from 2011 to 2017. The results shows that the Reanalysis evaluated were able to represent the data collected by Santos buoy. For PNMM (T2M), CFSR (MERRA-2) stood out. For UR2M and for the wind, ERA5 showed better results, however, the annual cycle and the most intense winds were better represented by CFSR. Furthermore, a spatial assessment of CFSR and ERA5 wind data was carried out from 2009 to 2017, comparing them with data from the Advanced Scatterometer. Besides a few regions, the correlation (CORR) was above 0.80 and the Root Mean Square Error (RMSE) was smaller than the standard deviation of the observation. ERA5 presented a higher CORR and lower RMSE than CFSR. Therefore, it is recommended the use of ERA5 to represent the wind over the Atlantic Ocean.

Keywords: ASCAT; Buoy; Wind; South Atlantic; Reanalysis; Comparison.

Sumário

LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE ABREVIACÕES	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
3. DADOS E METODOLOGIA	10
3.1 Dados Observacionais.....	10
3.2 Dados Coletados via Sensoriamento Remoto	13
3.3 Modelagem Numérica: Reanálises	15
3.3.1 Climate Forecast System Reanalysis – CFSR.....	15
3.3.2 ERA-Interim	16
3.3.3 ERA5.....	18
3.3.4 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2 - MERRA-2.....	19
3.4 Cálculo da Umidade Relativa do Ar.....	20
3.5 Metodologia de Avaliação pontual das reanálises e do ASCAT.....	21
3.6 Metodologia de Avaliação espacial das reanálises	25
4. RESULTADOS.....	31
4.1 Avaliação da Interpolação de Diversos Pontos de Grade.....	31
4.2 Erros Detectados nos Dados Observacionais	34
4.3 Avaliação Pontual das reanálises.....	39
4.3.1 Avaliação da PNMM	39
4.3.2 Avaliação da T2M.....	40
4.3.3 Avaliação da UR2M.....	42
4.3.4 Avaliação da MAG10M e DIR10M.....	43
4.3.5 Sumário da Avaliação Pontual	47

4.4	Avaliação pontual do ASCAT	48
4.5	Avaliação Espacial das Reanálises CFSR e ERA5 para o Atlântico Sul ..	50
5.	CONCLUSÕES	69
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
A.	APÊNDICE.....	78
A.1	Campos de Desvio Padrão elaborados a partir das Reanálises CFSR e ERA5	78
A.2	Recorte dos campos de Média, CORR, BIAS e RMSE para a região da Bacia de Santos	81

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Informações sobre as boias do PNBOIA situadas na BS ou em suas adjacências.....	10
Tabela 3.2 - Síntese das principais características das reanálises utilizadas neste trabalho. Algumas reanálises possuem resoluções diferentes das indicadas na tabela para variáveis ou versões específicas.....	15
Tabela 3.3 - Limiares estabelecidos para classificação da correlação (apresentado apenas para valores positivos), adaptado de MUKAKA (2012).	23
Tabela 3.4 - Localização da boia de Santos e do ponto de grade mais próximo a ela, de cada reanálise avaliada e do ASCAT. As distâncias são calculadas usando a calculadora disponível em: https://www.nhc.noaa.gov/gccalc.shtml (Acesso em 16/04/2021) e os resultados são arredondados para a unidade inteira mais próxima.....	25
Tabela 4.1 - Percentual de falhas nos dados observados nas Boias de Santos e de Florianópolis.....	38
Tabela 4.2 - Período de dados de MAG10M e DIR10M disponíveis na boia de Santos, após a remoção dos dados espúrios descritos neste capítulo.....	39
Tabela 4.3 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de PNMM (hPa) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2. 39	
Tabela 4.4 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de T2M (°C) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2. 41	
Tabela 4.5 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de UR2M (%) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2. 42	
Tabela 4.6 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de MAG10M (m/s) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA5, ERA-Interim e MERRA-2.	44
Tabela 4.7 - Síntese dos resultados encontrados na Seção 4.3, sendo apresentada a reanálise com maior valor de CORR, menor valor de RMSE e que melhor representou os ciclos anuais e diurnos de cada variável.....	47

Tabela 4.8 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de MAG10M (m/s) observadas na boia de Santos (no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017) e coletadas pelo ASCAT para o mesmo período.....	49
--	----

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Mapa da Bacia de Santos (delimitada pela linha azul), localizada sobre o Oceano Atlântico, aproximadamente entre os paralelos 28° e 23°S e meridianos 49° e 41°W. O campo em sombreado indica a batimetria da região (m). O posicionamento das boias de Santos e Florianópolis são representados pelos losangos. Destaca-se a localização da boia de Santos, ao centro da BS.....	1
Figura 3.1- Especificações da boia de Santos. Destaque para a altura do sensor de temperatura do ar. Fonte: Adaptado de PNBOIA.....	12
Figura 3.2 - Esquema de funcionamento das antenas do ASCAT a bordo de um satélite da série MetOp. Fonte: The COMET Program.	14
Figura 3.3 – Horários de ‘saída’ das análises e previsões da Reanálise ERA-Interim. Fonte: Adaptado de Copernicus Knowledge Base (https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA-Interim%3A+documentation – Acesso: 16/04/2021).....	18
Figura 3.4 - Região selecionada para a comparação espacial das Reanálises CFRS e ERA5, confrontando com os dados coletados pelo ASCAT. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. O campo em sombreado indica a batimetria da região (m).	26
Figura 3.5 - Regiões com dados de horário de passagem descendente do ASCAT pela região de estudo para o dia 01/01/2009. A figura da esquerda mostra o dado bruto, com o horário de passagem do satélite sobre o continente. A figura da direita mostra os dados já recortados, sem valores sobre as regiões continentais. A medida de tempo utilizada é hora UTC.	27
Figura 3.6 - Esquematização da interpolação Bilinear para o ponto P (verde) a partir dos dados disponíveis nos pontos Q ₁₁ , Q ₁₂ , Q ₂₁ e Q ₂₂ (vermelho). Os pontos azuis representados como R1 e R2 indicam os pontos calculados na etapa intermediária da interpolação (Fonte: ARANA, 2016).	28
Figura 3.7 – Exemplo de Bias (m/s) calculado para cada ponto de grade, com zoom na região da BS, para a variável MAG10M da Reanálise ERA5. A figura da esquerda (a) apresenta os resultados sem a aplicação da máscara proposta enquanto que a figura da direita (b) apresenta os resultados com a máscara.....	29

Figura 3.8 – Fluxograma que sumariza as etapas e os principais resultados encontrados ao longo da dissertação.....	30
Figura 4.1 - Gráfico de dispersão e métricas estatísticas para as variáveis (a) PNMM, (b) T2M, (c) UR2M e (d)MAG10M extraídas da Reanálise ERA-Interim para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. O gráfico da esquerda apresenta os dados ponderados de 4 pontos de grade (eixo y) versus os dados do ponto mais próximo à boia (eixo x), enquanto que o da direita apresenta os valores ponderados de 9 pontos (eixo y) versus o ponto mais próximo à boia (eixo x). A linha tracejada indica a reta que melhor se ajusta aos dados.	32
Figura 4.2 - Séries temporais de MAG10M (m/s) para a localização da boia de Santos. (a): período total de dados observados; (b): período total de dados observados, excluindo-se o período 01/08/2012 a 30/04/2013; (c): Diferença (m/s) entre MAG10M observado na boia de Santos e MAG10M simulada pelo ERA5 para o ponto de grade mais próximo à boia de Santos.	34
Figura 4.3 - Distribuição de frequência anual de ocorrência direcional dos ventos elaborada com os dados coletados pela boia de Santos. Destacam-se os anos de 2013 e 2014 onde a direção predominante passa a ser de SSW e acaba impactando a distribuição dos ventos de todo o período de dados. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s.....	35
Figura 4.4 - Distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com: (a) dados do CFSR no ponto de grade mais próximo à boia de Santos, (b) dados do ERA5 no ponto de grade mais próximo à boia de Santos, (c) dados coletados pelo escaterômetro ASCAT a bordo do MetOp-A e (d) dados coletados na boia de Santos. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s. O período de dados se estende de 12/04/2011 a 15/07/2017. As distribuições de frequências do CFSR e do ERA5 foram confeccionadas nos mesmos períodos em que há dados coletados pela boia. A distribuição de frequência do ASCAT foi elaborada utilizando os períodos em que há dados coletados pela boia e pelo escaterômetro concomitantemente.	37
Figura 4.5 - Série temporal de (a) MAG10M e (b) DIR10M coletados pela boia de Florianópolis e pelo ASCAT concomitantemente no período de 22/04/2009 a 15/07/2017. Os triângulos azuis referem-se aos dados da boia de Florianópolis e os pontos amarelos os dados do ASCAT.	38

Figura 4.6 - Ciclos (a) anual e (b) diurno da PNMM (hPa) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas para essa reanálise. Cálculos elaborados apenas quando os dados das reanálises e da boia eram concomitantes.....	40
Figura 4.7 – Ciclos (a) anual e (b) diurno da T2M (°C) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas para essa reanálise. Cálculos elaborados apenas quando os dados das reanálises e da boia eram concomitantes.	42
Figura 4.8 - Ciclos (a) anual e (b) diurno da UR2M (%) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas para essa reanálise. Cálculos elaborados apenas quando os dados das reanálises e da boia eram concomitantes.	43
Figura 4.9 - Ciclos (a) anual e (b) diurno do MAG10M (m/s) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas nos ciclos dessa reanálise.....	44
Figura 4.10 - Distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com: (a) dados coletados pela boia de Santos, (b) CFSR, (c) ERA-Interim, (d) ERA5 e (e) MERRA-2 no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s.....	46
Figura 4.11 – Gráfico Quantil-Quantil (QQ plot) para a variável MAG10M. O gráfico (a) apresenta os percentis do CFSR (eixo y) versus os percentis da boia de Santos (eixo x), enquanto que o (b) apresenta os percentis do ERA5 (eixo y) versus os percentis da boia de Santos (eixo x).	48
Figura 4.12 - Ciclo anual do MAG10M (m/s) para a boia de Santos no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. O dado observado na boia é representado pela linha contínua azul e o dado coletado pelo ASCAT é representado pela linha tracejada amarela.	49
Figura 4.13 - Distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com: (a) dados observados na boia de Santos e (b) dados estimados pelo ASCAT. O período utilizado foi de 12/04/2011 a 15/07/2017. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s.....	50

Figura 4.14 - Número de pares de dados reanálise versus ASCAT disponíveis para cada ponto de grade (resolução de 0,5°) da região em estudo para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.....	51
Figura 4.15 - Média da MAG10M (m/s) e linhas de corrente plotadas utilizando a média das variáveis u10M e v10M para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 no período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.	53
Figura 4.16 - (a) e (b) CORR, (c) e (d) Bias (m/s), (e) e (f) RMSE (m/s) calculados para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada nas figuras.	56
Figura 4.17 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M com dados do ASCAT. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.	57
Figura 4.18 - Média da componente u10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.....	59
Figura 4.19 - (a) e (b) CORR (c) e (d) Bias (m/s), (e) e (f) RMSE (m/s) calculados para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.	61
Figura 4.20 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u10M para os dados do ASCAT. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.	62
Figura 4.21 - Média da componente v10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.....	64

Figura 4.22 - (a) e (b) CORR (c) e (d) Bias (m/s), (e) e (f) RMSE (m/s) calculados para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada nas figuras. 66

Figura 4.23 – Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v10M para os dados do ASCAT. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. 67

A. 1 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M para os dados do CFSR. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. 78

A. 2 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u10M para os dados do CFSR. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. 79

A. 3 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v10M para os dados do CFSR. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. 79

A. 4 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M para os dados do ERA5. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. 80

A. 5 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u10M para os dados do ERA5. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura 80

A. 6 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v10M para os dados do ERA5. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.	81
A. 7 – Recorte do campo da média de MAG10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio se encontram destacadas na figura.....	82
A. 8 – Recorte dos campos de (a) e (b) CORR (m/s), (c) e (d) BIAS (m/s), (e) e (f) RMSE para a região da BS para a variável MAG10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio, se encontram destacadas na figura.....	83
A. 9 - Recorte do campo médio de u10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio se encontram destacadas na figura.	84
A. 10 - Recorte dos campos de (a) e (b) CORR (m/s), (c) e (d) BIAS (m/s), (e) e (f) RMSE para a região da BS para a variável u10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio, se encontram destacadas na figura.....	85
A. 11 - Recorte do campo médio de u10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio se encontram destacadas na figura.	86

A. 12 - Recorte dos campos de (a) e (b) CORR (m/s), (c) e (d) BIAS (m/s), (e) e (f) RMSE para a região da BS para a variável u10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio, se encontram destacadas na figura..... 87

Lista de Abreviações

4D-Var – Análise variacional de 4 dimensões

AGES – Bacia do Espírito Santo e parte Norte da Bacia de Campos

ASAS - Anticiclone subtropical do Atlântico Sul

ASCAT - *Advanced Scatterometer*

BIAS – Erro médio

BRAMS - *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*

BS – Bacia de Santos

CCMP - *Cross-Calibrated Multi-Platform*

CDO - *Climate Data Operators*

CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis*

CFSv1 – *Climate Forecast System version 1*

CFSv2 – *Climate Forecast System version*

CHM – Centro de Hidrografia da Marinha

CORR – Correlação

CPC – *Climate Prediction Center*

DIR10M - Direção do vento a 10 metros de altura

DPObs – Desvio Padrão da Observação

ECMWF - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ERA0 – 1 ponto de grade da Reanálise ERA-Interim

ERA4 – Interpolação com 4 pontos de grade da Reanálise ERA-Interim

ERA9 – Interpolação com 9 pontos de grade da Reanálise ERA-Interim

FPSOBR – *Floating, Production, Storage and Offloading*

GFS - *Global Forecast System*

GSi - *Grid point Statistical Interpolation*

IFS – *Integrated Forecast System*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

MAG10M – Magnitude do vento a 10 metros de altura

MERRA-2 – *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application version 2*

MetOp-A - *Meteorological Operational satellite - A*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

NCEP – *National Center for Environmental Prediction*

NCMRWF - *National Centre for Medium Range Weather Forecasting*

OMM - Organização Meteorológica Mundial

ORAS4 - *Ocean Reanalysis System 4*

OSCAT - *Oceansat-2 scatterometer*

PNBOIA – Programa Nacional de Boias

PNMM - Pressão atmosférica ao Nível Médio do Mar

q2M - Umidade específica a 2 metros de altura

REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

RMSE – *Root Mean Square Error*

SEAL – Bacia de Sergipe-Alagoas

T2M - Temperatura do ar a 2 metros de altura

TD2M - Temperatura do ponto de orvalho a 2 metros de altura

UR2M – Umidade Relativa a 2 metros de altura

u10M – Componente u do vento a 10 metros de altura

UTC - *Universal Time Coordinated*

v10M - Componente v do vento a 10 metros de altura

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

1. Introdução

Com uma economia pautada no petróleo como principal matriz energética, a sociedade segue em busca desse recurso não renovável (COLGAN, 2009). No cenário nacional, destacam-se as reservas petrolíferas conhecidas como ‘pré-sal’, reservatórios de petróleo ultra profundos, localizados abaixo da camada de sal soterrada no fundo do mar. Dos dez poços com maior produção no Brasil, nove estão localizados na Bacia de Santos (BS). A BS é a maior bacia sedimentar offshore do país, com uma área total de mais de 350 mil quilômetros quadrados que se estende de Cabo Frio (RJ) a Florianópolis (SC), aproximadamente entre os paralelos 28° e 23°S e os meridianos 48,5° e 41°W (Figura 1.1). (<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/> - Acesso: 08/03/2021).

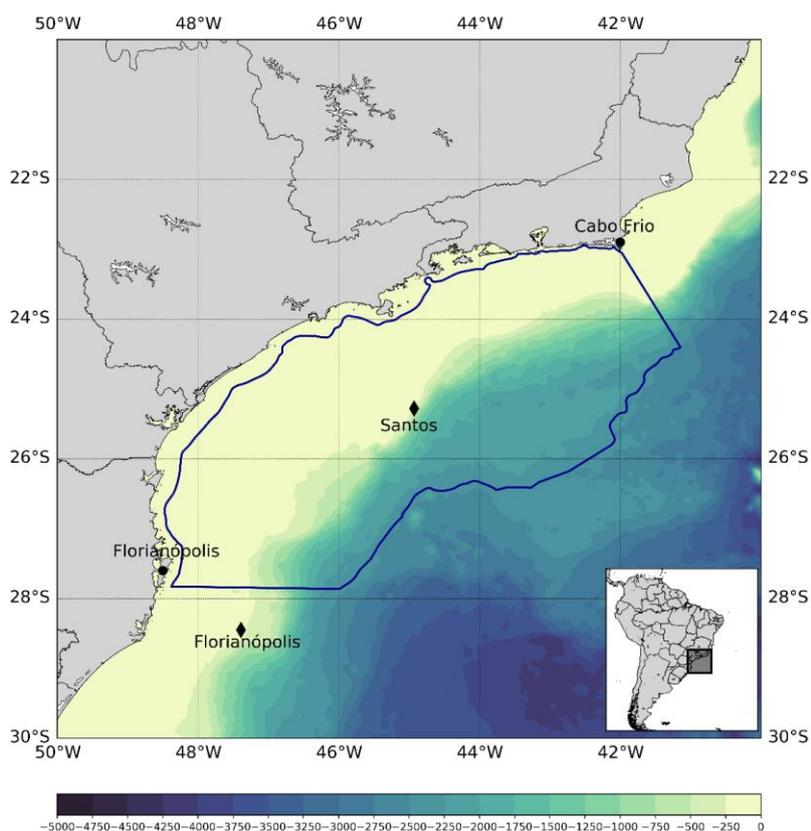


Figura 1.1 – Mapa da Bacia de Santos (delimitada pela linha azul), localizada sobre o Oceano Atlântico, aproximadamente entre os paralelos 28° e 23°S e meridianos 49° e 41°W. O campo em sombreado indica a batimetria da região (m). O posicionamento das boias de Santos e Florianópolis são representados pelos losangos. Destaca-se a localização da boia de Santos, ao centro da BS.

Para que atividades de produção de petróleo e gás natural possam ser realizadas, as autoridades nacionais solicitam uma série de estudos da região a ser explorada, incluindo o levantamento das características climatológicas (<https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/noticia/petrobras-submete-ao-ibama-os-estudos-ambientais-da-etapa-4-do-pre-sal-da-bacia-de-santos-> Acesso: 25/01/2022). Dessa forma, dados meteorológicos coletados *in situ* são de suma importância para a caracterização climática de uma região. Séries temporais longas e regulares permitem estudos climatológicos, subsidiando todas as fases de empreendimentos, desde o planejamento até a gestão ambiental de uma área. Como as estruturas marinhas *off-shore* sofrem diretamente com a interação da superfície oceânica, que por sua vez tem grande relação com as condições atmosféricas, principalmente com o vento, a importância dos estudos climatológicos é ainda maior.

Para o levantamento da climatologia de uma determinada região, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) recomenda minimamente o cálculo das Normais Climatológicas Provisórias, que devem ser computadas para períodos com no mínimo dez anos de dados, começando em 1º de janeiro de anos que terminam com o dígito 1 (por exemplo, de 1º de janeiro de 2001 a 31 de dezembro de 2010) (WMO nº1203, 2017). Entretanto, devido às dificuldades de manutenção das estações, transmissão e manutenção de bancos de dados, séries com períodos longos como o destacado acima são raras. No ambiente marítimo a situação é ainda pior, pois, fatores como dificuldade de acesso, necessidade de ancoramento e corrosão atrapalham ainda mais a coleta de dados. (<https://www.ocean-ops.org/dbcp/deployments/recovery.html> - Acesso: 03/05/2022)

Possíveis soluções para a falta de dados observados *in situ* são os dados coletados via sensoriamento remoto ou os dados gerados via modelagem numérica, as chamadas reanálises. Entretanto, tais conjuntos de dados também possuem erros associados, e não devem ser utilizados sem uma validação prévia (REICHLER e KIM, 2008). A validação é feita confrontando os dados disponíveis na região de estudo com os conjuntos de dados selecionados, permitindo assim um maior entendimento de suas limitações para a região que se deseja caracterizar.

1.1 Objetivos

Tendo em vista a importância da BS e a lacuna de séries longas de dados nessa bacia, este trabalho tem como objetivo principal avaliar modernas reanálises visando identificar qual delas apresenta a melhor performance para caracterizar a região da BS.

Objetivos específicos:

- Avaliar possíveis ganhos ao utilizar mais de um ponto de grade dos dados gerados via modelagem numérica, ao compará-los com os dados coletados pontualmente.
- Validar pontualmente dados de 4 modernas reanálises em relação às medidas *in situ* das variáveis Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), Temperatura do ar a 2 metros de altura (T2M), Umidade Relativa do ar a 2 metros de altura (UR2M), Intensidade (MAG10M) e Direção (DIR10M) do vento a 10 metros de altura na região da BS.
- Confrontar pontualmente o vento à superfície estimado por escaterômetro, comparando-o com os dados coletados pela boia fundeada na BS, visando confirmar a capacidade do escaterômetro em estimar os dados de vento observados à superfície.
- Avaliar espacialmente para a região do oceano Atlântico Sul, com destaque para a BS, o vento à superfície das reanálises que melhor se destacaram na avaliação pontual.

As quatro reanálises escolhidas foram: *Climate Forecast System Reanalysis* – CFSR, do *National Centers for Environmental Prediction* - NCEP (SAHA et al., 2010, 2014); ERA-Interim, do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF (DEE et al., 2011); ERA5, também do ECMWF (HERSBACH et al., 2020) e *Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications version 2* – MERRA-2, do *National Aeronautics and Space Administration* - NASA (GELARO et al., 2017).

A escolha das reanálises apresentadas, em detrimento de outras, ocorreu devido à facilidade de acesso aos dados, às diferentes resoluções espaciais e por serem provenientes de diferentes centros de pesquisa, com exceção da ERA-Interim e ERA5 que foram desenvolvidas pela mesma instituição. Nesse caso, a escolha de ambas se deu com a prerrogativa de avaliar as mudanças que ocorreram na série ERA.

Inicialmente foi realizada uma avaliação pontual das reanálises, confrontando os dados simulados numericamente com dados coletados pelo Programa Nacional de Boias (PNBOIA). Devido à importância do vento para as operações *off-shore*, as duas reanálises que apresentaram melhores resultados na avaliação pontual para as variáveis MAG10M e DIR10M foram confrontadas espacialmente com dados coletados pelo *Advanced Scatterometer* (ASCAT) a bordo do Satélite *Meteorological Operational - A* (MetOp-A), lançado em 2006. Previamente à análise espacial, os dados do ASCAT foram comparados pontualmente com os dados coletados pelo PNBOIA, visando identificar se representavam os dados coletados *in situ*.

Este documento está organizado em seis Capítulos. Além deste primeiro Capítulo de introdução, o Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre a avaliação de diferentes conjuntos de dados. No Capítulo 3, encontra-se a descrição dos dados e da metodologia utilizada na elaboração deste estudo. Os resultados da avaliação pontual das reanálises para cada uma das variáveis estudadas, a avaliação pontual do ASCAT e a avaliação espacial do vento são apresentados no Capítulo 4. As conclusões e se encontram no Capítulo 5 e, por fim, as referências citadas são listadas no Capítulo 6.

2. Revisão da Literatura

Existem diversos métodos de obtenção de dados meteorológicos sobre a superfície oceânica, sendo os mais tradicionais as observações de estações meteorológicas em navios, boias e ilhas. No entanto, a observação *in loco* dos dados é limitada pela baixa cobertura e baixa resolução espacial das redes de estações. Dessa forma, esses dados podem não satisfazer os requisitos de certas pesquisas e aplicações científicas (SONG *et al.*, 2014). Visando preencher essa lacuna, diversos trabalhos avaliam pontualmente variados conjuntos de dados, provenientes de modelagem numérica ou sensoriamento remoto, a partir dos dados medidos nas regiões oceânicas em estudo.

Para as operações *off-shore*, o vento à superfície é uma variável de grande importância, pois é uma das principais forçantes da circulação oceânica e das ondas (NEHME *et al.*, 2019), além dos esforços que exercem sobre as estruturas marítimas.. Assim, a maioria dos trabalhos encontrados avaliam apenas a capacidade de representação da magnitude e direção do vento provenientes dos diversos conjuntos de dados disponíveis (e.g. CARVALHO *et al.*, 2014; REHMAN TAHIR *et al.*, 2018; YANG; ZHANG, 2019). Poucos trabalhos avaliam outras variáveis meteorológicas como temperatura e pressão.

RUTI *et al.* (2008), utilizam dados coletados por quatro boias fundeadas no Mediterrâneo, no período de 2000 a 2005, para avaliar os seguintes conjuntos de dados: QuickScat, as Reanálises ERA-40 e Reanálise II do NCEP/NCAR, análises do modelo global operacional do ECMWF CY24r3 e um conjunto de dados que mescla a reanálise do NCEP e os dados do QuikSCAT. Em seus resultados os autores descrevem que o QuickScat foi o conjunto de dados com maior habilidade em representar a dinâmica do vento nas quatro boias. Os autores também destacam que os dados provenientes do escaterômetro não conseguem representar ventos com magnitude menor que 5 ms^{-1} , apresentando subestimativa para essa faixa de velocidade. Com relação aos dados de modelagem numérica, a análise do modelo global do ECMWF CY24r3 foi a mais acurada.

ALVAREZ *et al.* (2014) comparam dez anos de dados de vento (2000-2009), coletados por quatro boias fundeadas próximo ao litoral norte da Espanha, com dados das

Reanálises NCEP, Reanálise II, ERA-Interim, MERRA e CFSR e com séries de dados estimadas por satélites como o QuikSCAT e o Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP). Para que a comparação de diferentes fontes de dados fosse possível, foi necessário sincronizar os dados coletados pelas diferentes fontes, utilizando apenas as medidas de 06 e 18 UTC (*Universal Time Coordinated*). O vento medido pelas boias a 3 metros foi convertido para vento a 10 metros e o valor encontrado no ponto de grade mais próximo à localização da boia foi utilizado para comparação. Em seus resultados os autores concluem que o produto menos confiável é a Reanálise II, com os menores valores de correlação (CORR) e os maiores valores de Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* - RMSE) para as quatro boias. Os produtos com melhor desempenho são o CFSR e as séries de dados coletadas via sensoriamento remoto (QuickSCAT e CCMP). Uma análise mais detalhada foi realizada comparando o CFSR, QuickSCAT e CCMP, onde os autores descrevem que o RMSE foi similar para os três. Em relação à direção do vento o CCMP apresentou o menor RMSE.

RANI et al. (2014), apresentam uma comparação entre os dados de vento à superfície do escaterômetro Oceansat-2 (OSCAT) e do ASCAT com observações coletadas por boias e previsões numéricas de curto prazo a cada 6 horas, obtidas a partir do modelo indiano T574L64 do *National Centre for Medium Range Weather Forecasting* (NCMRWF) durante o sistema monçônico de 2011. As análises foram feitas para duas regiões: trópicos e hemisfério norte. A comparação entre os dados provenientes dos escaterômetros com o vento coletado pelas boias mostra que o ASCAT apresenta resultados melhores que o OSCAT, embora os autores atribuam essa diferença no desempenho às diferenças na frequência e resolução do instrumento de cada escaterômetro.

WANG et al. (2019) utilizam dados de T2M coletados por boias à deriva e boias fundeadas no gelo do mar do Ártico para avaliar as Reanálises ERA5 e ERA-Interim no período de 2010 a 2016. Em seus resultados, os autores mostram que as duas reanálises geralmente concordam bem, tanto uma com a outra, quanto com as observações. Ambas apresentam um BIAS positivo para a região em estudo, entretanto o ERA5 é geralmente mais quente (frio) que o ERA-Interim no inverno e na primavera (verão e no outono) sobre o gelo do mar Ártico. Avaliando todo o período, o ERA5 apresentou superestimativas de T2M maiores do que o ERA-Interim. Os autores também destacam

que a performance das reanálises variou de acordo com cada região do mar de gelo do Ártico estudada.

Ao longo da costa brasileira e porção sul do oceano Atlântico poucos foram os trabalhos elaborados avaliando diferentes conjuntos de dados com dados coletados *in situ* por boias ou plataformas de pesquisa e de exploração petrolífera presentes na região.

Com o objetivo de encontrar o melhor conjunto de dados para estimar o potencial eólico offshore da margem continental brasileira, PAIVA *et al.* (2021) avaliaram os dados de vento estimados pelo ASCAT, pelo modelo numérico *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS), pela Reanálise ERA5 e pelo CCMP. Para tal, o autor utilizou dados de vento medidos em 15 boias fundeadas no Oceano Atlântico Sul, sendo sete delas pertencentes ao PNBOIA, incluindo as boias de Santos e de Florianópolis. Tomando como base as boias do PNBOIA, todos os conjuntos avaliados apresentaram BIAS negativos, indicando subestimativa. Os maiores (menores) valores de RMSE foram encontrados para o BRAMS (ASCAT) e as maiores CORR foram obtidas pelo ASCAT. Na avaliação individual da boia de Santos, o RMSE encontrado foi de 1,06 m/s (1,71 m/s) e a CORR foi de 0,92 (0,87) para o ASCAT (ERA5).

Devido à necessidade de caracterizar e descrever o clima na Bacia de Campos, localizada imediatamente ao norte da BS, DEREZYNSKI e MENEZES (2015) avaliaram dados extraídos no horário de 12 UTC da Reanálise II do NCEP/NCAR e do ERA-Interim comparando-os com dados coletados pela plataforma da Petrobras *Floating, Production, Storage and Offloading* (FPSOBR), para as variáveis T2M, UR2M, PNMM e DIR10M e MAG10M. Os ciclos anuais das variáveis, obtidos com as duas reanálises, foram confrontados com os ciclos anuais gerados a partir dos dados observacionais coletados. Em seus resultados os autores mostram que a Reanálise II superestima a PNMM e a UR2M e subestima a T2M. O ERA-Interim apresenta comportamento similar, entretanto com valores mais próximos aos observados na FPSOBR. Os ciclos anuais das variáveis são relativamente bem representados, exceto o ciclo anual da UR2M pela Reanálise II, que não exibe a redução característica nos meses de outono/inverno.

A performance do CFSR foi avaliada por LOPES (2018) e DEREZYNSKI *et al.* (2019), com o intuito de caracterizar o clima na Bacia do Espírito Santo e parte Norte da Bacia de Campos (AGES). Os dados horários de T2M, UR2M, PNMM e MAG10M

coletados na plataforma FPSOBR foram comparados com dados do ponto de grade do CFSR mais próximo à estação, no período de novembro de 2004 a dezembro de 2013. Os resultados mostram que a PNMM é a variável melhor representada pelo CFSR, com ciclos sazonal e diurno bem retratados. A T2M também é bem representada, com uma correlação menor que a da PNMM e uma leve subestimativa, que também é notada no ciclo sazonal da variável. Já no ciclo diurno, o CFSR apresenta baixos valores de amplitude térmica ao longo do dia. Os autores descrevem que a presença de estruturas metálicas na plataforma pode aumentar a amplitude térmica registrada na estação, ocasionando a diferença encontrada entre os dados observados e os simulados numericamente. As variáveis UR2M e MAG10M são ambas subestimadas significativamente pela Reanálise. Assim como ocorreu com a T2M, o CFSR não conseguiu representar a amplitude do ciclo diurno da UR2M. O ciclo anual, entretanto, é bem representado apesar da subestimativa considerável. Por fim, o CFSR representa razoavelmente bem a variabilidade sazonal e diurna da MAG10M, apesar de subestimar os valores observados.

Na Bacia de Sergipe-Alagoas (SEAL), a avaliação do CFSR foi feita a partir dos dados horários coletados pela estação de Piranema, em dois períodos distintos: de janeiro de 2008 a maio de 2010 e de julho de 2012 a dezembro de 2014 (PETROBRAS, 2017). Os resultados indicam que o CFSR superestima levemente a PNMM em todos os meses do ano, enquanto subestima (superestima) a T2M entre abril e junho (agosto e dezembro), descrevendo muito bem o ciclo anual dessas duas variáveis. Para a UR2M, nota-se que o CFSR não é capaz de reproduzir a redução que ocorre entre junho e setembro e, portanto, apresenta erros na representação do ciclo anual dessa variável. A intensidade do vento (MAG10M) em Piranema é subestimada na maior parte do ano pelo CFSR, mas o ciclo anual é razoavelmente bem reproduzido.

CARVALHO (2018) avaliou a Reanálise CFSR para a BS, utilizando dados horários coletados por quatro boias do PNBOIA, considerando as variáveis T2M, UR2M, PNMM, DIR10M e MAG10M. As avaliações foram feitas para o período de dados disponível em cada boia. A autora também avaliou se a utilização de nove pontos de grade no lugar de apenas o ponto mais próximo à localização média da estação aumenta a acurácia dos dados extraídos da Reanálise e não encontrou diferenças significativas que justificassem o aumento do custo computacional. Esta pesquisa de mestrado é uma continuação do trabalho iniciado em CARVALHO (2018). Dessa forma, parte dos

resultados referentes ao CFSR foram incorporados a esta pesquisa, e serão apresentados ao longo dos Capítulos 3 e 4.

Conforme destacado por WANG et al. (2019), os conjuntos de dados apresentam desempenhos diferentes para diferentes regiões dentro de uma mesma área de estudo. Dessa forma, no caso de poucos pontos de coleta de dados pontual, avaliar espacialmente as variáveis com uso de dados coletados via sensoriamento remoto é uma solução, principalmente se eles já foram previamente confrontados com os dados coletados *in situ* e apresentaram bom desempenho.

BELMONTE RIVAS et al. (2019) analisaram as diferenças entre os campos de vento do ERA-Interim e do ERA5 com relação aos dados coletados pelo ASCAT para todo globo terrestre, no ano de 2016. Os autores destacam em seus resultados que os dados de vento do ERA5 mostraram uma melhoria de 20% em relação ao ERA-Interim e um desempenho semelhante ao modelo operacional do ECMWF. Os maiores erros foram encontrados próximos às bordas dos continentes, nas regiões da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e no Oceano Pacífico norte. Na análise dos ventos zonais e meridionais, alguns erros sistemáticos foram encontrados nas duas reanálises. Os ventos zonais médios são mais intensos que os coletados pelo ASCAT (componente zonal mais intensa de oeste nas latitudes médias e mais intensa de leste nos trópicos), fraco escoamento meridional médio em direção aos polos nas latitudes médias, componente meridional dos ventos alísios fraco nos trópicos e representação incorreta da convergência dos ventos na região tropical, principalmente na região da ZCIT.

Para a região próxima à margem continental leste/sudeste da costa brasileira, NEHME *et al.* (2019) usaram os dados de vento coletados pelo ASCAT para avaliar as Reanálises CFSR e ERA-Interim em relação a energia cinética do vento no período de maio de 2007 a dezembro de 2010. Para que as comparações fossem possíveis, os dados foram degradados para a grade de menor resolução. As duas reanálises caracterizaram de forma similar o padrão médio e a variabilidade da energia cinética do vento, sendo os maiores erros encontrados próximos às bordas continentais. Os dois produtos apresentaram superestimativa da energia cinética, entretanto, o CFSR se mostrou mais energético.

3. Dados e Metodologia

Neste Capítulo são apresentados os conjuntos de dados observacionais (Seção 3.1), os coletados via sensoriamento remoto (Seção 3.2) e os de reanálises (Seção 3.3), disponíveis sobre a área de estudo e em suas adjacências. Também são apresentados o método de conversão dos dados de umidade (Seção 3.4), a metodologia utilizada para a avaliação pontual das reanálises e do ASCAT (Seção 3.5) e a metodologia de avaliação espacial das reanálises (Seção 3.6).

3.1 Dados Observacionais

O PNBOIA, que tem como objetivo geral disponibilizar, em tempo quase real, dados meteorológicos e oceanográficos coletados nas áreas oceânicas de interesse do Brasil, possui quatro boias na região da BS, sendo elas: Cabo Frio, (Cabo Frio 2), Niterói, (Niterói 2), Santos e Florianópolis. Neste trabalho são utilizados apenas os dados qualificados pela Marinha do Brasil e, no momento da coleta de dados para elaboração desta pesquisa, os dados qualificados do PNBOIA estavam disponíveis até a data listada na Tabela 3.1.

As boias de Santos e de Florianópolis possuem as séries de dados coletados *offshore* mais longas na região da BS. Apesar de ter um período de dados maior, iniciado em 2009, os dados da boia de Florianópolis apresentam uma série de falhas, principalmente na variável MAG10M, como será apresentado na Seção 4.2. Dessa forma, decidiu-se realizar as avaliações propostas considerando apenas os dados da boia de Santos, que possui o posicionamento central na BS (Figura 1.1).

Tabela 3.1 - Informações sobre as boias do PNBOIA situadas na BS ou em suas adjacências.

Boia	Órgão	UF	Latitude	Longitude	Início	Fim
Cabo Frio	PNBOIA	RJ	-22,98	-42,10	24/06/2009	19/09/2013
Cabo Frio 2	PNBOIA	RJ	-23,63	-42,20	20/06/2016	15/07/2017
Niterói	PNBOIA	RJ	-22,92	-43,13	05/09/2014	15/07/2017
Niterói 2	PNBOIA	RJ	-22,88	-43,13	15/08/2017	06/12/2018
Santos	PNBOIA	SP	-25,44	-45,03	12/04/2011	15/07/2017
Florianópolis	PNBOIA	SC	-27,40	-47,26	22/04/2009	15/07/2017

Os dados coletados pelo PNBOIA são disponibilizados com resolução temporal horária e previamente tratados pela Marinha do Brasil. Para tal, é utilizado um algoritmo de tratamento de dados, que já fornece dados de intensidade do vento convertidos para 10 metros de altura usando metodologia descrita em LIU; KATSAROS; BUSINGER (1979). Ademais, neste trabalho, são estabelecidos limiares inferiores e superiores para cada variável, diminuindo e somando respectivamente de seu valor médio, o desvio padrão multiplicado por 5. Para a boia de Santos os limiares utilizados são: $970 \text{ hPa} \leq \text{PNMM} \leq 1040 \text{ hPa}$; $10 \text{ °C} \leq \text{T2M} \leq 35 \text{ °C}$; $40\% \leq \text{UR2M} \leq 100\%$ e $0 \text{ m/s} \leq \text{MAG10M} \leq 25 \text{ m/s}$. Os dados fora de tais limiares foram analisados individualmente e aqueles considerados espúrios, foram retirados da série.

Os sensores de pressão, temperatura do ar e de umidade relativa se encontram a aproximadamente 3,3 metros de altura em relação ao convés da boia, como pode ser visto no desenho esquemático da boia de Santos (Figura 3.1). Dessa forma, os dados de PNMM, UR2M e T2M provenientes das reanálises (ver Dados Gerados por Modelagem Numérica na Seção 3.2), serão confrontados diretamente com os dados observacionais da boia de Santos, sem qualquer ajuste para altura.

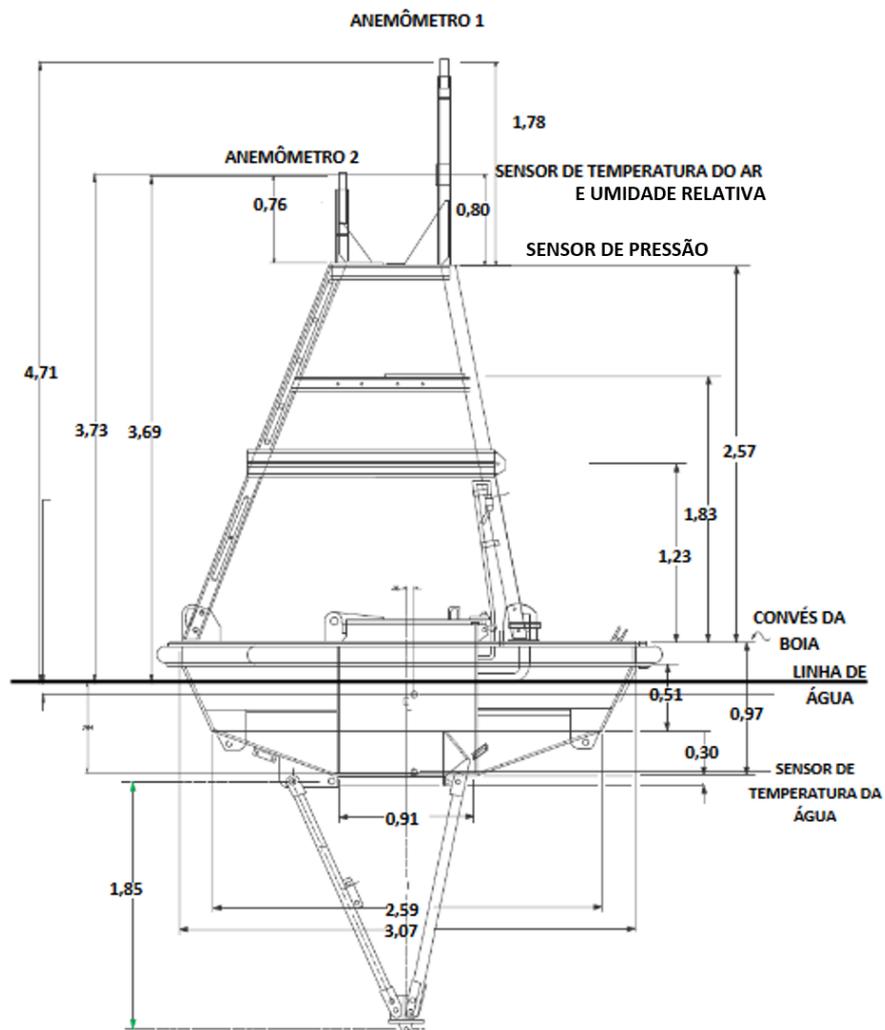


Figura 3.1- Especificações da boia de Santos. Destaque para a altura do sensor de temperatura do ar. Fonte: Adaptado de PNBOIA.

3.2 Dados Coletados via Sensoriamento Remoto

O ASCAT (FIGA-SALDAÑA et al., 2002) é um radar de abertura real a bordo dos três satélites meteorológicos em órbita polar que compõe a série MetOp, um dos ramos do EUMETSAT Polar System (EPS). Os satélites MetOp-A (lançado em 19 de outubro de 2006), MetOp-B (lançado em 17 de setembro de 2012) e MetOp-C (lançado em 7 de novembro de 2018) estão em uma órbita polar baixa, a uma altitude de 817 quilômetros, visando fornecer observações mais detalhadas da atmosfera global, oceanos e continentes (EUMETSAT, 2017). É importante ressaltar que após o lançamento, os satélites passam um período de operação assistida, onde ajustes e calibrações são implementados. Dessa forma, o histórico de dados apresenta alguns meses de defasagem em relação à data de lançamento.

O principal objetivo do ASCAT é medir a velocidade e a direção do vento sobre os oceanos. Para tal, ele opera a uma frequência de 5.255 GHz (Banda C) usando antenas polarizadas verticalmente, e transmite um pulso longo com modulação linear de frequência. Esses pulsos de energia na faixa do microondas são emitidos em direção à superfície do mar, onde os ventos causam distúrbios em pequena escala (centímetros) que modificam as características de retroespalhamento dessa superfície, de uma maneira particular. Essas propriedades de retroespalhamento são bem conhecidas e dependem da velocidade e direção do vento sobre o mar, em relação ao ponto em que a superfície do mar é observada. A bordo do ASCAT, dois conjuntos de três antenas medem o retroespalhamento eletromagnético resultante da rugosidade gerada na superfície oceânica pelo vento, em duas faixas de 500 km de largura, uma de cada lado do percurso terrestre do satélite (Figura 3.2). Das três antenas, uma é orientada na largura da seção a ser medida e as outras duas são orientadas para mais ou menos 45° da seção e, portanto, fazem observações sequenciais do coeficiente de retroespalhamento de cada ponto de interesse em três direções. As três direções são necessárias para resolver a ambiguidade da direção do vento (<https://www.eumetsat.int/ascat> - Acesso: 07/04/2021).

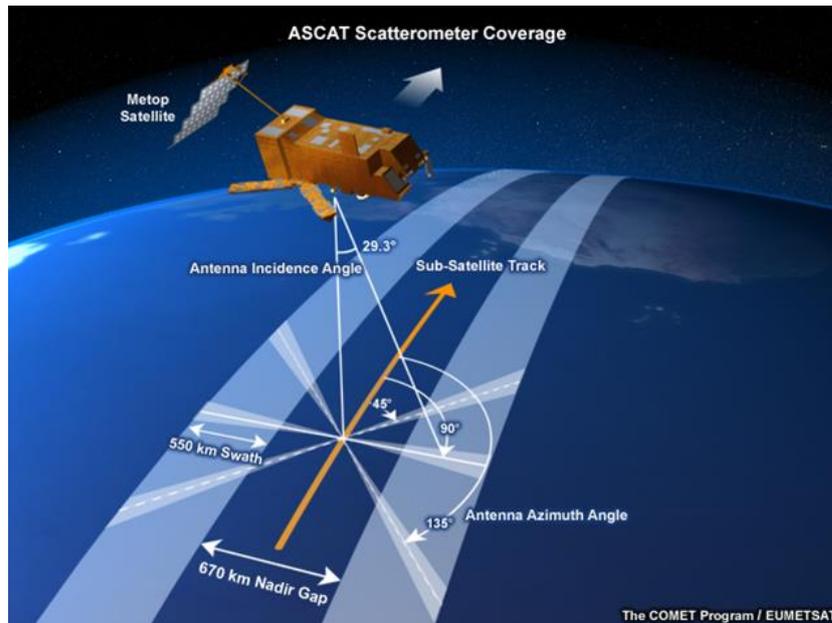


Figura 3.2 - Esquema de funcionamento das antenas do ASCAT a bordo de um satélite da série MetOp. Fonte: The COMET Program.

Os dados do ASCAT estão disponíveis no sítio <http://marine.copernicus.eu/> (Acesso: 16/04/2021). Apenas dados coletados pelo ASCAT a bordo do satélite MetOp-A estão disponíveis para todo o período de dados coletados pelas boias (2009-2017). Ressalta-se que, os dados do ASCAT utilizados neste trabalho foram reprocessados, ou seja, foram tratados usando configurações uniformes de calibração e uma única versão do *software* de processamento (https://scatterometer.knmi.nl/ascat_cdr/ - Acesso: 07/04/2021), o que impede que qualquer tendência espúria seja adicionada aos dados devido à atualizações. Os dados coletados pelo satélite são disponibilizados em dois arquivos, um referente à passagem ascendente do satélite e o outro referente à passagem descendente. Existem diversos níveis de tratamento em que os dados do ASCAT são disponibilizados. Neste trabalho foi utilizado o nível L3, onde os dados já estão em uma grade regular com resolução espacial de $0,125^\circ$ e passaram pelo controle de qualidade aplicado pela *Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility do Royal Netherlands Meteorological Institute* (HACKETT, 2019). Os dados são disponibilizados aos usuários no formato NETCDF.

3.3 Modelagem Numérica: Reanálises

Neste trabalho são avaliadas pontualmente quatro das modernas reanálises globais disponíveis (<https://reanalyses.org/> - Acesso: 16/04/2021), sendo elas: CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2. Apesar de serem do mesmo centro, as Reanálises ERA5 e ERA-Interim foram selecionadas visando possíveis comparações entre as diferentes versões da série ERA.

Em seguida, as reanálises de melhor desempenho na avaliação pontual são avaliadas espacialmente para as variáveis MAG10M, componente zonal do vento a 10 metros (u10M) e componente meridional do vento a 10 metros (v10M). A Tabela 3.2 sumariza as principais características de cada reanálise, e maiores detalhamentos são apresentados nas Seções a seguir.

Tabela 3.2 - Síntese das principais características das reanálises utilizadas neste trabalho. Algumas reanálises possuem resoluções diferentes das indicadas na tabela para variáveis ou versões específicas.

Reanálise	Resolução			Período disponível	Fonte
	Espacial	Temporal	Vertical		
CFSR	0,5°x0,5°	1h	64 níveis	CFSv1: 01/01/1979 - 31/12/2010 CFSv2: 01/01/2011 - dias atuais	NCEP
ERA-Interim	0,75°x0,75°	3h	60 níveis	01/01/1979 – 31/08/ 2019	ECMWF
ERA5	0,25°x0,25°	1h	137 níveis	01/01/1950 - 31/12/1980 (preliminar) 01/01/1979 - dias atuais	ECMWF
MERRA-2	0,5°x0,625°	1h	72 níveis	01/01/1980 - dias atuais	NOAA

3.3.1 Climate Forecast System Reanalysis – CFSR

O CFSR foi a primeira reanálise a utilizar um modelo acoplado oceano-atmosfera, em suas duas versões, aqui chamadas de CFSv1 (SAHA et al., 2010) e CFSv2 (SAHA et al., 2014). O modelo atmosférico utilizado é o *Global Forecast System* (GFS) com resolução horizontal de 38 km (T382) para versão 1 e 24 km para a versão 2 além de 64 níveis verticais. A componente terrestre é o *Noah Land Surface Model* com 4 níveis

verticais (EK et al., 2003) e o modelo oceânico acoplado é o *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Modular Ocean Model version 4* (GRIFFIES et al., 2000). As análises atmosférica e oceânica são geradas a cada 6 horas, porém de maneiras distintas e separadamente. A assimilação terrestre, ocorre a cada 24 horas e usa precipitação observada do Climate Prediction Center (CPC). Os dados de T2M, UR2M são previstos pelo modelo, e não gerados na análise.

A CFSv1 possui dados horários de jan/1979 a dez/2010 com resolução de $0,5^\circ$ de latitude x $0,5^\circ$ de longitude, para todas as variáveis avaliadas e, especialmente para T2M, MAG10M, DIR10M, u10M e v10M, possui também a opção de dados em grade regular de $0,312^\circ$ de latitude x $0,312^\circ$ de longitude.

A CFSv2 possui dados horários de jan/2011 até o presente com resolução de $0,5^\circ$ de latitude x $0,5^\circ$ de longitude para todas as variáveis e, para a T2M, MAG10M, DIR10M, u10M e v10M, possui a opção de dados na grade de $0,204^\circ$ de latitude x $0,204^\circ$ de longitude. Ambas versões possuem 4 análises por dia (00, 06, 12 e 18 UTC) com previsões para +1 até +6 horas. Neste estudo, foram utilizadas as análises de 0, 6, 12 e 18 UTC e as previsões de +1 a +5 horas entre esses horários, formando um conjunto de dados horários.

Como a série temporal da boia de Santos inicia-se no ano de 2011, apenas a CFSv2 foi utilizada, com a maior resolução possível das variáveis para a comparação pontual com os dados observados na boia de Santos. Para a avaliação espacial do vento foi utilizada a resolução $0,5^\circ \times 0,5^\circ$.

Diversos trabalhos disponíveis na literatura mostram uma boa performance do CFSR frente a reanálises mais antigas (e.g. ALVAREZ et al., 2014 e BAO; ZHANG, 2013). Assim, a escolha do CFSR para este trabalho se deu pensando numa comparação com o recém lançado ERA5, por ser desenvolvida pelo NCEP, um centro diferente das demais reanálises utilizadas e também por utilizar um modelo acoplado oceano-atmosfera.

3.3.2 ERA-Interim

ERA significa 'ECMWF Re-Analysis'. ERA-Interim (DEE et al., 2011) é uma reanálise atmosférica global que abrange dados desde 1979 e foi descontinuada em agosto de 2019, sendo substituída pela Reanálise ERA5, também avaliada neste trabalho.

O ERA-Interim usa uma versão fixa de um sistema global de previsão numérica do tempo chamado *Integrated Forecast System (IFS)*, sendo CY31r2 a versão utilizada. O IFS é utilizado operacionalmente pelo ECMWF e é constantemente atualizado. Dessa forma, o uso da versão fixa garante que nenhuma tendência espúria seja causada no conjunto de dados devido à uma atualização (BERRISFORD et al., 2011). A resolução horizontal é de $0,75^\circ$ de latitude x $0,75^\circ$ de longitude quando interpolados em uma grade regular de latitude/longitude, além de contar com 60 níveis na vertical utilizando uma coordenada híbrida sigma/pressão, com o nível superior em 0,1 hPa. A Reanálise também inclui uma análise variacional de 4 dimensões (4D-Var), com uma janela de análise de 12 horas, para assimilação de dados. As saídas atmosféricas são utilizadas como condição de contorno para alimentar a reanálise de ondas oceânicas com grade reduzida de 1° de latitude x 1° de longitude, que resolve 30 frequências de onda e 24 direções nos nós da grade, chamada *Ocean ReAnalysis System 4 (ORAS4)*.

As análises do ERA-Interim estão disponíveis a cada 6 horas (0, 6, 12, 18 UTC) e as previsões possuem resolução temporal de 3 horas, sendo elaboradas a partir das análises de 0 e 12 UTC, conforme ilustrado pela Figura 3.3. Assim, para obter os dados na mais alta resolução temporal possível, é necessário baixar os horários de análise mais as previsões de +3 e +9 horas a partir das análises de 0 e 12 UTC em arquivos separados e concatenar os dados. O ERA-Interim não disponibiliza dados de UR2M em seu pós-processamento, sendo necessário utilizar outros índices de umidade como a temperatura do ponto de orvalho a 2 metros de altura (TD2M) e convertê-los para UR2M.

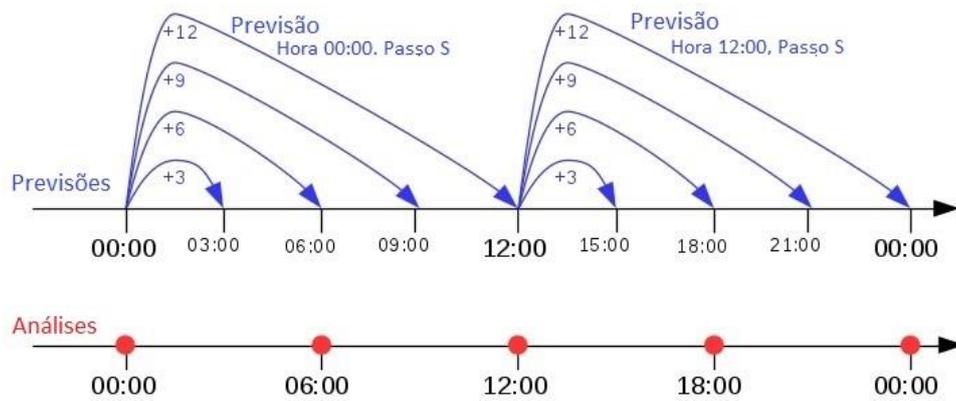


Figura 3.3 – Horários de ‘saída’ das análises e previsões da Reanálise ERA-Interim. Fonte: Adaptado de Copernicus Knowledge Base (<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA-Interim%3A+documentation> – Acesso: 16/04/2021).

A escolha do ERA-Interim para este trabalho se deu visando possíveis comparações com a versão recentemente disponibilizada da série ERA, o ERA5.

3.3.3 ERA5

A Reanálise ERA5 (HERSBACH et al., 2020) é o mais novo dentre os conjuntos de dados avaliados neste trabalho. O ERA5 utiliza a versão CY41R2 do IFS de maneira fixa, evitando que qualquer tendência espúria seja causada no conjunto de dados devido a uma atualização.

A resolução horizontal da Reanálise é de $0,25^\circ$ quando interpolados em uma grade regular de latitude/longitude, além de contar com 137 níveis na vertical, com o nível superior em 0,1 hPa. A coordenada utilizada é sigma/pressão híbrida e assim como o ERA-Interim, o ERA5 também utiliza o 4D-Var para assimilação de dados. O período de dados disponíveis estende-se de 1979 até o presente, entretanto no ano de 2020 foi disponibilizada ao público uma versão preliminar dos dados do período de 1950 a 1978.

Todas as variáveis utilizadas neste trabalho estão disponíveis nas análises do ERA5 que possuem frequência horária. Assim, nenhum dado de previsão foi utilizado. Assim como o ERA-Interim, o ERA5 não disponibiliza dados de UR2M em seu pós-processamento, sendo necessária a conversão dos dados de TD2M em UR2M para a avaliação.

O ERA5 foi escolhido para este trabalho devido aos resultados promissores apresentados por essa Reanálise e por ser o mais novo conjunto de dados disponível.

3.3.4 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2 - MERRA-2

O MERRA-2 (GELARO et al., 2017), foi desenvolvido para substituir sua versão anterior, a Reanálise MERRA, pois o sistema de assimilação de dados da primeira versão foi congelado em 2008 e não era capaz de assimilar vários novos tipos de dados considerados importantes. A principal característica associada ao MERRA-2 é a sua capacidade de assimilação de dados de aerossóis, proporcionando assim uma reanálise multidecadal em que aerossol e observações meteorológicas são assimilados conjuntamente dentro de um sistema global de assimilação de dados.

O MERRA-2 é produzido com a versão 5.12.4 do sistema de assimilação de dados atmosféricos *Goddard Earth Observing System* – GEOS (RIENECKER et al, 2008). Os principais componentes desse sistema são o modelo atmosférico GEOS e o esquema de análise *Gridpoint Statistical Interpolation* (GSI). O modelo usa uma discretização horizontal cúbica-esférica com uma resolução aproximada de 0,50° de latitude x 0,625° de longitude e 72 níveis híbridos eta/pressão da superfície a 0,01 hPa.

O sistema de análise e previsão GEOS-5 pode ser executado em diferentes configurações, sendo a principal configuração chamada de assimilação (*assimilation*), onde uma combinação de análise de dados atmosféricos e previsão de modelo são utilizadas para gerar uma série temporal de variáveis atmosféricas globais.

Os dados disponibilizados no pós-processamento da reanálise são interpolados para uma grade regular ao longo do globo (0,50° de latitude por 0,625° de longitude) e estão disponíveis no período de 01/01/1980 até os dias atuais. Todos os dados utilizados possuem frequência horária e são descritos na documentação como diagnósticos instantâneos dentro da configuração *assimilation* (BOSILOVICH et al., 2016). O MERRA-2 também não disponibiliza dados de UR2M em seu pós-processamento, sendo necessária a conversão da umidade específica a 2 metros de altura (q2M) em UR2M para a avaliação proposta.

A Reanálise MERRA-2 foi escolhida devido ao seu inovador sistema de assimilação de dados.

3.4 Cálculo da Umidade Relativa do Ar

Cada uma das reanálises fornece em seu pós-processamento diferentes dados de umidade. Então, é necessário que todos sejam convertidos para uma única variável para que possam ser comparados. Como a UR2M é a variável de interesse no âmbito do projeto em que essa dissertação foi desenvolvida, os dados de TD2M extraídos das Reanálises ERA-Interim e ERA5 e os dados de q2M extraídos do MERRA-2 são convertidos para UR2M utilizando a metodologia descrita em ROGERS e YAU (1996), apresentada a seguir:

A UR2M é dada pela divisão da pressão real de vapor (e) pela pressão de vapor de saturação (e_s), conforme apresentado na Equação 3.1.

$$UR2M = \frac{e}{e_s} \quad \text{Equação 3.1}$$

Para a conversão da TD2M em UR2M calcula-se os valores da pressão real de vapor (e) e da pressão de vapor de saturação (e_s) a partir dos valores de TD2M e T2M, respectivamente, utilizando as Equação 3.2 e Equação 3.3.

$$e(TD2M) = 6,112 \exp\left(\frac{17,67 * TD2M}{TD2M + 243,5}\right) \quad \text{Equação 3.2}$$

$$e_s(T2M) = 6,112 \exp\left(\frac{17,67 * T2M}{T2M + 243,5}\right) \quad \text{Equação 3.3}$$

Já para a conversão de q2M em UR2M, são necessárias as variáveis q2M, T2M e PNMM. Para o cálculo do valor de e_s utiliza-se a Equação 3.3, enquanto para o cálculo de e utiliza-se a aproximação apresentada na Equação 3.4, onde ϵ é uma constante com valor de 0,622.

$$e \approx \frac{q2M * PNMM}{\varepsilon} \quad \text{Equação 3.4}$$

3.5 Metodologia de Avaliação pontual das reanálises e do ASCAT

Visando identificar se resultados mais acurados poderiam ser obtidos utilizando um (ERA0), quatro (ERA4) ou nove (ERA9) pontos de grade do Era-Interim próximos à boia de Santos, uma avaliação prévia é realizada. A Reanálise ERA-Interim foi escolhida, por possuir a menor resolução espacial dentre as quatro reanálises utilizadas. Para que tal comparação seja possível, utiliza-se uma interpolação que leva em consideração a distância ao quadrado em relação à posição do dado observado (SLUITER, 2009). O peso atribuído a cada ponto de grade do ERA-Interim em relação à boia é calculado pela Equação 3.5 e a média ponderada para 4 pontos e para os 9 pontos de cada variável é dada pela Equação 3.6 e pela Equação 3.7, respectivamente.

$$Peso_n = \frac{1}{d_n^2} = \frac{1}{(latref-lat_n)^2 + (lonref-lon_n)^2} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$Vpond4 = \frac{\sum_{n=0}^3 (V_n * Peso_n)}{\sum_{n=0}^3 (Peso_n)} \quad \text{Equação 3.6}$$

$$Vpond9 = \frac{\sum_{n=0}^8 (V_n * Peso_n)}{\sum_{n=0}^8 (Peso_n)} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

n= número do ponto de grade do ERA-Interim, variando de 0 a 8.

Peson= peso atribuído do ponto n a partir da sua distância até a boia

latref= latitude média da boia

lonref= longitude média da boia

lat_n=latitude do ponto n do ERA-Interim

lon_n=longitude do ponto n do ERA-Interim

V_n=variável em análise no ponto n, exemplo: PNMM, UR2M, etc.

dn= distância entre a boia e o ponto n do ERA-Interim

Os valores obtidos para cada variável (PNMM, T2M, UR2M e MAG10M), considerando-se ERA0, ERA4 e ERA9, foram avaliados considerando as métricas estatísticas descritas em WILKS (1995), sendo elas: BIAS, RMSE, CORR, Desvio Padrão (DP) e Desvio Padrão da Observação (DPobs), cujas equações são dadas por:

$$BIAS = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Reanálise_i - Boia_i) \quad \text{Equação 3.8}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Reanálise_i - Boia_i)^2} \quad \text{Equação 3.9}$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^m (Boia_i - \overline{Boia})X(Reanálise_i - \overline{reanálise})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (Boia_i - \overline{Boia})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^m (Reanálise_i - \overline{reanálise})^2}} \quad \text{Equação 3.10}$$

$$DP = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Reanálise_i - \overline{reanálise})^2} \quad \text{Equação 3.11}$$

$$DPobs = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Boia_i - \overline{Boia})^2} \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde:

$Boia_i$ = dado observado no tempo i ;

\overline{Boia} = média da variável avaliada coletada pela Boia;

$\overline{Reanálise}$ = média da variável avaliada simulada pela reanálise;

$reanálise_i$ = dado extraído do ponto de grade mais próximo à boia no tempo i ;

m = número de observações presentes na série de dados.

Visando o melhor entendimento do texto, uma breve revisão sobre as métricas estatísticas é apresentada a seguir:

O BIAS é a média das diferenças entre o previsto e o observado e indica apenas se a variável em estudo está sendo subestimada ($BIAS < 0$) ou superestimada ($BIAS > 0$). Não fornece nenhum tipo de informação sobre a magnitude do erro.

A RMSE é calculada elevando o valor do erro ao quadrado. Seus resultados são sempre positivos, onde RMSE aumenta a partir do zero (para previsões perfeitas) até grandes valores positivos (quando a diferença entre a previsão e a observação é muito grande). Considera-se um bom resultado se a RMSE for menor que o DPobs.

A CORR é um método que permite avaliar uma possível associação linear bidirecional entre duas variáveis contínuas. Pode variar entre -1 e 1 e quanto mais forte a CORR, mais o coeficiente se aproxima desses valores. A $CORR = -1$ indica uma relação inversa entre as séries comparadas. Similarmente, se $CORR = 1$ tem-se uma relação direta entre as séries de dados (MUKAKA, 2012). Dessa forma, a partir desta métrica estatística é possível inferir a capacidade da reanálise em representar a variabilidade dos dados observados. Neste trabalho a CORR será classificada de acordo com os limiares apresentados na Tabela 3.3, assim como em MUKAKA (2012).

Tabela 3.3 - Limiares estabelecidos para classificação da correlação (apresentado apenas para valores positivos), adaptado de MUKAKA (2012).

Muito forte	$\text{CORR} \geq 0,9$
Forte	$0,7 \leq \text{CORR} < 0,9$
Moderada	$0,5 \leq \text{CORR} < 0,7$
Fraca	$0,3 \leq \text{CORR} < 0,5$
Muito fraca	$0 \leq \text{CORR} < 0,3$

Por fim, o DP e o DPobs se referem a mesma métrica, porém o DPobs é calculado utilizando os dados da observação e o DP os dados extraídos das reanálises. Essa métrica é uma medida que fornece uma ideia da dispersão da série de dados. Altos valores de DP indicam que os valores presentes na série de dados tendem a estar mais distantes da média (série mais espalhada), enquanto que o oposto é válido para pequenos valores de DP.

O resultado da comparação entre as interpolações ERA0 x ERA4 e ERA0 x ERA9 é apresentado na Seção 4.1. Vale ressaltar que a partir do resultado encontrado, decidiu-se utilizar apenas os dados do ponto mais próximo à boia. Dessa forma, a metodologia apresentada como ERA0 foi utilizada na comparação das demais reanálises utilizadas neste trabalho com os dados coletados *in-situ*. A utilização do ponto mais próximo para a avaliação dos dados vem sendo usada em diversos outros trabalhos (e. g. ALVAREZ et al., 2014; DEREZYNSKI et al., 2019; DEREZYNSKI; MENEZES, 2015; LOPES, 2018; PETROBRAS, 2017), sendo agora comprovada sua eficácia.

Por ser um dado gerado via sensoriamento remoto, ou seja, ser uma medida indireta, a mesma metodologia descrita acima como ERA0 foi utilizada para a avaliação pontual dos dados do ASCAT. Somente nos horários em que os dados são concomitantes, os dados estimados via sensoriamento remoto são confrontados com os coletados pela boia. As métricas estatísticas BIAS, RMSE, CORR, DPobs e desvio padrão dos dados do ASCAT (DPascats) são calculadas conforme descrito na Equação 3.8, na Equação 3.9, na Equação 3.10 e na Equação 3.11, substituindo os termos com os dados da reanálise pelos dados do ASCAT. Os resultados da avaliação pontual do ASCAT são apresentados na Seção 4.4.

A Tabela 3.4 apresenta a latitude e a longitude dos pontos de grade de cada reanálise e do ASCAT mais próximos à localização da boia de Santos. A partir da análise dos resultados cuja metodologia foi apresentada nesta Seção, selecionou-se os conjuntos de dados simulados numericamente que apresentaram melhores resultados.

Tabela 3.4 - Localização da boia de Santos e do ponto de grade mais próximo a ela, de cada reanálise avaliada e do ASCAT. As distâncias são calculadas usando a calculadora disponível em: <https://www.nhc.noaa.gov/gccalc.shtml> (Acesso em 16/04/2021) e os resultados são arredondados para a unidade inteira mais próxima.

Conjunto de dados	Latitude	Longitude	Distância (km)
boia de Santos	-25,28	-44,93	-
CFSR	-25,50	-45,00	25
ERA-Interim	-25,25	-44,75	18
ERA5	-25,25	-45,00	8
MERRA-2	-25,50	-45,00	8
ASCAT	-25,31	-44,94	3

3.6 Metodologia de Avaliação espacial das reanálises

Visando manter o mesmo período de dados disponíveis nas boias do PNBOIA, foi selecionado o período de 2009 a 2017 para a avaliação espacial das reanálises que apresentam melhor desempenho na avaliação pontual do vento: CFSR e ERA5. A metodologia para a avaliação espacial das reanálises, confrontando-as com os dados coletados pelo ASCAT a bordo do satélite MetOp-A, é apresentada a seguir.

A região selecionada para avaliação (Figura 3.4) compreende parte do Oceano Atlântico Sul, situada entre os paralelos de 10°N a 60°S e os meridianos de 0°W a 80°W, englobando a BS.

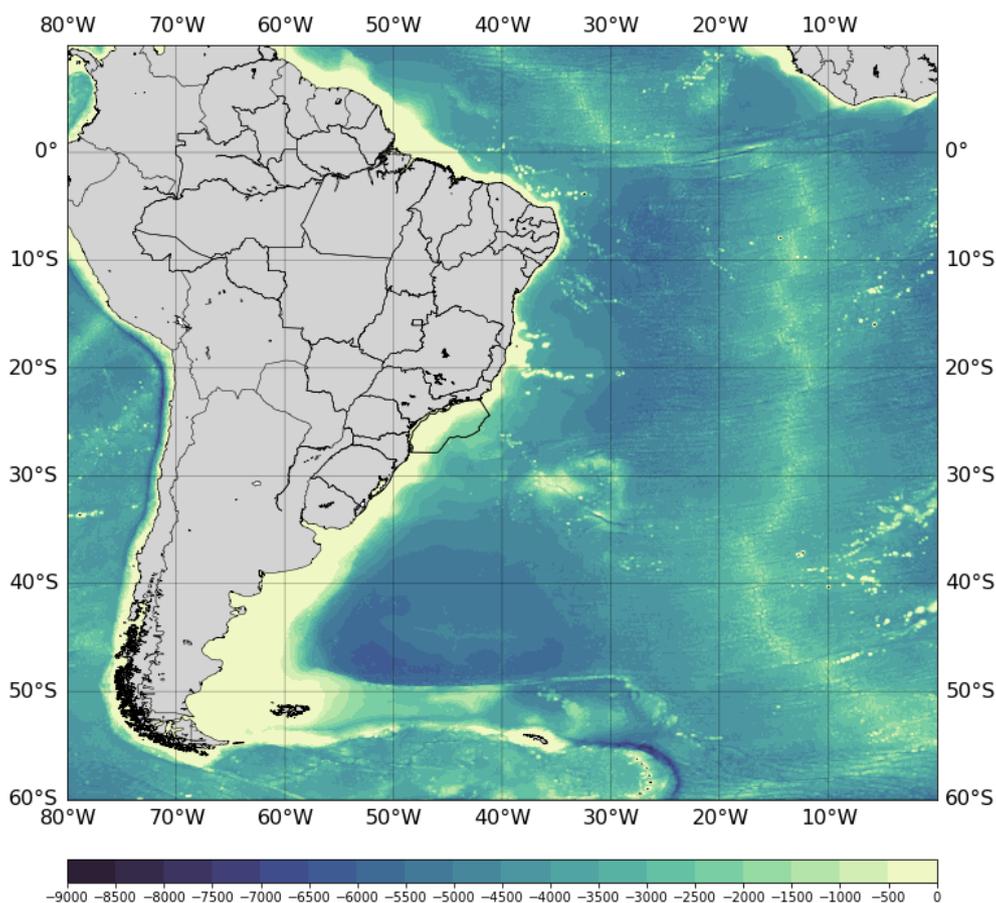


Figura 3.4 - Região selecionada para a comparação espacial das Reanálises CFRS e ERA5, confrontando com os dados coletados pelo ASCAT. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura. O campo em sombreado indica a batimetria da região (m).

Para que os dados de MAG10M, u10M e v10M do ASCAT e das reanálises possam ser comparados, alguns tratamentos precisam ser feitos em ambos. Os horários em que o satélite passa sobre a superfície do planeta Terra são disponibilizados como uma variável junto aos dados, entretanto devido à sua funcionalidade, o ASCAT não mede dados de vento sobre o continente. Como o horário da passagem do satélite é utilizado como máscara para cortar os dados das reanálises, o primeiro tratamento aplicado foi excluir os dados do horário da medição que se encontravam sobre o continente (Figura 3.5).

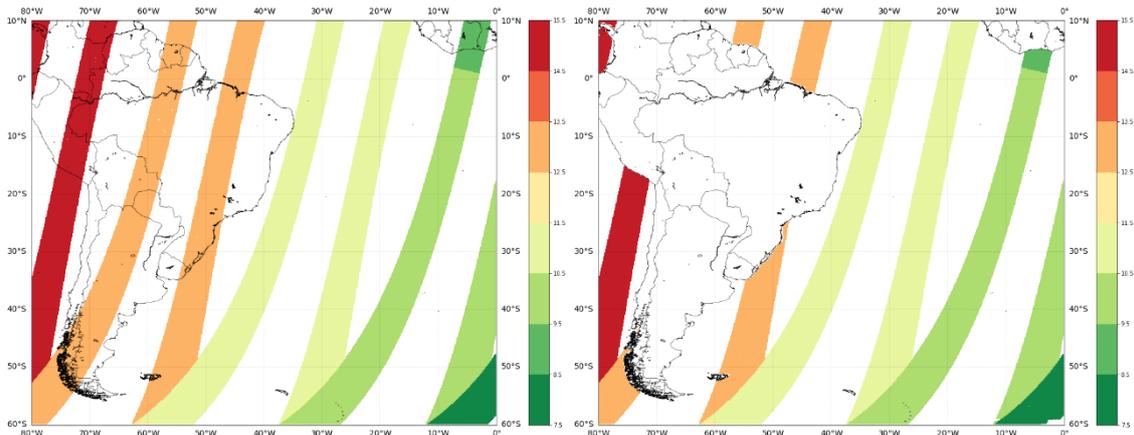


Figura 3.5 - Regiões com dados de horário de passagem descendente do ASCAT pela região de estudo para o dia 01/01/2009. A figura da esquerda mostra o dado bruto, com o horário de passagem do satélite sobre o continente. A figura da direita mostra os dados já recortados, sem valores sobre as regiões continentais. A medida de tempo utilizada é hora UTC.

Os dados das reanálises e do ASCAT possuem resoluções diferentes, o que impede a comparação direta entre eles. Dessa forma, a interpolação bilinear foi utilizada para interpolar as grades do ERA5, de $0,25^\circ$, e do ASCAT, de $0,125^\circ$, para a grade menos refinada do CFSR, de $0,5^\circ$ assim como em NEHME et al. (2019). A escolha da utilização da grade menos resolvida se deu pois, dessa forma, em vez de criar novos pontos com valores puramente interpolados, são utilizados os valores dos pontos já existentes nas grades das reanálises de maior resolução. Além disso, o custo computacional para elaboração das avaliações foi substancialmente reduzido.

Comumente utilizada para tratamento de pixels em imagens, a interpolação bilinear também é utilizada para interpolações em grades regulares. A esquematização da interpolação bilinear é apresentada na Figura 3.6. Considerada uma interpolação com resultados mais suavizados quando comparada ao método do vizinho mais próximo, ela utiliza os 4 pontos mais próximos para calcular o ponto desejado em duas etapas, sempre levando em consideração a distância (SCHOWENGERDT, 2007). Primeiro, é feita uma interpolação linear no eixo x, onde a partir dos pontos Q12 e Q22 (Q11 e Q21) é gerado o ponto R2 (R1), em seguida a interpolação linear é feita no eixo y, onde a partir dos pontos R1 e R2 é calculado o ponto P.

Tanto o corte dos dados de horário de passagem do satélite sobre o continente quanto a interpolação Bilinear foram feitos utilizando o *Climate Data Operators* (CDO), uma coleção de linhas de comando desenvolvida no *Max-Planck-Institut für Meteorologie* para manipular e analisar dados (SCHULZWEIDA, 2019).

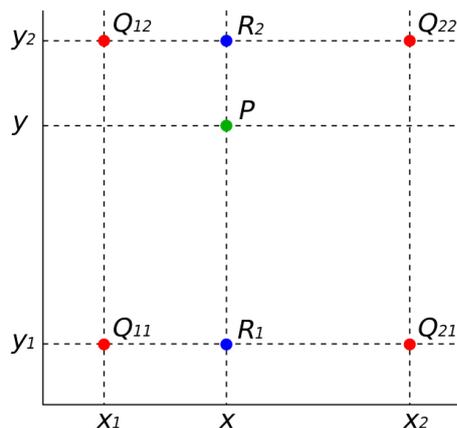


Figura 3.6 - Esquemática da interpolação Bilinear para o ponto P (verde) a partir dos dados disponíveis nos pontos Q_{11} , Q_{12} , Q_{21} e Q_{22} (vermelho). Os pontos azuis representados como R1 e R2 indicam os pontos calculados na etapa intermediária da interpolação (Fonte: ARANA, 2016).

Em seguida, os dados horários das reanálises, já na resolução de $0,5^\circ$, foram cortados utilizando o horário da passagem do satélite aproximado para a hora cheia mais próxima (com tolerância de ± 30 min) e anexados até formar um campo diário com os mesmos horários em que os dados foram coletados pelo ASCAT. Ou seja, no campo da 01 UTC dos dados da reanálise, apenas a área em que o ASCAT passou entre 00:30 e 01:29 UTC é recortada e adicionada ao novo arquivo. O mesmo processo se repete nos demais horários, até que um arquivo diário seja montado. Por fim, os valores de u_{10M} e v_{10M} do CFSR e do ERA5 foram convertidos em magnitude do vento usando a Equação 3.13.

$$MAG_{10M} = \sqrt{u_{10M}^2 + v_{10M}^2} \quad \text{Equação 3.13}$$

Todas as avaliações são elaboradas apenas quando os dados observados (ASCAT) e os dados das reanálises são concomitantes. Como não há falhas nas séries de dados das reanálises, as avaliações são feitas sempre que os dados do ASCAT estão disponíveis para a região.

Finalizados os procedimentos listados acima, tem-se arquivos com a mesma resolução espacial e temporal para comparação. Assim é possível calcular para cada ponto do domínio as métricas estatísticas descritas em WILKS (1995) e apresentadas na Seção 3.5, sendo elas: CORR, BIAS, RMSE, DP (para as reanálises) e DPascat. Também são elaboradas as médias de cada variável (MAG_{10M} , u_{10M} e v_{10M}).

O ASCAT utiliza a rugosidade que o vento gera na superfície oceânica para inferir a direção e velocidade do vento. Assim, regiões rasas, em que o fundo interfere na

superfície da coluna d'água, são uma limitação para o sensor. Além disso, o tipo de aproximação cartográfica utilizada nas máscaras de continentes e limitações das próprias reanálises (mudança da interface oceano-continente), tornam a avaliação dos dados em áreas costeiras sujeitas a diversos tipos de erros que não ocorrem em áreas profundas. Tanto NEHME et al. (2019) quanto BELMONTE RIVAS et al. (2019) destacam tais áreas como regiões com valores elevados de erros em seus resultados.

Para evitar a contaminação associada a áreas rasas, foi elaborada uma máscara que descarta dados a uma profundidade menor que 70 m ou distância radial de 50 km da costa. Tais valores foram escolhidos a partir do encontrado na literatura (RIBAL; YOUNG, 2020) e levando em consideração a resolução dos dados utilizados. A Figura 3.7 traz um exemplo da utilização da máscara, apresentando um zoom na região da BS. Na Figura 3.7a é possível notar valores extremos de BIAS de maneira agrupada junto à costa, associados às limitações destacadas anteriormente. Com a utilização da máscara, tais valores são retirados do domínio, permitindo uma melhor análise do campo proposto (Figura 3.7b).

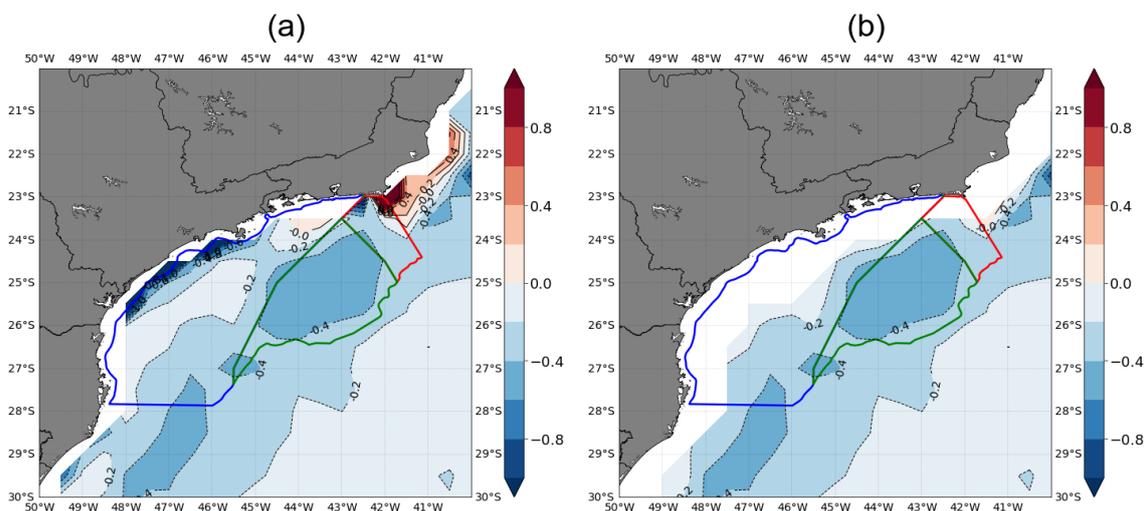


Figura 3.7 – Exemplo de Bias (m/s) calculado para cada ponto de grade, com zoom na região da BS, para a variável MAG10M da Reanálise ERA5. A figura da esquerda (a) apresenta os resultados sem a aplicação da máscara proposta enquanto que a figura da direita (b) apresenta os resultados com a máscara.

Destaca-se que a linguagem de programação python foi utilizada em todas as etapas deste trabalho. Tanto na otimização do uso do CDO, quanto para os recortes dos dados das reanálises, no cálculo das métricas estatísticas e na confecção das imagens apresentadas nos Resultados.

Ressalta-se que, a partir dos resultados encontrados em cada etapa desta pesquisa, foram definidas as metodologias e conjuntos de dados utilizados nas etapas seguintes. Apesar de tais escolhas serem explicadas ao longo do texto, elas encontram-se sumarizadas no fluxograma apresentado na Figura 3.8.

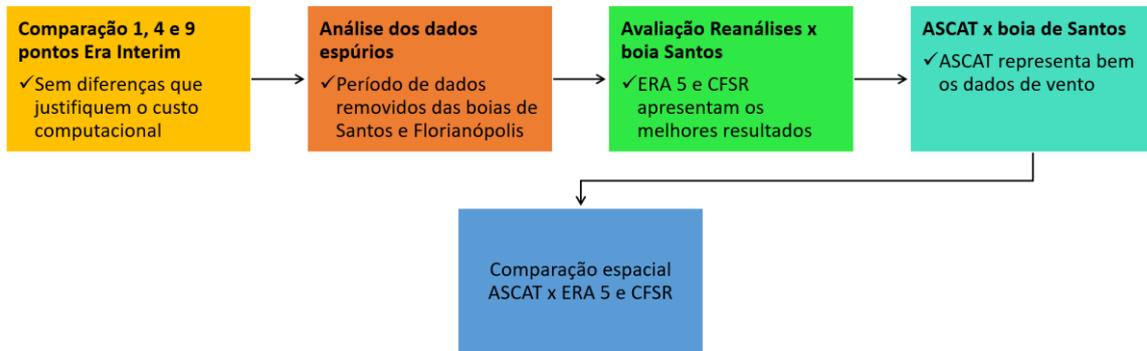


Figura 3.8 – Fluxograma que sumariza as etapas e os principais resultados encontrados ao longo da dissertação.

4. Resultados

Neste Capítulo são apresentados os resultados dos testes do uso de interpolação de diversos pontos de grade na avaliação (Seção 4.1), os problemas encontrados nos dados coletados pelas boias de Santos e Florianópolis (Seção 4.2), seguido pelos resultados da avaliação pontual das Reanálises CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2 para as variáveis PNMM (Seção 4.3.1), T2M (Seção 4.3.2), UR2M (Seção 4.3.3), MAG10M e DIR10M (Seção 4.3.4).

Também são apresentadas a avaliação pontual dos dados de MAG10M e DIR10M estimados pelo ASCAT (Seção 4.4) e a avaliação espacial das Reanálises CSFR e ERA5 para as variáveis MAG10M, u_{10M} e v_{10M} (Seção 4.5).

4.1 Avaliação da Interpolação de Diversos Pontos de Grade

Conforme apresentado na Metodologia (Seção 3.5), foi realizada uma avaliação prévia com 1 (ERA0), 4 (ERA4) e 9 (ERA9) pontos extraídos da Reanálise ERA-Interim para o entorno do ponto da boia de Santos. Tal Reanálise foi escolhida por ter a menor resolução espacial. Para essa avaliação, foram usados os dados do ERA-Interim no entorno da localização média da boia de Santos. A Figura 4.1 apresenta o gráfico de dispersão com os valores obtidos para cada variável: PNMM, T2M, UR2M e MAG10M considerando-se ERA0, ERA4 e ERA9. Nela é possível notar que não há diferenças relevantes entre os dados extraídos do ponto de grade mais próximo à boia (ERA0) e os dados em que a interpolação foi utilizada (ERA4 e ERA9), em nenhuma das variáveis analisadas considerando ERA0 *versus* ERA4 e ERA0 *versus* ERA9.

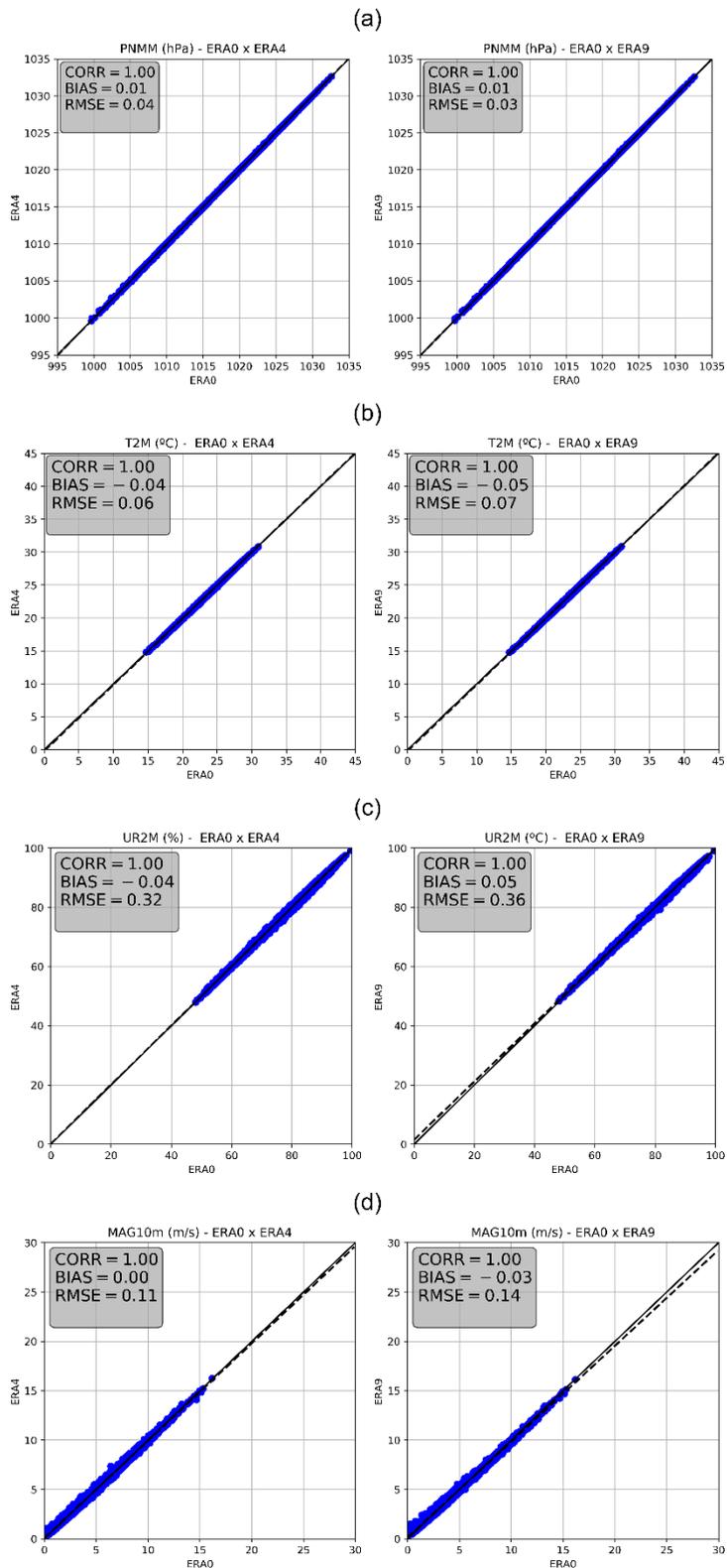


Figura 4.1 - Gráfico de dispersão e métricas estatísticas para as variáveis (a) PNMM, (b) T2M, (c) UR2M e (d)MAG10M extraídas da Reanálise ERA-Interim para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. O gráfico da esquerda apresenta os dados ponderados de 4 pontos de grade (eixo y) versus os dados do ponto mais próximo à boia (eixo x), enquanto que o da direita apresenta os valores ponderados de 9 pontos de grade versus o ponto mais próximo à boia (eixo x). A linha tracejada indica a reta que melhor se ajusta aos dados.

A interpolação tem um alto custo computacional associado e não foram encontradas diferenças relevantes entre o ponto mais próximo da boia e a interpolação para a Reanálise ERA-Interim, a de menor resolução dentre as 4 aqui analisadas. Decidiu-se, então, que para as demais avaliações apresentadas no decorrer deste trabalho, será utilizado apenas o ponto de grade mais próximo à boia, ou seja, o método descrito como ERA0. Ressalta-se que a metodologia do ponto mais próximo também foi utilizada nos trabalhos de ALVAREZ et al. (2014), DEREZYNSKI et al. (2019); DEREZYNSKI e MENEZES, (2015), LOPES (2018), PETROBRAS (2017).

Além da análise das métricas estatísticas, também são utilizados os ciclos diurnos e anuais para avaliação da capacidade das reanálises em representar as variáveis medidas pela boia de Santos.

4.2 Erros Detectados nos Dados Observacionais

Ao longo das avaliações dos dados da boia de Santos foi identificado um período em que os valores de intensidade do vento eram significativamente mais elevados do que o restante da série temporal observada, mesmo após a aplicação do tratamento de dados por parte da Marinha do Brasil. Assim, tal período de dados de MAG10M e DIR10M compreendido entre 01/08/2012 e 30/04/2013 (9 meses), foi removido. Esse problema foi identificado com o auxílio das reanálises, onde a diferença entre os dados observados e os dados simulados mostrou claramente o período em que os valores observados eram mais elevados conforme pode ser observado na Figura 4.2, elaborada usando os dados da boia de Santos e do ERA5.

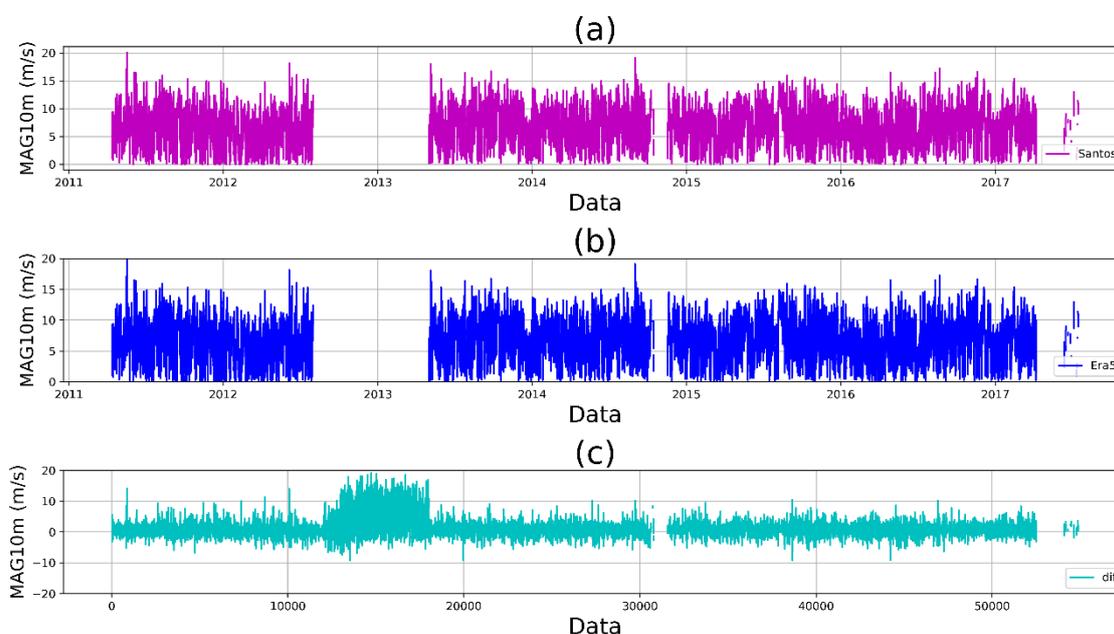


Figura 4.2 - Séries temporais de MAG10M (m/s) para a localização da boia de Santos. (a): período total de dados observados; (b): período total de dados observados, excluindo-se o período 01/08/2012 a 30/04/2013; (c): Diferença (m/s) entre MAG10M observado na boia de Santos e MAG10M simulada pelo ERA5 para o ponto de grade mais próximo à boia de Santos.

Posteriormente, durante a avaliação dos dados de MAG10M e DIR10M coletados pelo ASCAT, notou-se nos dados de DIR10M da boia de Santos um período de aproximadamente 10 meses, entre 2013 e 2014, em que a direção do vento era persistentemente de SSW ($\sim 240^\circ$), o que não ocorre nos demais anos da série. Visando investigar se de fato se tratava de algum possível erro no dado observado, foram geradas

distribuições anuais de frequência de ocorrência direcional dos ventos, apresentadas na Figura 4.3, onde é possível notar que a distribuição dos anos de 2013 e 2014 diferem das demais, com predominância da direção de SSW. Tal fato acaba por impactar na média de todo o período de dados onde, além da direção predominante de NE, aparece uma segunda direção predominante de SSW.

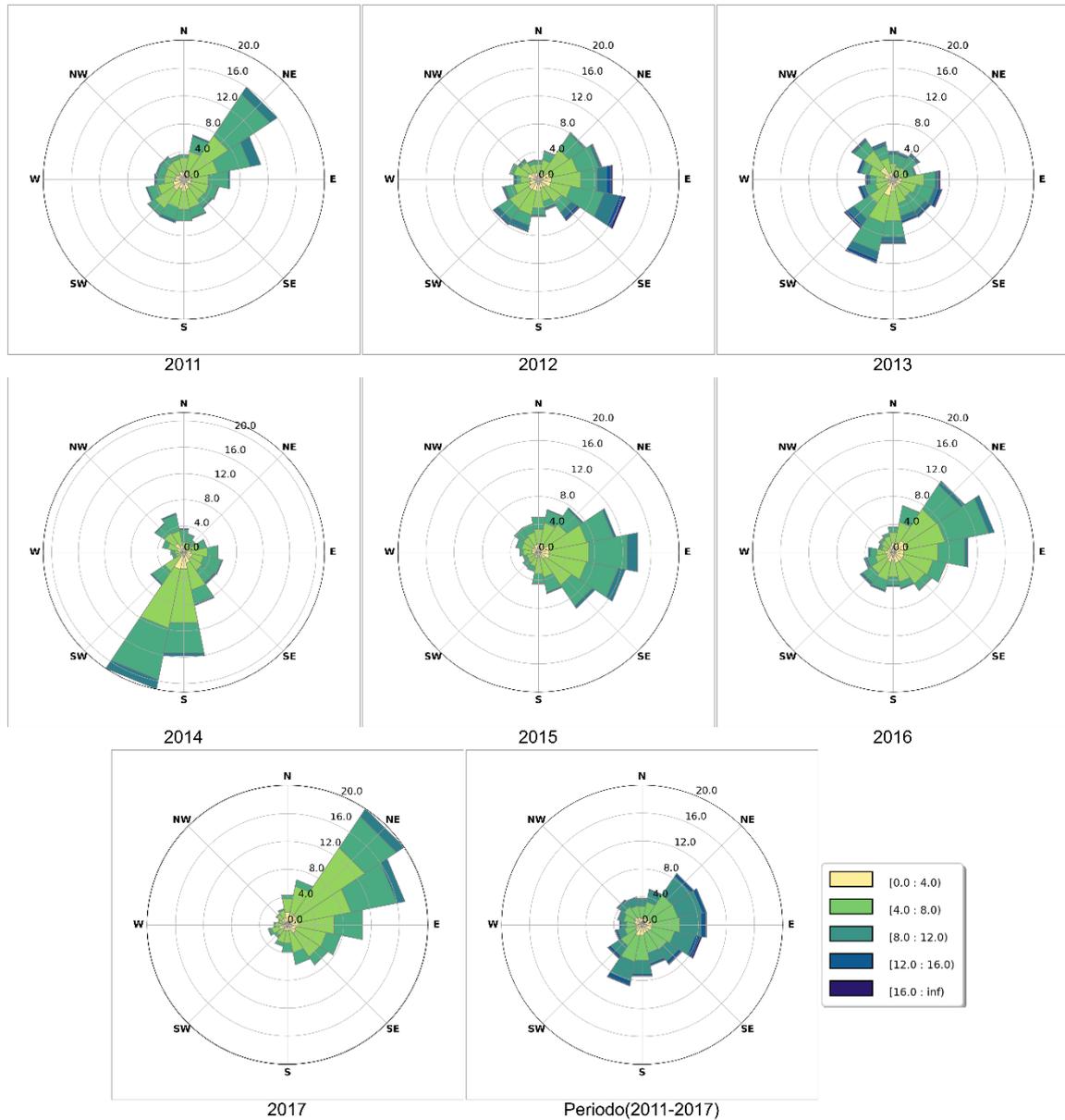


Figura 4.3 - Distribuição de frequência anual de ocorrência direcional dos ventos elaborada com os dados coletados pela boia de Santos. Destacam-se os anos de 2013 e 2014 onde a direção predominante passa a ser de SSW e acaba impactando a distribuição dos ventos de todo o período de dados. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s.

Os dados de MAG10M e DIR10M do CFSR, do ERA5 e do ASCAT também ajudaram na detecção dessa direção anômala de SSW encontrada nos dados observados na boia de Santos. As Reanálises CFSR e ERA5 foram escolhidas para auxiliar nessa avaliação por apresentaram os melhores resultados na avaliação pontual (vide Seção 4.3.4). A Figura 4.4 apresenta a distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos das reanálises (CFSR e ERA5), do ASCAT e da boia de Santos para o período de 2011 a 2017. Quando comparadas, apenas a distribuição de frequência da boia de Santos apresenta uma segunda direção predominante de SSW. Dessa forma, os dados de MAG10M e DIR10M do período compreendido entre 01/11/2013 a 30/10/2014 também foram removidos para a elaboração das avaliações.

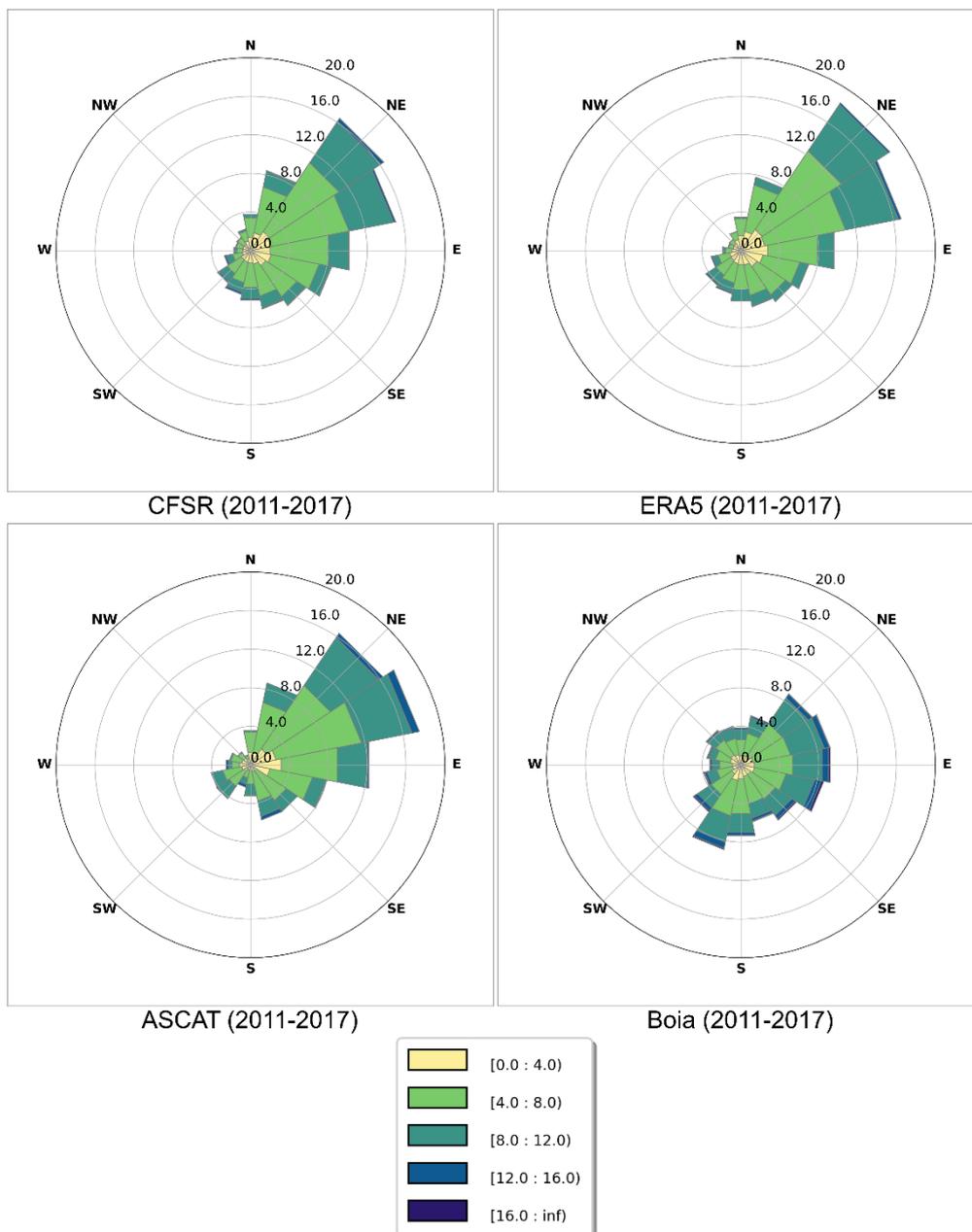


Figura 4.4 - Distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com: (a) dados do CFSR no ponto de grade mais próximo à boia de Santos, (b) dados do ERA5 no ponto de grade mais próximo à boia de Santos, (c) dados coletados pelo escaterômetro ASCAT a bordo do MetOp-A e (d) dados coletados na boia de Santos. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s. O período de dados se estende de 12/04/2011 a 15/07/2017. As distribuições de frequências do CFSR e do ERA5 foram confeccionadas nos mesmos períodos em que há dados coletados pela boia. A distribuição de frequência do ASCAT foi elaborada utilizando os períodos em que há dados coletados pela boia e pelo escaterômetro concomitantemente.

Para os dados da boia de Florianópolis, destaca-se que em alguns registros havia somente dados de MAG10M, sem os respectivos dados de DIR10M. A visualização desse problema ficou mais fácil após a seleção dos horários em que os dados do ASCAT e os

dados da boia estavam disponíveis concomitantemente, conforme mostra a Figura 4.5. Dessa forma, ao descartar os dados de MAG10M, a série foi reduzida significativamente.

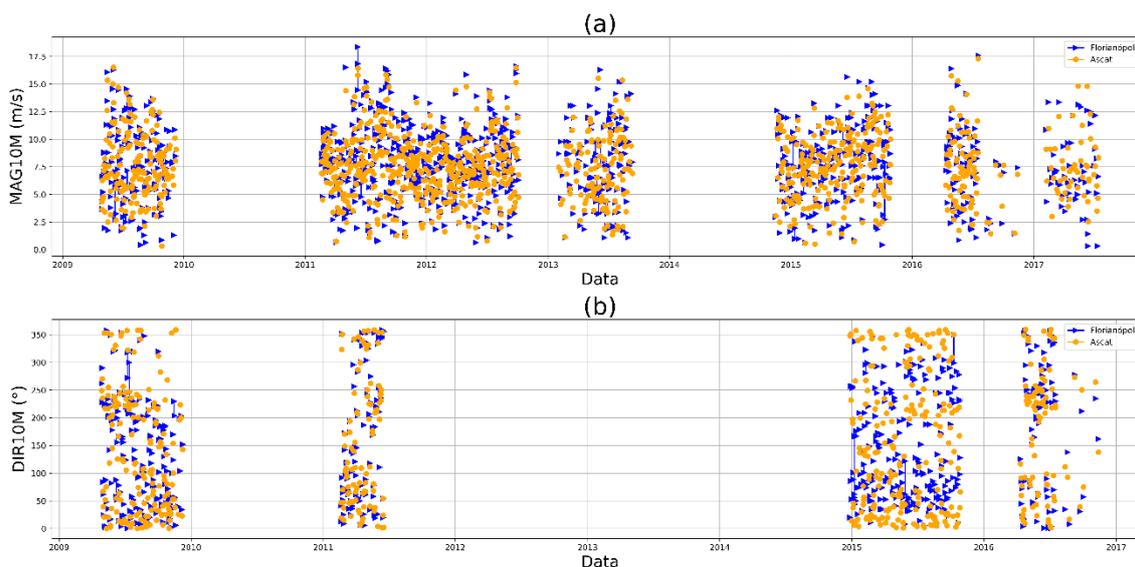


Figura 4.5 - Série temporal de (a) MAG10M e (b) DIR10M coletados pela boia de Florianópolis e pelo ASCAT concomitantemente no período de 22/04/2009 a 15/07/2017. Os triângulos azuis referem-se aos dados da boia de Florianópolis e os pontos amarelos os dados do ASCAT.

Dessa forma, é importante destacar que todos os períodos de dados espúrios descritos acima foram removidos das séries para a elaboração das avaliações pontuais das reanálises (CFSR, ERA5, ERA-Interim e MERRA-2) e do ASCAT, que serão apresentadas nas Seções a seguir. Após a remoção dos problemas relatados, as falhas encontradas para as variáveis estudadas são apresentadas na Tabela 4.1. O percentual de falha dos dados de MAG10M e DIR10 para a boia Florianópolis foi de 77,83%. Devido ao elevado número de falhas nessa boia, optou-se por não utilizar tais dados nas avaliações apresentadas neste trabalho.

Tabela 4.1 - Percentual de falhas nos dados observados nas Boias de Santos e de Florianópolis.

Variável	Santos (2011- 2017)	Florianópolis (2009 – 2017)
PNMM	5,76%	55,74%
T2M	5,97%	55,63%
UR2M	28,65%	57,40%
MAG10M e DIR10M	33,05%	77,83%

A Tabela 4.2 sumariza os períodos de dados de MAG10M e DIR10M disponíveis na boia de Santos após removidos os períodos acima. Destaca-se que nos períodos disponíveis também existem algumas falhas no dado, mas de maneira pontual.

Tabela 4.2 - Período de dados de MAG10M e DIR10M disponíveis na boia de Santos, após a remoção dos dados espúrios descritos neste capítulo.

Início	Fim
12/04/2011	31/07/2012
01/05/2013	31/10/2013
16/11/2014	15/07/2017

4.3 Avaliação Pontual das reanálises

Nesta Seção são apresentados os resultados da avaliação pontual de quatro diferentes conjuntos de dados simulados numericamente para as variáveis PNMM, T2M, UR2M, MAG10M e DIR10M.

4.3.1 Avaliação da PNMM

A PNMM é a variável melhor representada, com CORR de 0,99 (muito forte) para as quatro reanálises avaliadas. Para todas as reanálises, o RMSE é menor que o DPobs e os valores de BIAS são positivos, indicando uma superestimativa da PNMM por parte das reanálises (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de PNMM (hPa) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2.

Métrica estatística	CFSR	ERA-Interim	ERA5	MERRA-2
CORR	0,99	0,99	0,99	0,99
BIAS (hPa)	0,44	0,67	1,02	0,90
RMSE (hPa)	0,84	0,94	1,16	1,16

$$DP_{obs} = 4,81hPa$$

A Figura 4.6a e a Figura 4.6b apresentam os ciclos anual e diurno da PNMM, respectivamente. Nota-se que as reanálises representam bem o ciclo anual da PNMM, apesar de exibirem uma superestimativa, principalmente nos meses de inverno, quando ocorre o máximo de pressão. No ciclo diurno, também é possível notar a superestimativa por parte das reanálises, com diferenças mais aparentes entre elas devido à ampliação da escala (entre 1013 e 1017 hPa) em relação ao gráfico do ciclo anual. O CFSR consegue representar bem os horários de máxima PNMM, mas atrasa em 1 hora os horários de mínima. As reanálises que simulam melhor os horários de picos e vales do ciclo diurno da PNMM são ERA5 e MERRA-2. Para ambos os ciclos, o CFSR é a reanálise que menos superestima a PNMM e o ERA5 a que mais superestima. Apesar disso, a magnitude da superestimativa no ERA5 é similar em todo o ciclo diurno, o que poderia facilitar uma correção de erros sistemáticos no futuro.

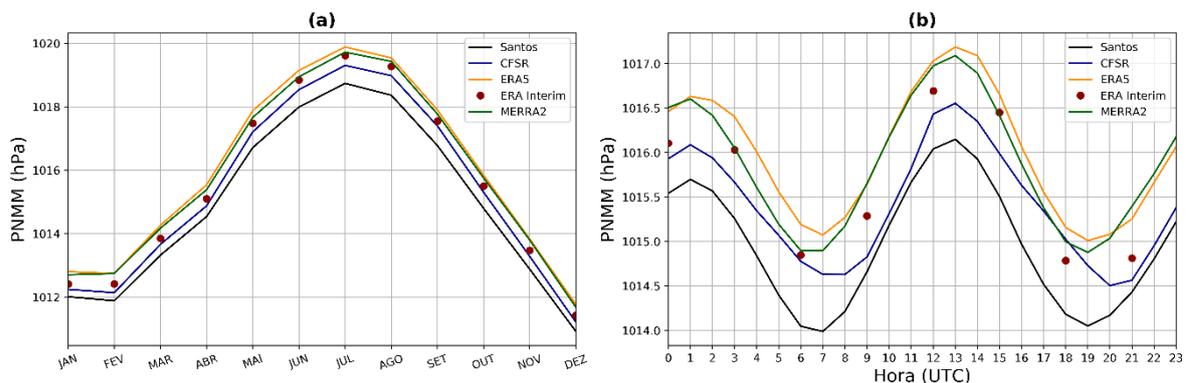


Figura 4.6 - Ciclos (a) anual e (b) diurno da PNMM (hPa) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas para essa reanálise. Cálculos elaborados apenas quando os dados das reanálises e da boia eram concomitantes.

Avaliando tanto a parte estatística, quanto a representação dos ciclos anuais e diurnos é possível concluir que o CFSR apresenta a melhor performance ao simular os dados de PNMM, enquanto que o ERA-Interim apresenta os piores resultados.

4.3.2 Avaliação da T2M

A Tabela 4.4 apresenta os valores de CORR, BIAS e RMSE para a variável T2M. Todas as reanálises apresentam RMSE menor que o DPobs e uma CORR muito forte, com valores maiores que 0,9 para a variável em estudo. A maior (menor) CORR foi

encontrada para a Reanálise MERRA-2 (ERA-Interim) que também apresentou o menor (maior) RMSE. Com exceção do ERA5, todos os demais conjuntos de dados superestimam a T2M, com valores positivos de BIAS.

Tabela 4.4 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de T2M (°C) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2.

Métrica estatística	CFSR	ERA-Interim	ERA5	MERRA-2
CORR	0,92	0,91	0,92	0,93
BIAS (°C)	0,25	0,32	-0,03	0,14
RMSE (°C)	1,05	1,10	1,00	0,98

DPobs = 2,55 °C

O ciclo anual da T2M é apresentado na Figura 4.7a, onde é possível notar que as reanálises conseguem representar a variação anual, apesar de não serem capazes de representar a queda acentuada observada nos meses de agosto e setembro. O ERA5 apresenta subestimativa nos primeiros 6 meses do ano e praticamente acerta os valores em julho, outubro, novembro e dezembro, exibindo apenas uma leve subestimativa nesses dois últimos meses. O CFSR e ERA-Interim superestimam a T2M durante todo o ano. Finalmente, o MERRA-2 superestima T2M até setembro e a seguir apresenta valores concordantes com a observação em outubro, novembro e dezembro.

O ciclo diurno é apresentado na Figura 4.7b, e nele destaca-se a variação da temperatura ao longo do dia registrada pela boia de Santos, que possui uma amplitude térmica bem-marcada, com mínimo às 08 UTC e máximo às 19 UTC. As Reanálises CFSR e MERRA-2 suavizam o ciclo diurno, enquanto o ERA5 destaca-se por representar uma amplitude térmica mais próxima à registrada pela boia.

Analisando conjuntamente os resultados estatísticos e os ciclos anual e diurno, destaca-se positivamente (negativamente) a Reanálise MERRA-2 (ERA-Interim).

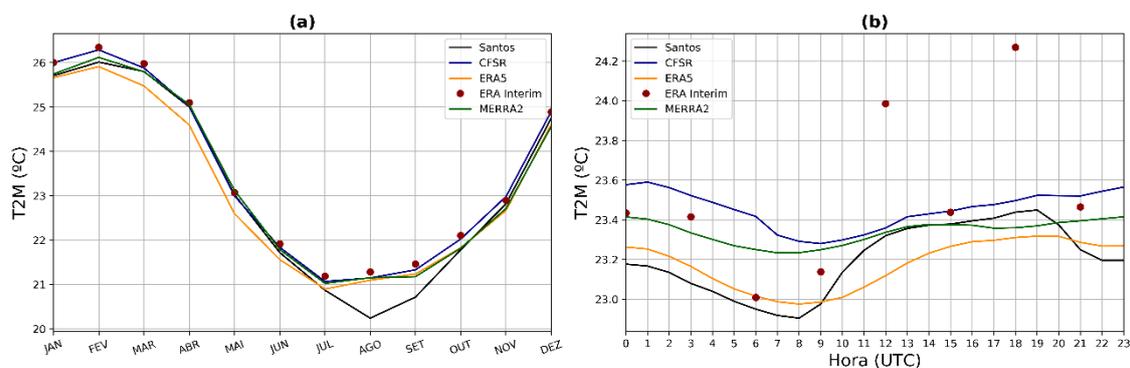


Figura 4.7 – Ciclos (a) anual e (b) diurno da T2M (°C) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas para essa reanálise. Cálculos elaborados apenas quando os dados das reanálises e da boia eram concomitantes.

4.3.3 Avaliação da UR2M

A UR2M é considerada de difícil representação, pois leva em consideração, em sua formulação, duas variáveis: a quantidade de vapor no ar e a temperatura do ar. Assim, a CORR encontrada para essa variável ($>0,8$) é considerada forte, sendo necessário destacar a Reanálise ERA5, que não só apresenta a maior CORR (0,86), como também a menor RMSE (Tabela 4.5). Todas as reanálises analisadas superestimam os valores de UR2M, apresentando BIAS positivos e apresentam RMSE menor que o DPobs.

Tabela 4.5 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de UR2M (%) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2.

Métrica estatística	CFSR	ERA-Interim	ERA5	MERRA-2
CORR	0,81	0,83	0,86	0,84
BIAS (%)	1,50	3,21	2,47	4,26
RMSE (%)	5,84	6,37	5,66	6,71

DPobs = 9,67 %

Observa-se, na Figura 4.8a, que todos os conjuntos de dados conseguiram representar bem o ciclo anual de UR2M, com máximos em dezembro e fevereiro e mínimo em maio. Para o ciclo diurno (Figura 4.8b), o destaque novamente fica por conta do ERA5, que conseguiu representar tanto a amplitude diurna da UR2M, quanto o ciclo diurno em si,

enquanto o CFSR e o MERRA-2 apresentam ciclos suavizados. O ERA-Interim também representa bem a amplitude e o ciclo diurno da UR2M.

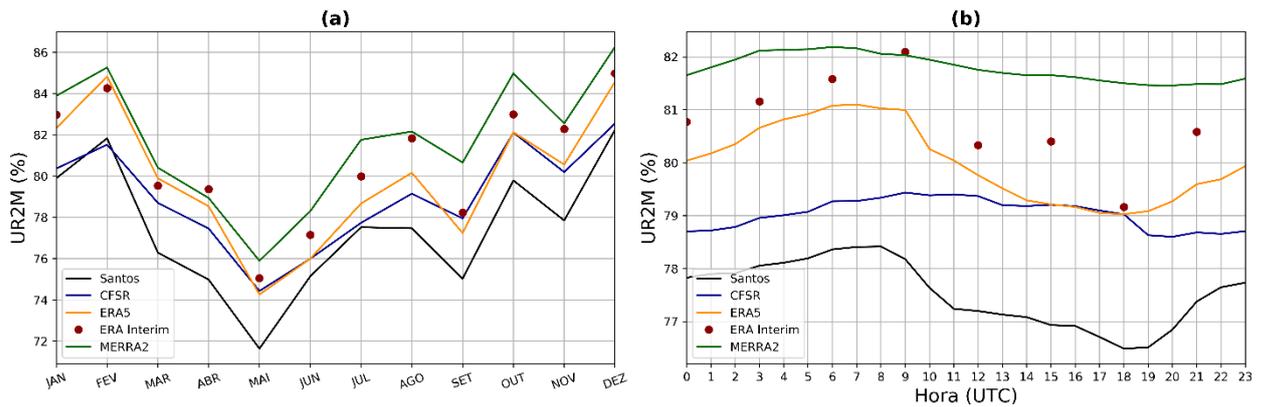


Figura 4.8 - Ciclos (a) anual e (b) diurno da UR2M (%) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas para essa reanálise. Cálculos elaborados apenas quando os dados das reanálises e da boia eram concomitantes.

Após a avaliação apresentada acima, o destaque positivo é a Reanálise ERA5 com maior CORR, menor RMSE e uma boa representação do ciclo diurno, enquanto o destaque negativo é o MERRA-2, com o maior RMSE e um ciclo diurno suavizado.

4.3.4 Avaliação da MAG10M e DIR10M

Após removidos os períodos de dados com problemas listados na Seção 4.1, a avaliação das Reanálises CFSR, ERA-Interim, ERA5 e MERRA-2 é apresentada a seguir.

Todas as reanálises apresentam valores negativos de BIAS, indicando subestimativa, e RMSE menor que DPobs. O menor (maior) valor de CORR foi de 0,77 (0,87) para a Reanálise CFSR (ERA5), conforme apresentado na Tabela 4.6, consideradas correlações fortes. Ressalta-se que, após a retirada dos dados espúrios, os valores de CORR aumentaram e os de RMSE diminuíram para todas as reanálises analisadas (resultados anteriores à retirada dos dados espúrios não apresentados).

Tabela 4.6 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de MAG10M (m/s) observada na boia de Santos e extraídas do CFSR, ERA5, ERA-Interim e MERRA-2.

Métrica estatística	CFSR	ERA-Interim	ERA5	MERRA-2
CORR	0,77	0,81	0,87	0,78
BIAS (m/s)	-0,63	-1,19	-0,85	-0,84
RMSE (m/s)	2,05	2,15	1,70	2,08

DPobs = 3,04 m/s

Tanto no ciclo anual (Figura 4.9a), quanto no ciclo diurno (Figura 4.9b), é evidente a subestimativa por conta das reanálises. No ciclo anual, todos os conjuntos de dados conseguem representar bem a variação anual de MAG10M, com destaque para o CFSR, que apresenta valores mais próximos ao observado. No ciclo diurno, os destaques são as Reanálises ERA5 e MERRA-2 que melhor conseguem representar a variação diurna da variável. O CFSR, apesar de apresentar “degraus”, consegue representar o ciclo diurno da variável. Como os “degraus” ocorrem uma hora após o horário da assimilação de dados (horários de 01, 07, 13 e 19 UTC), acredita-se que essa variação possa estar relacionada a ajustes nos cálculos da reanálise associados à entrada de novos dados. As magnitudes das subestimativas no ERA5 e do MERRA-2 são similares em todo o ciclo diurno.

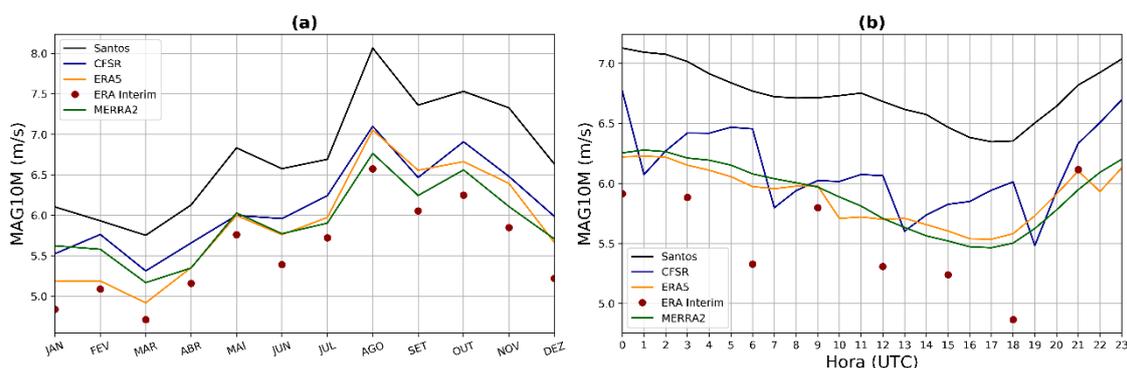


Figura 4.9 - Ciclos (a) anual e (b) diurno do MAG10M (m/s) elaborados com dados no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. Como a resolução temporal do ERA-Interim é de três horas optou-se por não plotar linhas contínuas nos ciclos dessa reanálise.

A distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos, elaborada com os dados coletados pela boia de Santos e pelas reanálises (Figura 4.10), mostra direções entre E e NE como predominantes, influenciadas pelos ventos associados ao Anticiclone

Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Para a boia de Santos (Figura 4.10a), a direção predominante é a de ENE. Já nas distribuições de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaboradas com os dados simulados pelas reanálises (Figura 4.10b, Figura 4.10c, Figura 4.10d, Figura 4.10e), a maior ocorrência é de ventos de NE, com segunda direção predominante em ENE, exceto para a MERRA-2, que apresenta percentual similar de dados nas direções NE e ENE (Figura 4.10e). Diferente do observado para a boia de Santos, as reanálises quase não apresentam ocorrências de valores mais elevados de vento (acima de 12 m/s), sendo o CFSR a reanálise com maior ocorrência de ventos acima de 12 m/s dentre as 4 analisadas

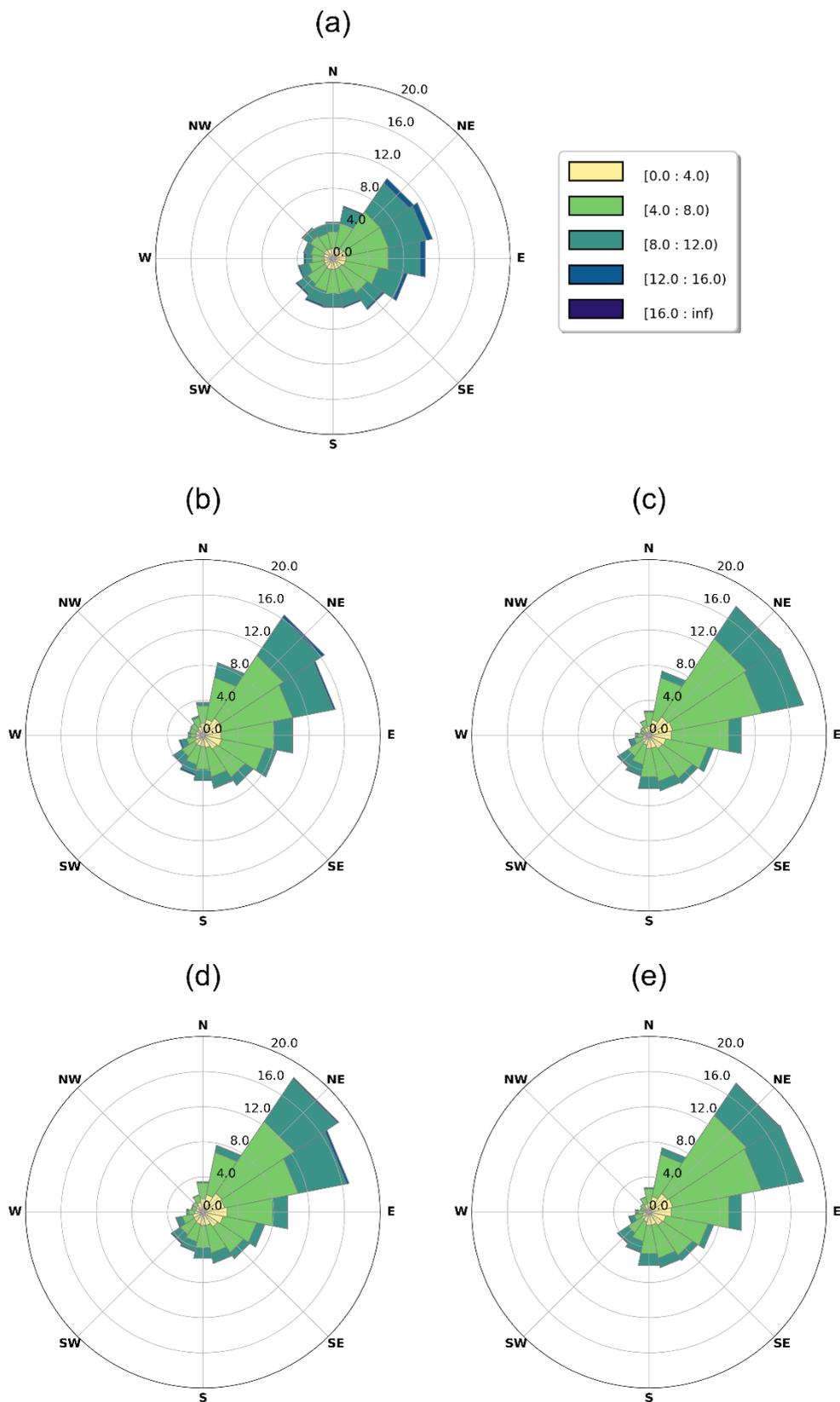


Figura 4.10 - Distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com: (a) dados coletados pela boia de Santos, (b) CFSR, (c) ERA-Interim, (d) ERA5 e (e) MERRA-2 no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s.

4.3.5 Sumário da Avaliação Pontual

A Tabela 4.7 sintetiza os principais resultados encontrados, destacando a reanálise com maior valor de CORR, menor valor de RMSE e a que melhor representou os ciclos anuais e diurnos para cada variável analisada.

Tabela 4.7 - Síntese dos resultados encontrados na Seção 4.3, sendo apresentada a reanálise com maior valor de CORR, menor valor de RMSE e que melhor representou os ciclos anuais e diurnos de cada variável.

Variável	CORR	RMSE	Ciclo anual	Ciclo diurno
PNMM	Todas	CFSR	CFSR	ERA5
T2M	MERRA-2	MERRA-2	todas	ERA5
UR2M	ERA5	ERA5	todas	ERA5
MAG10M	ERA5	ERA5	CFSR	MERRA-2

Com relação a DIR10M, destaca-se que na análise da distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos as Reanálises CFSR e MERRA-2 se destacaram frente as demais. O CFSR se destaca por sua capacidade em representar os ventos mais intensos associados ao quadrante NE e a MERRA-2, por apresentar a mesma proporção de ventos nas direções NE e ENE, o que o aproxima mais da distribuição observada pelos dados coletados pela boia.

Como o vento é uma variável de suma importância para as operações *offshore*, as próximas avaliações são focadas nesta variável. As Reanálises ERA5 e CFSR foram selecionadas para a avaliação espacial do vento para a região do Atlântico Sul. O ERA5, foi selecionado por apresentar os melhores resultados para MAG10M e DIR10M de maneira geral, e o CFSR por conseguir melhor representar valores mais intensos de MAG10M, conforme pode ser notado nos ciclos diurno e anual, onde o CFSR apresenta valores médios maiores que as demais reanálises, e sutilmente identificado a partir de QQ plot, apresentado na Figura 4.11, onde os pontos referentes aos últimos percentis se aproximam da linha de correlação perfeita, enquanto que para o ERA5 eles seguem a linha de melhor ajuste, se afastando da melhor correlação.

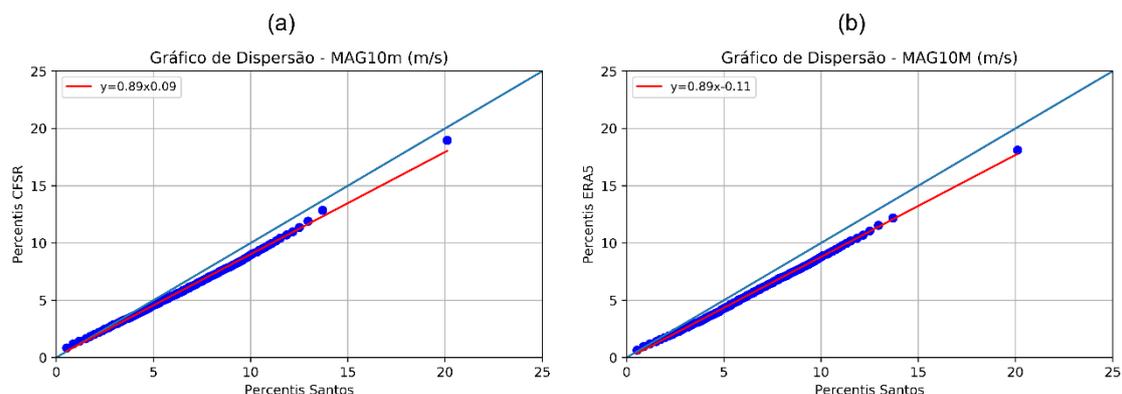


Figura 4.11 – Gráfico Quantil-Quantil (QQ plot) para a variável MAG10M. O gráfico (a) apresenta os percentis do CFSR (eixo y) versus os percentis da boia de Santos (eixo x), enquanto que o (b) apresenta os percentis do ERA5 (eixo y) versus os percentis da boia de Santos (eixo x).

4.4 Avaliação pontual do ASCAT

Neste trabalho é feita uma avaliação espacial dos dados de vento das Reanálises CFSR e ERA5, confrontando-as com dados de vento do ASCAT. Dessa forma, como etapa prévia, apresenta-se nesta Seção uma avaliação pontual do ASCAT, em relação aos dados observados na boia de Santos.

Utilizando os dados do ponto de grade do ASCAT mais próximo à localização da boia de Santos (Tabela 3.4), as métricas estatísticas foram calculadas apenas nos horários em que haviam dados concomitantes da boia e do escaterômetro.

Os resultados apresentados na Tabela 4.8 mostram que os dados estimados via sensoriamento remoto representam bem os dados coletados *in situ*, com CORR muito forte (0,94). O ASCAT tende a subestimar os valores de MAG10M, apresentando BIAS negativo e um RMSE de aproximadamente 1 m/s, que é menor que o DPobs. Os valores de máximo, média e mínimo das séries de dados do ASCAT também são próximos aos observados, contudo, não existem valores nulos de vento (0 m/s) na série do ASCAT.

Tabela 4.8 - Métricas estatísticas calculadas a partir das séries temporais de MAG10M (m/s) observadas na boia de Santos (no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017) e coletadas pelo ASCAT para o mesmo período.

Métrica estatística	Santos	
	ASCAT	Boia
Média (m/s)	6,48	6,75
Máximo (m/s)	15,16	15,10
Mínimo (m/s)	0,44	0,00
Correlação	0,94	
BIAS (m/s)	-0,27	
RMSE (m/s)	1,02	

DPobs Santos = 2,99 m/s

O ASCAT consegue representar bem a variação anual da variável MAG10M, inclusive os máximos e mínimos da série, conforme apresentado no ciclo anual (Figura 4.12). Novamente, fica evidente a subestimativa por conta do ASCAT, que ocorre ao longo de todo o ano.

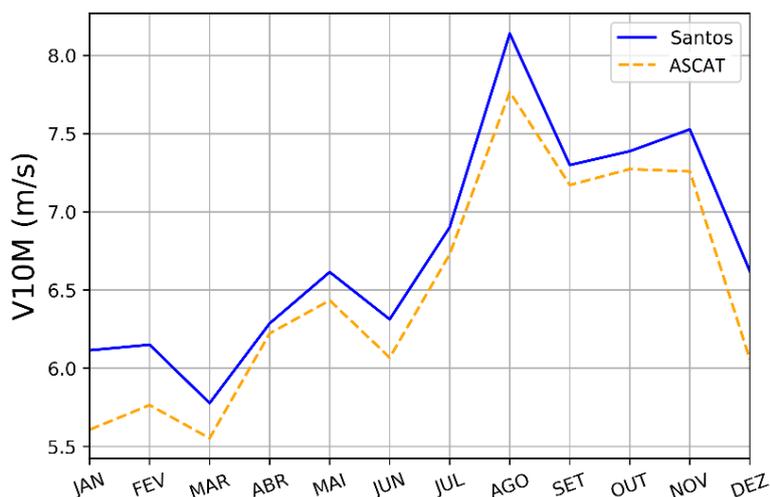


Figura 4.12 - Ciclo anual do MAG10M (m/s) para a boia de Santos no período entre 12/04/2011 e 15/07/2017. O dado observado na boia é representado pela linha contínua azul e o dado coletado pelo ASCAT é representado pela linha tracejada amarela.

A Figura 4.13 apresenta a distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com os dados medidos na boia de Santos e estimados pelo ASCAT. Nesses dois conjuntos de dados, é possível notar a predominância de ventos altamente influenciados pelo ASAS, que variam entre as direções NE e E.

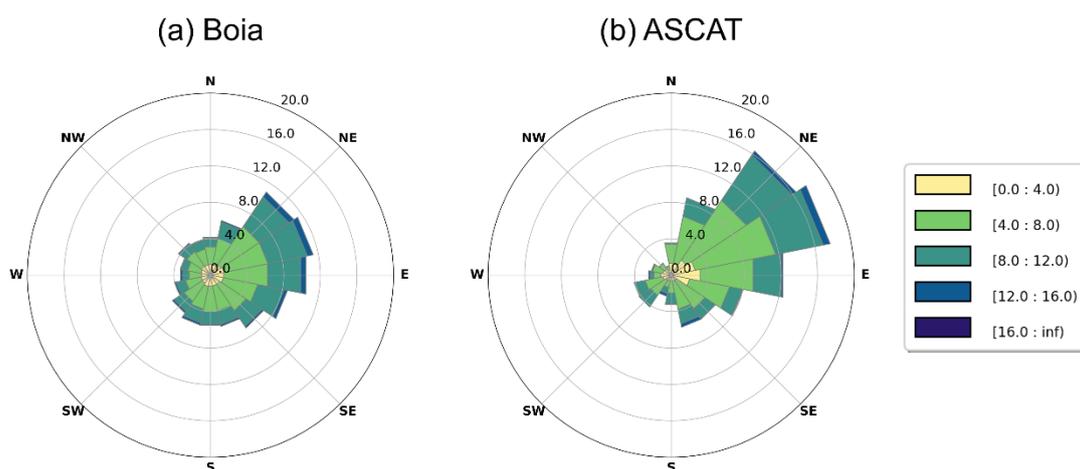


Figura 4.13 - Distribuição de frequência de ocorrência direcional dos ventos elaborada com: (a) dados observados na boia de Santos e (b) dados estimados pelo ASCAT. O período utilizado foi de 12/04/2011 a 15/07/2017. As cores indicam classes de intensidade de vento em m/s.

Os resultados encontrados nesta Seção concordam com os obtidos por PAIVA *et al.* (2021), onde também foram obtidos valores negativos de BIAS e RMSE de aproximadamente 1 m/s. Avaliando conjuntamente as métricas estatísticas, os ciclos anuais e as distribuições de frequência de ocorrência direcionais dos ventos aqui apresentadas, pode-se afirmar que os dados de MAG10M e DIR10M estimados via sensoriamento remoto são muito próximos aos coletados pela boia *in situ*. Dessa forma, os dados do ASCAT foram utilizados para avaliar espacialmente as Reanálises CFSR e ERA5 para a região do Atlântico Sul, conforme resultados apresentados na Seção a seguir.

4.5 Avaliação Espacial das Reanálises CFSR e ERA5 para o Atlântico Sul

As métricas estatísticas CORR, BIAS, RMSE e DPascats, são apresentadas a seguir para as variáveis MAG10M, u10M e v10M. A comparação das Reanálises CFSR e ERA5 em relação ao ASCAT foi elaborada no período de 01/01/2009 à 31/12/2017. Também são apresentadas as quantidades de pares de dados reanálise versus ASCAT disponíveis para cada ponto de grade da região e a média das variáveis em estudo para o domínio selecionado. Ressalta-se que a média e as métricas estatísticas são calculadas apenas nos horários em que há dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.

O ASCAT a bordo do satélite MetOp-A pode passar sobre um mesmo ponto da superfície no máximo duas vezes ao dia, uma na passagem ascendente e outra na

passagem descendente. Dessa forma, para um período de nove anos de dados (2009 a 2017) o máximo de pares reanálise versus ASCAT possível é de 6484 (365 dias vezes duas passagens vezes nove anos, incluído os anos bissextos). A Figura 4.14 apresenta o número de pares de dados disponível para cada ponto de grade do domínio estudado, sendo o maior valor encontrado de 3659. Para a área da BS, tem-se entre 2400 e 2700 pares de dados.

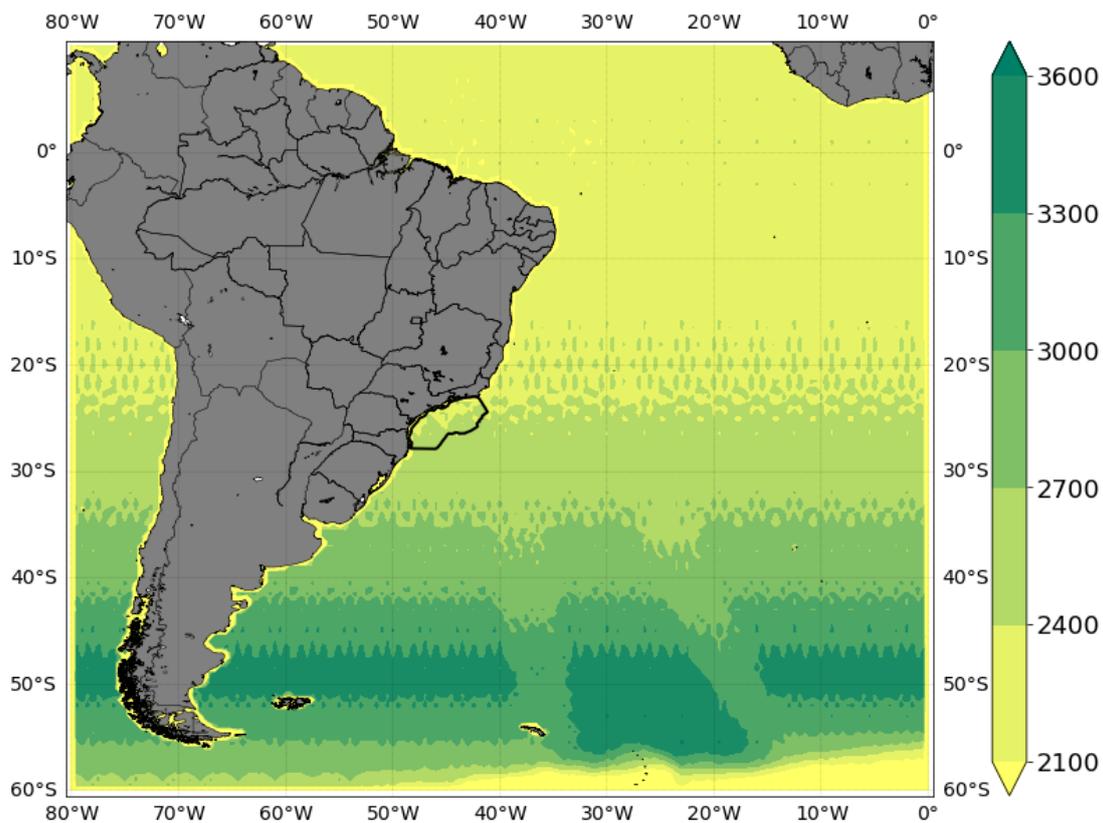


Figura 4.14 - Número de pares de dados reanálise versus ASCAT disponíveis para cada ponto de grade (resolução de 0,5°) da região em estudo para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.

Conforme já apresentado na Seção 3.6, foi utilizada uma máscara para remoção dos dados próximos à costa em todas as figuras com métricas estatísticas apresentadas a seguir. Dessa forma, as análises focam em áreas de oceano profundo e na BS como um todo.

É importante destacar que se encontram no Item **A.2** do Apêndice deste trabalho um recorte com foco na região da BS dos campos médios, de CORR, BIAS e RMSE apresentados para as variáveis MAG10M, u10M e v10m ao longo desta seção.

A Figura 4.15 apresenta o campo médio para o período de 2009 a 2017 das variáveis MAG10M e linhas de corrente, plotadas a partir dos valores médios de u_{10M} e v_{10M} , para o ASCAT (Figura 4.15a), para o CFSR (Figura 4.15b) e para o ERA5 (Figura 4.15c). As três figuras apresentam grande similaridade sendo possível notar menores velocidades do vento associados ao núcleo do ASAS, em aproximadamente 25° a $30^\circ\text{S}/25^\circ\text{W}$ a 0° , e na região próximo à costa da África ($\sim 5^\circ\text{N}$). Nos três conjuntos de dados, os maiores valores de MAG10M ocorrem na porção sul do domínio. Nessa região, os maiores valores encontrados pelo CFSR se estendem entre $50^\circ\text{W}-0^\circ/45^\circ\text{S}-60^\circ\text{S}$, enquanto que, no ASCAT e no ERA5 a área de maiores velocidades do vento é um pouco menor, ficando entre os meridianos de $30^\circ\text{W}-0^\circ$. Na região da BS, a média do MAG10M varia entre 6 e 8 m/s nos três conjuntos de dados.

As reanálises também representam bem a direção média do vento, conforme ilustrado pelas linhas de corrente. Diferenças entre a modelagem numérica e o sensoriamento remoto, embora pequenas, ocorrem na região associada ao ASAS e também próximo à costa da África ($\sim 5^\circ\text{N}$), onde as duas reanálises apresentam médias de MAG10M menores que a observada pelo ASCAT.

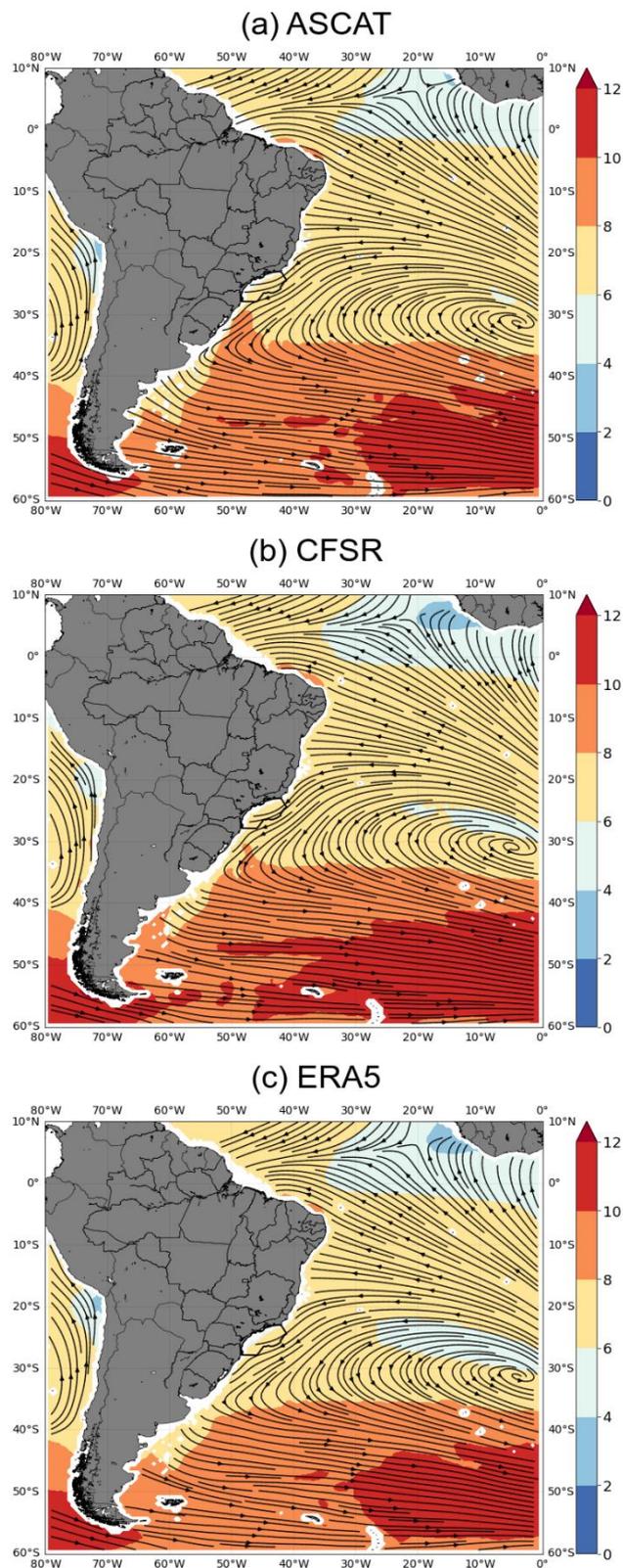


Figura 4.15 - Média da MAG10M (m/s) e linhas de corrente plotadas utilizando a média das variáveis u_{10M} e v_{10M} para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 no período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.

A Figura 4.16 apresenta a CORR, o BIAS e a RMSE calculados para cada ponto de grade do domínio para as Reanálise CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita) com os dados da variável MAG10M. Em ambas as reanálises, os menores (maiores) valores de CORR (Figura 4.16a e Figura 4.16b) foram encontrados na região próxima a linha do Equador (próximo à latitude de 50°S). No caso do CFSR, em algumas regiões equatoriais a CORR foi menor que 0,60. Vale ressaltar que, na região equatorial (porção sul do domínio), tem-se os mínimos (máximos) de pares de dados para análise (Figura 4.14). Na região da BS a CORR é forte, variando entre 0,80 e 0,90 (0,85 e 0,95) para o CFSR (ERA5). De maneira geral, o ERA5 apresenta CORR mais elevadas que o CFSR em todo o domínio.

No campo do BIAS (Figura 4.16a e Figura 4.16), as cores em tons de azul (vermelho) representam subestimativas (superestimativas). Percebe-se que o CFSR superestima os valores de MAG10M (Figura 4.16c) em praticamente todo o domínio. As subestimativas são encontradas nas regiões entre 0° a 10°N e na região central do Atlântico tropical até 10°S entre os meridianos de 10°W e 30°W . Também são encontradas subestimativas em uma radial imaginária entre os estados brasileiros do Rio de Janeiro e Espírito Santo e próximo ao litoral do Brasil, entre os estados de Rio Grande do Sul e Rio de Janeiro, englobando parte significativa da BS. Esse resultado está de acordo com a avaliação pontual do CFSR, que apresentava subestimativa por parte da reanálise quando comparado com os dados da boia de Santos.

Já o ERA5 (Figura 4.16d), subestima os dados de MAG10M para quase todo o Atlântico Sul, incluindo a BS. As principais exceções são: parte do oceano Pacífico, na latitude de 50°S , litoral norte da América do Sul e na margem leste do domínio, entre 10°S e 20°S . Assim como o CFSR, o ERA5 também superestima a região adjacente ao litoral da Argentina (35° a 60°S e 40° a 70°W), inclusive exibindo padrão similar. Observando essa mesma região na Figura 4.15a, verifica-se que o ASCAT apresenta uma redução na intensidade do vento, coincidente com a crista do ASAS, estendendo-se desde o sul do Uruguai até aproximadamente 45°S , que não é detectado pelas reanálises.

Avaliando a RMSE, apresentado na Figura 4.16e e Figura 4.16f, tem-se que os menores valores se encontram na mesma região para as duas reanálises, próximo à 10°S , onde os ventos alísios divergem do ASAS em direção ao equador. Os maiores valores se encontram próximos à costa da África ($\sim 5^{\circ}\text{N}$), nas latitudes mais altas e ao longo da costa

da América do Sul, entre o estado do Rio de Janeiro e o extremo sul da Argentina. É importante salientar que os valores de RMSE do ERA5 são menores que os do CFSR em todo o domínio em estudo.

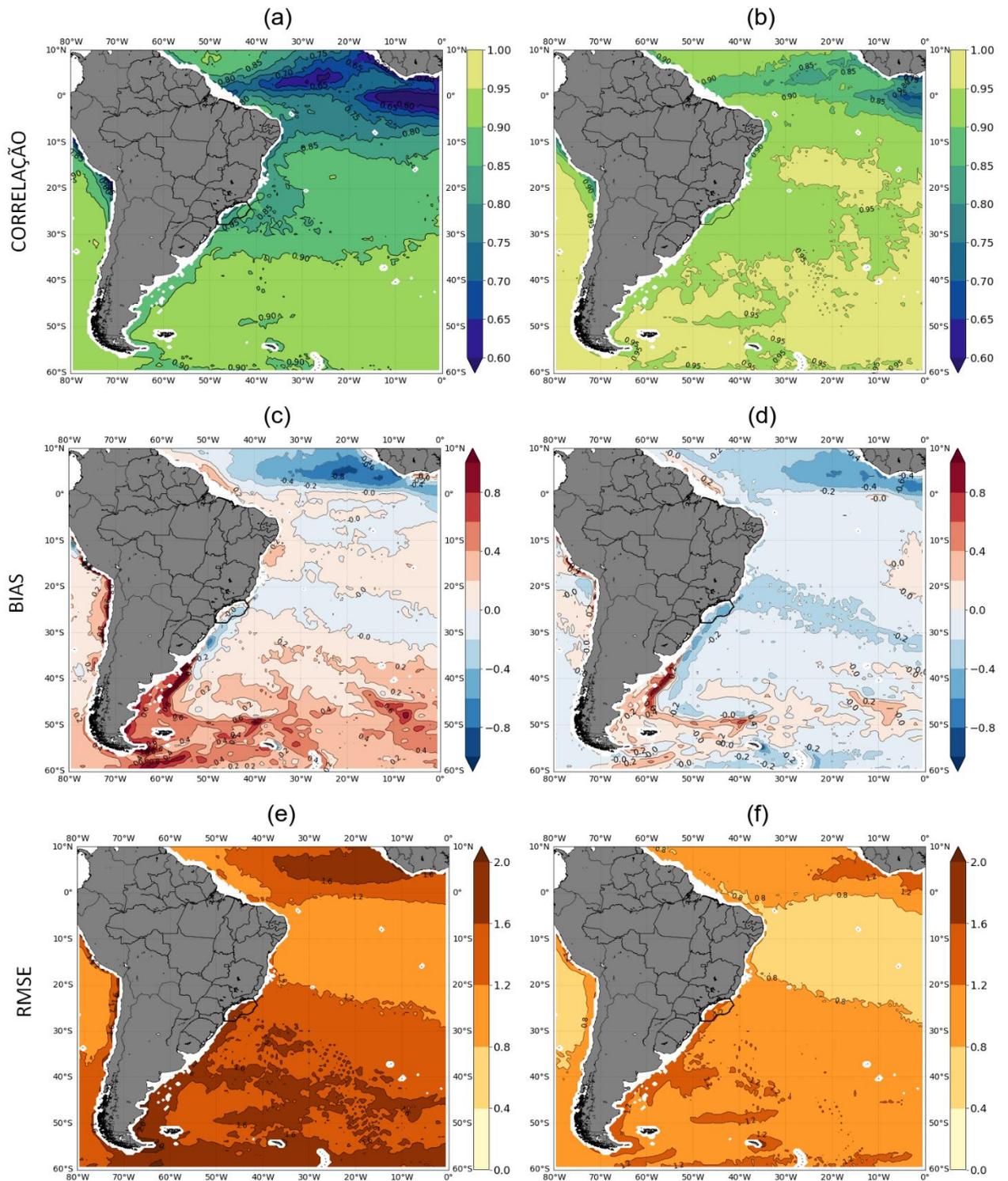


Figura 4.16 - (a) e (b) CORR, (c) e (d) Bias (m/s), (e) e (f) RMSE (m/s) calculados para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada nas figuras.

A Figura 4.17 apresenta o desvio padrão para a variável MAG10M calculado a partir dos dados do ASCAT (DPascat). Os menores (maiores) valores de desvio padrão se encontram entre as latitudes 20°S e 0° (30°S e 60°S), onde também se encontram os menores (maiores) RMSE. Avaliando os valores de RMSE na área da BS, para o CFSR (ERA5) eles variam entre 1,2 a 2,0 m/s (0,8 e 1,6 m/s), sendo menor que o DPascat para a região, que varia entre 2,0 a 3,0 m/s (Figura 4.17).

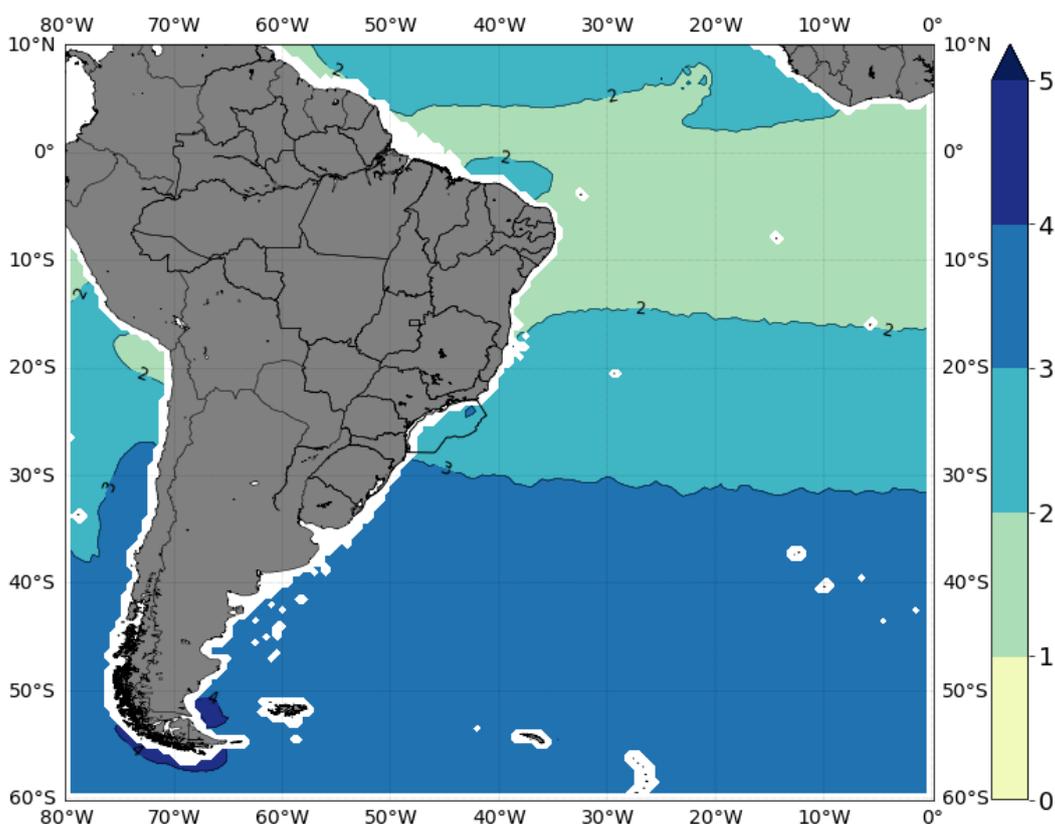


Figura 4.17 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M com dados do ASCAT. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.

O campo médio para o período de 2009 a 2017 da variável u10M é apresentado na Figura 4.18. Assim como para a variável MAG10M os três campos apresentam grande similaridade. Os valores negativos (ventos de leste) estendem-se pela região norte do ASAS, desde aproximadamente 30°S em direção ao equador (exceto na costa da África), com máximo negativo de -7 m/s em torno de 10°S/25°W, onde passam a ser denominados

alísios de sudeste. Os valores positivos (ventos de oeste) sopram aproximadamente entre 30° e 60°S, com máximo de 7 m/s na região sudeste do domínio (55°S/5°W), onde convergem para o centro dos ciclones de latitudes médias. Pequenas diferenças foram encontradas na região do núcleo em que os valores de u10M são menores que -7 m/s (10°S/25°W), onde o ERA5 apresenta uma menor área quando comparado ao ASCAT e o CFSR. No outro extremo, na região dos maiores valores de u10M (55°S/5°W), o CFSR apresenta uma maior área com valores acima de 7 m/s que os demais conjuntos de dados. Na região da BS, os valores de u10M são negativos, variando entre -2 a -4 m/s, indicando o domínio do ASAS.

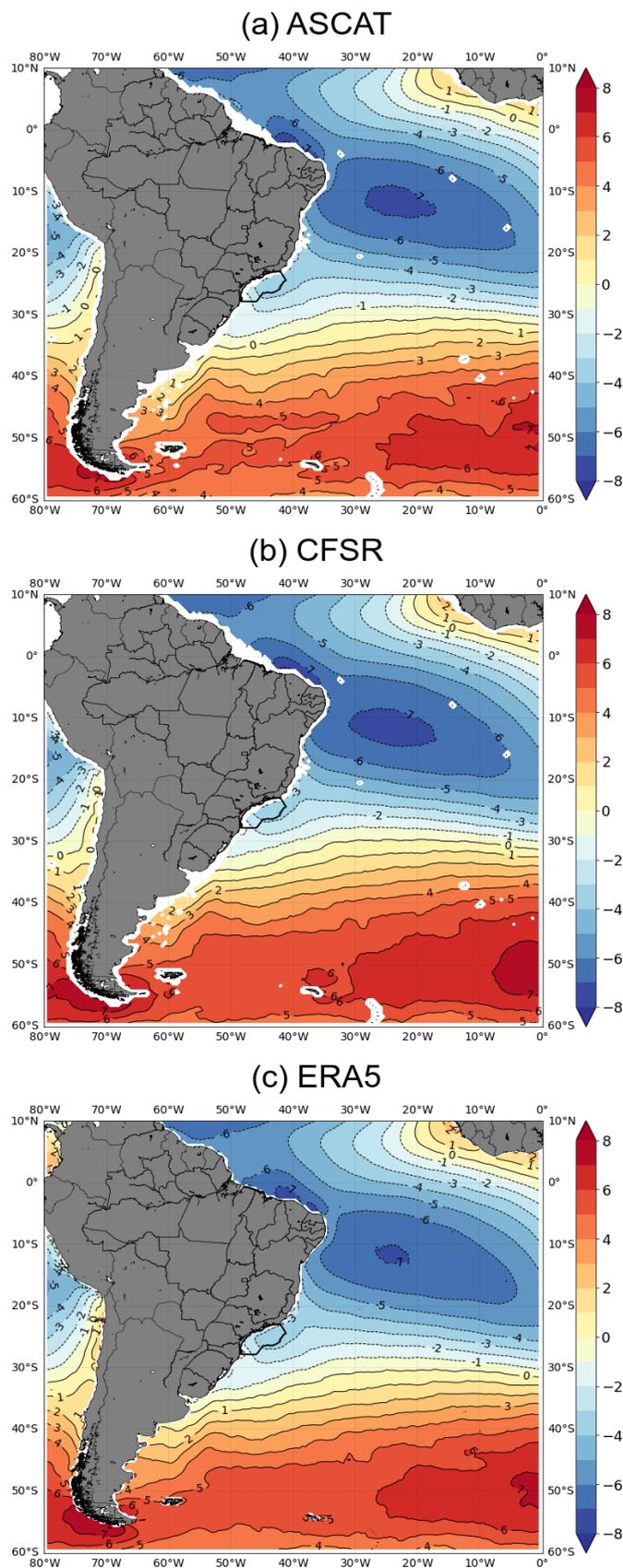


Figura 4.18 - Média da componente u_{10M} (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.

Os resultados das métricas CORR, BIAS e RMSE para a variável u10M são apresentados na Figura 4.19. Na Figura 4.20 são apresentados os resultados referentes à análise do desvio padrão. As duas figuras seguem o mesmo padrão das figuras apresentadas para MAG10M.

A CORR (Figura 4.19a e Figura 4.19b) é muito forte, superior a 0,90 em grande parte do Oceano Atlântico, indicando que o CFSR e o ERA5 conseguem representar bem a variabilidade dos dados estimados pelo ASCAT. Assim como para a MAG10M, os menores (maiores) valores de CORR se encontram próximos à linha do equador (porção sul do domínio), chegando a valores menores que 0,65 (maiores que 0,95) em alguns pontos para o CFSR (ambas reanálises). Na região da BS, a CORR fica entre 0,80 e 0,90 (0,85 e 0,95) para o CFSR (ERA5), sendo considerada forte.

Enquanto o ERA5 apresenta superestimativa da componente u10M em quase todo o domínio (Figura 4.19d), o CFSR apresenta uma região de superestimativa na faixa entre 20°S e 60°S, subestimando a u10M em praticamente toda a porção norte do domínio (Figura 4.19c). As duas reanálises apresentam superestimativa na maior parte da região da BS e, assim como observado para MAG10M, a estreita região adjacente ao litoral da Argentina (35° a 60°S/40° a 70°W) apresenta superestimativa por ambas as reanálises.

O RMSE apresenta os menores (maiores) valores próximos à latitude de 10°S (5°N e latitudes mais altas), para as duas reanálises (Figura 4.19e e Figura 4.19f). Para o CFSR também são encontrados valores mais altos de RMSE próximo à costa da América do Sul, entre o estado do Rio de Janeiro e o extremo sul da Argentina. Na BS, o RMSE do u10M varia entre 1,6 e 2,4 m/s (1,2 a 2,0 m/s) para a Reanálise CFSR (ERA5), sendo menor que o DPascats para a região, que varia entre 3,0 a 5,0 m/s (Figura 4.20). Os valores de RMSE do ERA5 são menores que os do CFSR em todo o domínio.

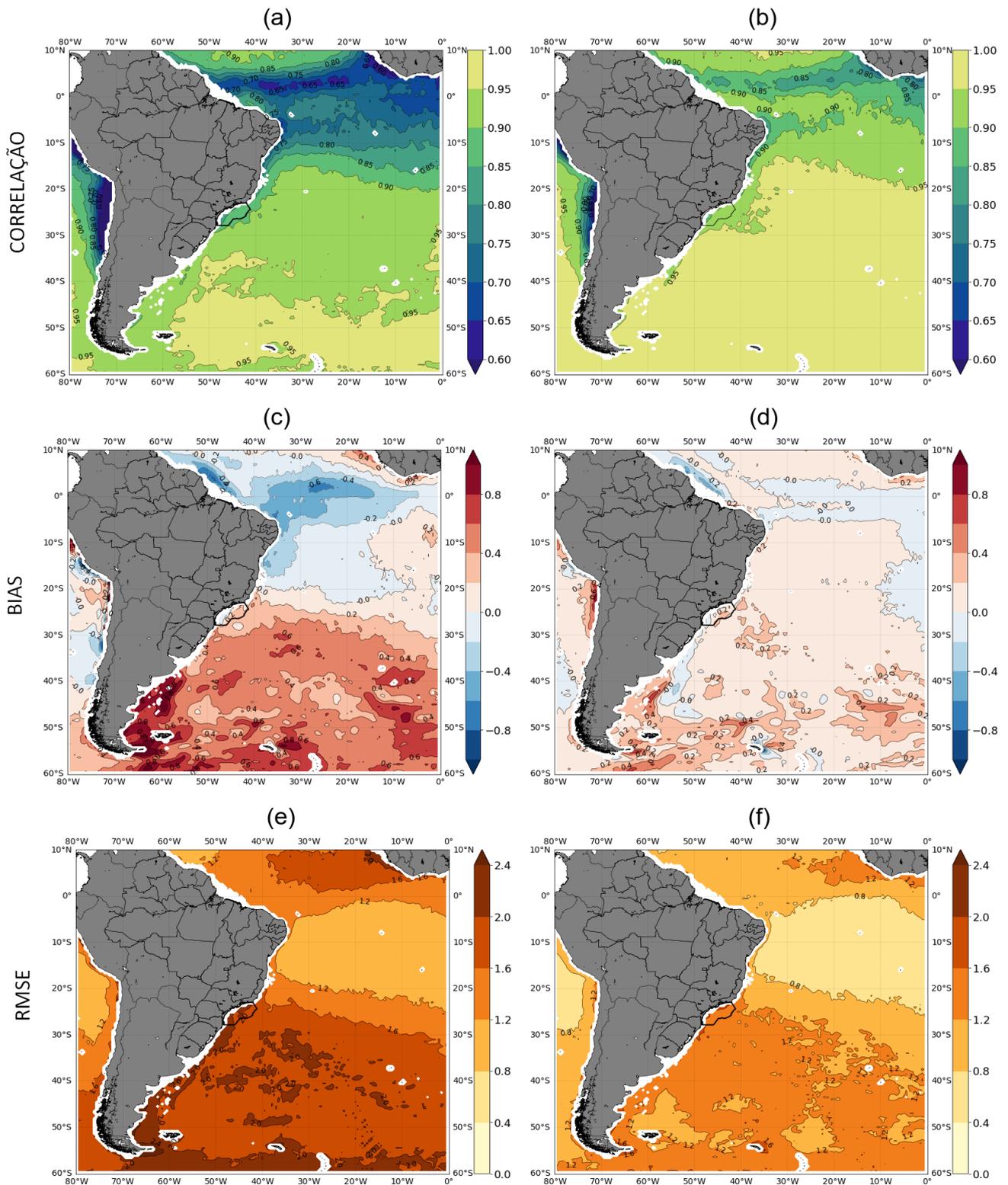


Figura 4.19 - (a) e (b) CORR (c) e (d) Bias (m/s), (e) e (f) RMSE (m/s) calculados para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u_{10M} das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada na figura.

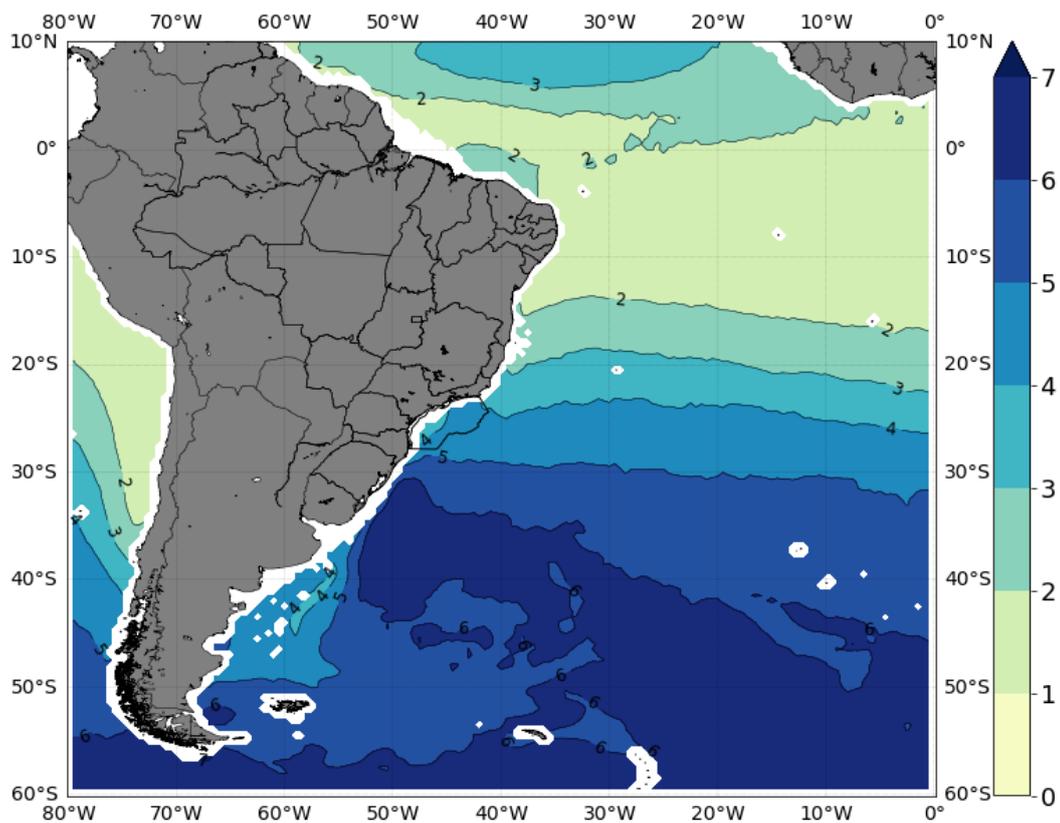


Figura 4.20 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u_{10M} para os dados do ASCAT. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.

A média da componente v_{10M} do vento no período de 2009 a 2017 é apresentada na Figura 4.21, onde nota-se valores negativos de fraca intensidade de v_{10M} entre 20° e $60^\circ S$. Tais valores estão associados ao vento que diverge do ASAS e converge para a região das baixas pressões em $60^\circ S$ (região dos ventos de oeste). Ao norte de $20^\circ S$, o vento que diverge do ASAS se desloca para a região do equador (alísios de sudeste), apresentando uma componente meridional mais forte (chegando a 5 m/s perto da costa da África).

Assim como nas figuras apresentadas anteriormente, as reanálises conseguem simular bem o padrão apresentado pelos dados do ASCAT. Os valores mais elevados (positivos) de v_{10M} são encontrados próximos à costa da África ($5^\circ N - 25^\circ S / 20^\circ W - 0^\circ$), associados aos ventos Alísios, e no oceano Pacífico. Já os valores negativos de v_{10M} , bem menos intensos que os positivos, ocorrem na parte sul da costa Chilena, na costa da

Argentina, no limite superior do domínio ($\sim 10^\circ\text{N}$) e na direção de uma radial imaginária entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.

Na região de máximo v_{10M} ($5^\circ\text{S}/5^\circ\text{W}$), o CFSR consegue representar o núcleo de vento maior que 5 m/s presente no campo do ASCAT, enquanto o ERA5 não. Por outro lado, o ERA5 representa melhor os menores valores de v_{10M} na região da radial entre os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo e também no limite superior do domínio, em 10°N . Na área da BS, os valores médios de v_{10M} variam entre 0 e -2 m/s, indicando predominância da componente zonal na região.

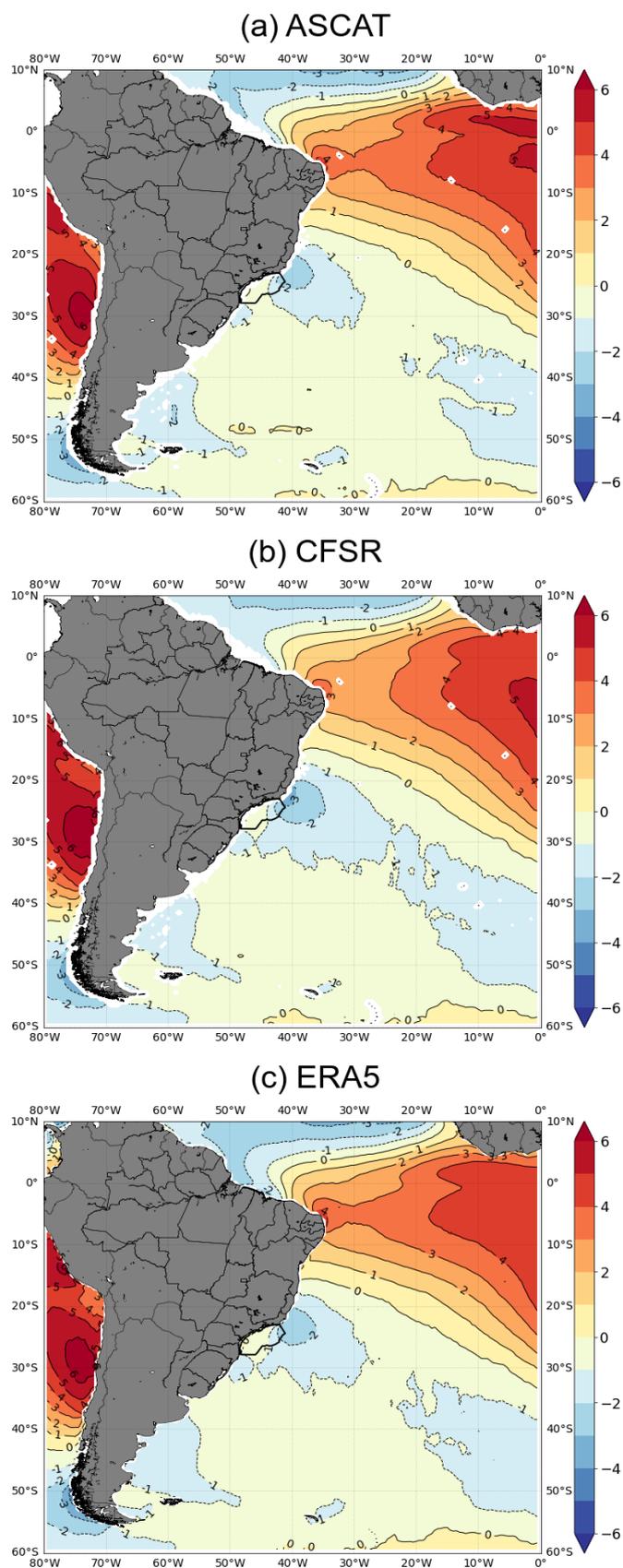


Figura 4.21 -Média da componente v10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT.

Para a componente v_{10M} , as métricas estatísticas CORR, BIAS e RMSE são apresentados na Figura 4.22. A CORR apresenta o mesmo padrão das variáveis anteriores, com menores (maiores) valores próximos à linha do equador (altas latitudes). Na BS, os valores indicam uma CORR forte para o CFSR, variando entre 0,85 a 0,95, enquanto que o ERA5 apresenta valores de CORR muito forte, maiores que 0,95, na maior parte da BS, com exceção da área próxima ao litoral, que apresenta valores entre 0,90 e 0,95.

O CFSR subestima a v_{10M} na parte central do Atlântico Sul, entre a linha do equador e $40^{\circ}S$, superestimando a variável nas demais áreas (Figura 4.22c). Já o ERA5 apresenta subestimativa em quase toda a região do Atlântico, entre $30^{\circ}S$ a $50^{\circ}S$ e próximo à costa da África ($\sim 5^{\circ}N$), enquanto superestima as demais regiões (Figura 4.22d). Para a região da BS, tem-se subestimativa (superestimativa) da variável v_{10M} na porção norte (sul) da bacia pela Reanálise CFSR, enquanto que o ERA5 apresenta comportamento oposto, com superestimativa (subestimativa) na porção norte (sul).

Novamente, o RMSE do CFSR é maior que o do ERA5 para todo o domínio em estudo. Nas duas reanálises, os menores (maiores) valores se encontram entre 0° e $20^{\circ}S$ ($5^{\circ}N$, parte sul do domínio e próximo ao litoral da América do Sul, entre o RJ e a costa da Argentina).

Comparando os valores de RMSE com o DPascats, apresentados na Figura 4.23, é possível notar que o erro é menor que a DPascats em todo o domínio. Para a BS, os valores de RMSE variam entre 1,6 a 2,4 m/s para o CFSR e entre 1,2 a 2,0 m/s para o ERA5. As duas faixas de valores de RMSE são menores que o DPascats para a região, que varia entre 4,0 a 6,0 m/s. Os maiores valores de desvio padrão foram encontrados para o v_{10M} , quando comparados às outras variáveis estudadas.

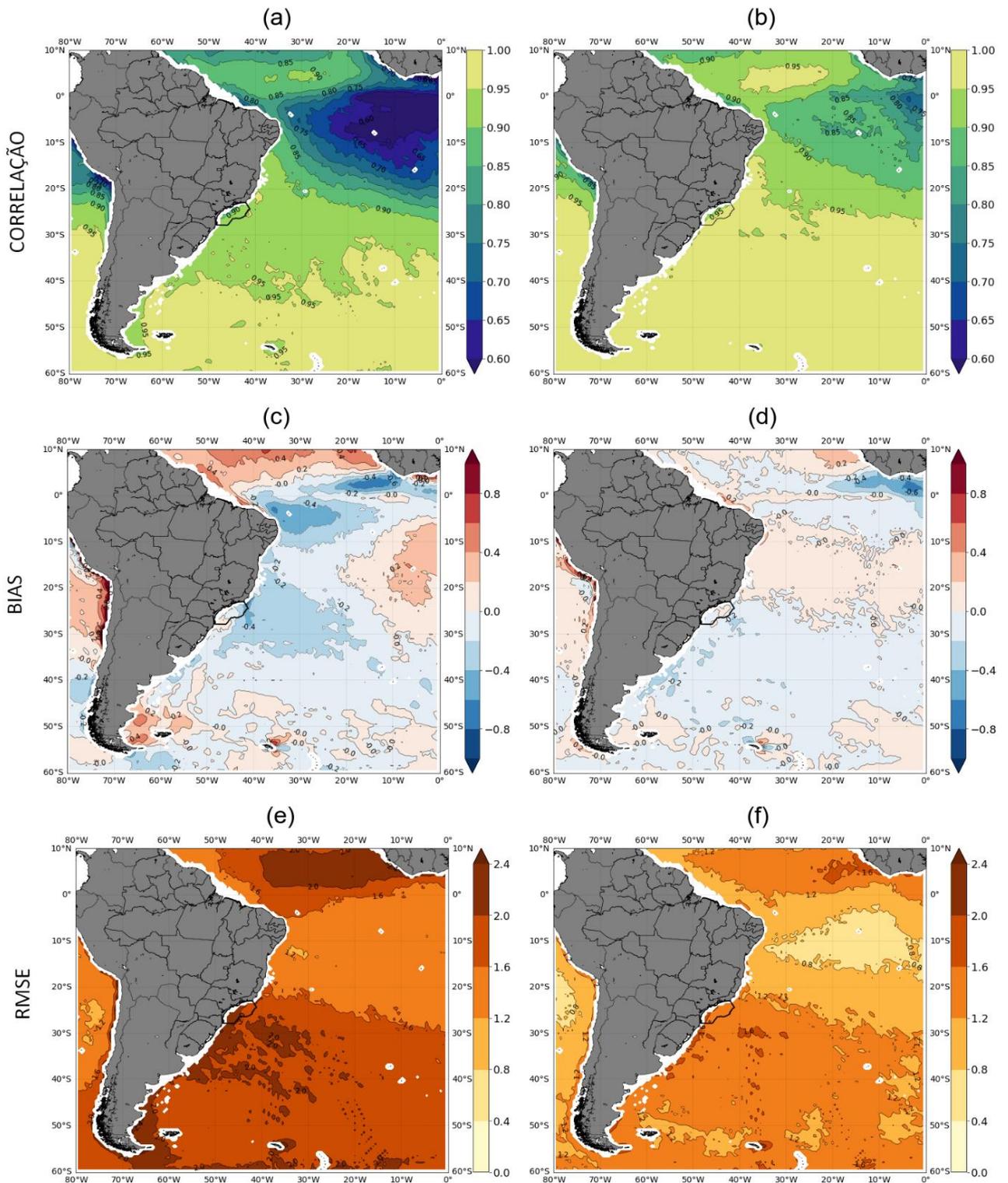


Figura 4.22 - (a) e (b) CORR (c) e (d) Bias (m/s), (e) e (f) RMSE (m/s) calculados para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v_{10M} das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada nas figuras.

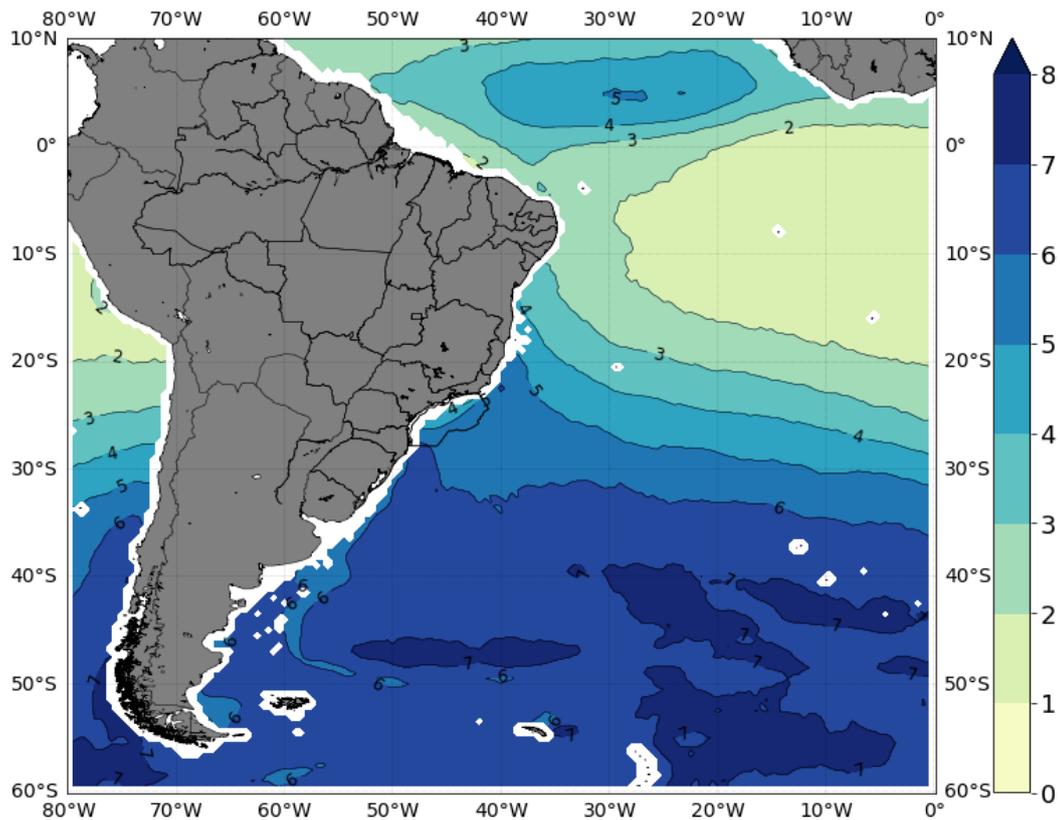


Figura 4.23 – Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v10M para os dados do ASCAT. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.

Comparando os resultados encontrados para o CFSR e o ERA5, tem-se que ambas reanálises conseguem representar os dados coletados via sensoriamento remoto, apresentando grande similaridade. Os mínimos e máximos de CORR ocorrem praticamente nas mesmas regiões nas duas reanálises, para as três variáveis em estudo. O mesmo ocorre com relação aos mínimos e máximos de RMSE. A métrica estatística com maior diferença espacial entre as reanálises analisadas é o BIAS, onde as reanálises apresentam comportamento inverso para o MAG10M: enquanto o CFSR superestima os valores em praticamente todo o domínio, o ERA5 apresenta subestimativa. Na região da BS a diferença entre as reanálises é ainda mais notável. Para a variável v10M, enquanto o CFSR superestima a porção norte e subestima a porção sul da BS o ERA5 apresenta um comportamento totalmente oposto, superestimando a porção sul e subestimando a porção norte.

Avaliando os resultados apresentados nesta seção, pode-se afirmar que as duas reanálises conseguem representar bem as variáveis MAG10M, u10M e v10M para o domínio em estudo. Os valores de CORR foram fortes, enquanto os valores de RMSE foram menores que o desvio padrão da observação (DPascat) em todo o domínio. As médias para o período em estudo apresentaram grandes similaridades, sendo as diferenças entre as reanálises e o ASCAT pontuais, associadas principalmente aos núcleos de maior ou menor intensidade das variáveis analisadas. Os maiores (menores) valores de desvio padrão foram encontrados para a variável v10M (MAG10M).

De maneira geral, o ERA5 apresentou maiores valores de CORR e menores valores RMSE que o CFSR para toda a região em estudo e para as três variáveis analisadas (MAG10M, u10M e v10M), o que o destaca positivamente para temas relacionados à climatologia.

Conforme apresentado na análise pontual do QQplot e corroborado com a superestimativa encontrada em grande parte do domínio, o CFSR tende a retratar ventos mais intensos quando comparado ao ERA5. O CFSR também apresenta ventos médios mais intensos que os coletados pelo ASCAT, que na avaliação pontual subestimou os dados da boia de Santos em aproximadamente 1m/s. Assim, o CFSR pode ser uma boa fonte de dados a ser utilizada em estudos relacionados a ventos intensos.

Os campos de desvio padrão, calculados com os dados das Reanálises CFSR e ERA5 para as variáveis MAG10M, u10M e v10M, não são apresentados ao longo do texto, e encontram-se no Item **A.1** do Apêndice deste documento. Destaca-se que ambas reanálises representam bem o padrão espacial do DPascat para as três variáveis analisadas. Entretanto, principalmente na porção sul do domínio (entre 40°S a 60°S), existem áreas pontuais em que o desvio padrão do CFSR é maior que o DPascat.

5. Conclusões

Neste trabalho, inicialmente, elaborou-se uma avaliação pontual de quatro diferentes conjuntos de dados provenientes de modelagem numérica para a região da BS: CFSR, MERRA-2, ERA-Interim e ERA5. Os dados de PNMM, T2M, UR2M, MAG10M e DIR10M gerados pelas reanálises foram confrontados com dados observados na boia de Santos do PNBOIA. Após a realização de testes com 1, 4 e 9 pontos de grade no entorno da boia, foram utilizados os dados extraídos do ponto de grade mais próximo à localização da boia, mesma metodologia usada em ALVAREZ et al. (2014), DERECZYNSKI et al. (2019); DERECZYNSKI e MENEZES, (2015), LOPES (2018), PETROBRAS (2017)

Para avaliar a capacidade das reanálises em representar as variáveis listadas, foram utilizadas as métricas estatísticas: CORR, BIAS, RMSE, DPobs, os ciclos anuais e diurnos e para a variável MAG10M, as plotagens de quantis (QQplot).

Em seguida, os dados coletados via sensoriamento remoto pelo escaterômetro ASCAT, a bordo do satélite MetOp A, foram confrontados com dados coletados *in situ* pela boia de Santos.

Por fim, realizou-se a avaliação espacial das Reanálises CFSR e o ERA5 para as variáveis MAG10M, u10M e v10M, confrontando os dados modelados numericamente com os coletados pelo ASCAT. O domínio utilizado para a avaliação ficou entre os paralelos de 10°N a 60°S e os meridianos de 0°W a 80°W, englobando a BS.

As análises pontuais, ou seja, as comparações entre os dados das reanálises e do ASCAT com a boia de Santos foram realizadas no período de 12/04/2011 a 15/07/2017 e apenas nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT/boia de Santos são concomitantes. As análises espaciais para o oceano Atlântico Sul foram feitas utilizando o período de 01/01/2009 a 31/12/2017 e assim como para a avaliação pontual, os cálculos foram feitos apenas nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT estavam disponíveis concomitantemente.

O estudo realizado apresentou algumas limitações importantes, principalmente com relação à disponibilidade de dados coletados *in-situ* na área da BS. Das 4 boias disponíveis na região, apenas duas se encontravam afastadas da costa e dentre elas, apenas os dados da boia de Santos foram utilizados nas análises já que os dados da boia de

Florianópolis apresentaram grande percentual de falha após o tratamento aplicados aos dados, principalmente para a variável vento. Outra limitação importante se refere ao fato de não terem sido aplicadas correções relacionadas à efeitos da estabilidade atmosférica, densidade e correntes oceânicas nos dados do ASCAT, o que poderia aumentar ainda mais a acurácia das avaliações.

Apesar das limitações, os resultados encontrados mostram que de maneira geral as quatro reanálises avaliadas pontualmente conseguiram representar os dados coletados *in situ* pela boia de Santos, principalmente a variável PNMN, com destaque para o CFSR no ciclo anual. Para a T2M, a MERRA-2 apresentou maiores valores de CORR, apesar do ERA5 representar melhor o ciclo diurno. Na avaliação para a UR2M o destaque ficou por parte do ERA5, com elevados valores de CORR, menor RMSE e boa representação dos ciclos anual e diurno. Os resultados encontrados na avaliação pontual, por vezes concordam e por vezes discordam do apresentado em outros trabalhos, indicando a necessidade da avaliação espacial. Um exemplo disso ocorre ao analisarmos os resultados encontrados em PETROBRAS (2017), para a região de SEAL. Em seus resultados, os autores destacam que o CFSR subestima os dados de T2M em metade do ciclo anual e superestima na outra metade. Os dados do CFSR, quando comparados à boia de Santos, apresentam superestimativa ao longo de todo o ciclo. Para as Bacias de Campos (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015) e AGES (DERECZYNSKI et al., 2019; LOPES, 2018), imediatamente ao norte da BS, os resultados encontrados são similares, com exceção da subestimativa da T2M e UR2M descrita em LOPES (2018), mas que o próprio autor associa à interferência das estruturas metálicas da plataforma em que os sensores estão instalados.

As Reanálises CFSR e MERRA-2 se destacaram para a variável DIR10M. O CFSR por sua capacidade em representar os ventos mais intensos associados ao octante NE e a MERRA-2, por apresentar a mesma proporção de ventos nas direções NE e ENE.

Para a variável MAG10M, o ERA5 se destacou com as maiores CORR e menores RMSE, enquanto o CFSR apresentou melhor performance no ciclo anual e na análise de ventos extremos do QQplot. Assim, a partir dos resultados da análise pontual do vento, as Reanálises CFSR e ERA5 foram selecionadas para a análise espacial dessa variável.

Antes de utilizar o ASCAT na avaliação espacial das Reanálises CSFR e ERA5, fez-se uma comparação entre os dados coletados via sensoriamento remoto e os coletados

pela boia de Santos. Assim como o encontrado por RANI et al. (2014), que utilizou dados de boias fundeadas na região equatorial e Hemisfério Norte, o ASCAT conseguiu representar bem os dados coletados pela boia de Santos. Analisando conjuntamente as métricas estatísticas, os ciclos anuais e as distribuições de frequência de ocorrência direcionais dos ventos, pode-se afirmar que os dados de MAG10M e DIR10M estimados via sensoriamento remoto são muito próximos aos coletados pela boia *in situ* e podem ser utilizados para análise espacial das reanálises. A CORR das séries de dados foi de 0,94 enquanto o RMSE ficou em aproximadamente 1,0 m/s. A análise do BIAS indica subestimativa por parte do ASCAT. Os resultados encontrados foram similares aos de PAIVA *et al.* (2021).

As avaliações espaciais das variáveis MAG10M, u10M e v10M mostram que tanto o CFSR quanto o ERA5 conseguem representar os dados coletados via sensoriamento remoto, apresentando grande similaridade. Os mínimos e máximos de CORR ocorrem nas mesmas regiões e o mesmo ocorre com relação aos mínimos e máximos de RMSE. Em relação ao BIAS, as reanálises apresentam comportamento inverso para o MAG10M: enquanto o CFSR superestima os valores em praticamente todo o domínio, o ERA5 apresenta subestimativa. Para a BS essa diferença fica ainda mais notável quando se analisa a v10M, enquanto o CFSR superestima a porção norte e subestima a porção sul da BS, o ERA5 apresenta um comportamento totalmente oposto, superestimando a porção sul e subestimando a porção norte.

Com exceção da região próxima a linha do equador, a CORR foi forte, enquanto os valores de RMSE foram menores que o desvio padrão da observação (DPascats) em todo o domínio. As médias das variáveis para o período apresentaram grandes similaridades, sendo as diferenças entre as reanálises e o ASCAT pontuais, associadas principalmente aos núcleos de maior ou menor intensidade das variáveis em estudo. Os maiores (menores) valores de Desvio Padrão foram encontrados para a variável v10M (MAG10M). A distribuição espacial do desvio padrão é similar entre o ASCAT e as reanálises. A maior diferença encontrada foi para o CFSR, que apresenta desvio padrão maior que o DPascats na parte sul do domínio.

Os resultados encontrados na análise espacial do vento para o Atlântico Sul concordam parcialmente com o exposto em BEMONTE RIVAS e STOFFELEN (2019). De maneira geral, o ERA5 apresenta superestimativa da componente zonal do vento nas

latitudes médias e nos trópicos, com exceção da área entre 5°N e 5°S e próximo ao litoral norte da América do Sul. Para a componente meridional do vento, ocorre subestimativa por parte do ERA5 próximo à linha do equador e em grande parte das latitudes médias, entretanto a faixa entre 5°S e 25°S apresenta superestimativa.

Ainda no âmbito das análises das métricas estatísticas é importante destacar a Reanálise ERA5, que apresentou maiores valores de CORR e menores valores de RMSE frente ao CFSR, o que o destaca positivamente para temas relacionados à climatologia.

A partir de todo o exposto, também é possível inferir que o CFSR pode ser melhor para retratar casos de ventos intensos. Seu QQplot mostra uma melhora frente ao ERA5 nos quantis mais altos e na análise espacial é possível notar que ele tende a superestimar os valores de vento médios. Esse resultado concorda com o apresentado em NEHME *et al.* (2019), que destacam em seus resultados que o CFSR é mais energético que o ERA5.

Devido à baixa cobertura e baixa resolução espacial das redes de estações em regiões oceânicas, o uso da reanálise torna-se uma boa solução. Logo, saber qual reanálise melhor representa o vento para o Atlântico Sul torna-se uma importante ferramenta para a comunidade científica. A expectativa é que este trabalho possa contribuir para futuros estudos climatológicos na área do Oceano Atlântico Sul, fornecendo base para os pesquisadores escolherem o melhor conjunto de dados, levando em consideração a finalidade de suas análises.

Por fim, como recomendações para pesquisas futuras, deve-se considerar avaliar especialmente para a região do Atlântico Sul outras reanálises como, por exemplo, a MERRA-2 e a Japanese Reanalysis a fim de entender suas limitações e destaques positivos para a região em estudo. Outra possível adição ao trabalho apresentado seria a aplicação de ajustes, para que os efeitos da estabilidade atmosférica, densidade e correntes oceânicas sejam levados em consideração nos dados do ASCAT, aumentando assim a acurácia da comparação com os dados de reanálises.

6. Referências Bibliográficas

ALVAREZ, I. et al. Comparison of different wind products and buoy wind data with seasonality and interannual climate variability in the southern Bay of Biscay (2000–2009). **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, [s. l.], v. 106, p. 38–48, 2014. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096706451300369X>>

ARANA, D. Avaliação De Métodos De Interpolação Para O Mapgeo2015. **VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, [s. l.], p. 24–25, 2016. Disponível em: <https://www3.ufpe.br/visimgeo/includes/Anais_final_10_09_16/artigos/Todos_Artigos/002_2.pdf>

BAO, X.; ZHANG, F. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 206–214, 2013.

BELMONTE RIVAS, M.; STOFFELEN, A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT. **Ocean Science**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 831–852, 2019.

BERRISFORD, P. et al. The ERA-Interim Archive. **ERA report series**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 1–23, 2011. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/publications/library/do/references/list/782009>>

BOSILOVICH, M. G.; LUCCHESI, R.; SUAREZ, M. MERRA-2: File Specification. GMAO Office Note No. 9 (Version 1.1). [s. l.], v. 9, n. 9, p. 73, 2016.

CARVALHO, D. et al. Comparison of reanalyzed, analyzed, satellite-retrieved and NWP modelled winds with buoy data along the Iberian Peninsula coast. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 152, p. 480–492, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442571400265X>>. Acesso em: 25 mar. 2021.

CARVALHO, N. O. **Climatologia da Bacia de Santos**. 2018. Monografia - Departamento de Meteorologia/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. p. 88, [s. l.], 2018.

COLGAN, J. The International Energy Agency (IEA) - Challenges for the 21st Century.

GPPI Policy Paper Series, [s. l.], v. 6, n. 1, 2009. Disponível em: <<http://www.ogel.org/article.asp?key=19>>

DEE, D. P. et al. The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system. [s. l.], n. April, p. 553–597, 2011.

DERECZYNSKI, C. P. et al. - UFRJ Climatology of Espírito Santo and the Northern Campos Basin , Ofshore Southeast Brazil Climatologia da Bacia do Espírito Santo e Parte Norte da Bacia de Campos , Região Ofshore do Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s. l.], v. 42, p. 386–401, 2019.

DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. METEOROLOGIA DA BACIA DE CAMPOS. In: **Meteorologia e Oceanografia**. [s.l.] : Elsevier, 2015. p. 1–54.

EK, M. B. et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, [s. l.], v. 108, n. D22, p. 8851, 2003. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002JD003296>>

EUMETSAT. ASCAT User Guide. [s. l.], p. 167, 2017.

FIGA-SALDAÑA, J. et al. The advanced scatterometer (ASCAT) on the meteorological operational (MetOp) platform: A follow on for European wind scatterometers. [s. l.], v. 28, n. 3, p. 404–412, 2002.

GELARO, R. et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, [s. l.], v. 30, n. 14, p. 5419–5454, 2017. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>>

GRIFFIES, S. M. et al. Developments in ocean climate modelling. **Ocean Modelling**, [s. l.], v. 2, n. 3–4, p. 123–192, 2000. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1463500300000147>>

HACKETT, B. User Manual For Global Ocean L3 Wind. [s. l.], n. September, p. 34, 2019.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s. l.], p. qj.3803, 2020. Disponível em:

<<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803>>

LIU, W. T.; KATSAROS, K. B.; BUSINGER, J. A. Bulk Parameterization of Air-Sea Exchange of Heat and Water Vapor Including the Molecular Constraints at the Interface. **Journal of the Atmospheric Science**, [s. l.], v. 36, p. 1722–1735, 1979.

LOPES, Í. R. **Avaliação da performance da Reanálise CFSR para caracterizar o clima da Bacia do Espírito Santo e parte norte da Bacia de Campos**. 2018. Monografia – Departamento de Meteorologia/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ. p. 78, [s. l.], 2018.

MUKAKA, M. M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, [s. l.], v. 24, n. September, p. 69–71, 2012. Disponível em: <<https://www.ajol.info/index.php/mmj/article/view/81576>>

NEHME, D. M.; TOSTE, R.; ASSAD, L. P. de F. Comparação climatológica do vento na superfície do mar entre duas reanálises atmosféricas globais para a margem continental leste/sudeste brasileira. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [s. l.], v. 42, p. 117–126, 2019.

PAIVA, V.; KAMPEL, M.; CAMAYO, R. Comparison of Multiple Surface Ocean Wind Products with Buoy Data over Blue Amazon (Brazilian Continental Margin). **Advances in Meteorology**, [s. l.], v. 2021, p. 19, 2021.

PETROBRAS. Projeto de caracterização regional da bacia de Sergipe-Alagoas. Petrobras, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. p. 98, p. 98 p, 2017.

RANI, S. I. et al. Intercomparison of oceansat-2 and ASCAT winds with in situ buoy observations and short-term numerical forecasts. **Atmosphere - Ocean**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 92–102, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/07055900.2013.869191>>

REHMAN TAHIR, Z. U. et al. Evaluation of ERA-Interim and NCEP-CFSR Reanalysis Datasets against in-situ Measured Wind Speed Data for Keti Bandar Port, Pakistan. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1102, n. 1, p. 12, 2018.

REICHLER, T.; KIM, J. Uncertainties in the climate mean state of global observations, reanalyses, and the GFDL climate model. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, [s. l.], v. 113, n. 5, p. 13, 2008.

RIBAL, A.; YOUNG, I. R. Calibration and cross validation of global ocean wind speed based on scatterometer observations. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 279–297, 2020.

RIENECKER, M.M., M.J. SUAREZ, R. TODLING, J. BACMEISTER, L. TAKACS, H.-C. LIU, W. GU, M. SIENKIEWICZ, R.D. KOSTER, R. GELARO, I. STAJNER, J. E. N. The GEOS-5 Data Assimilation System — Documentation of Versions 5 . 0 . 1 , 5 . 1 . 0 , and 5 . 2 . 0. [s. l.], v. 27, n. December, p. 118, 2008.

ROGERS, R. R.; YAU, M. K. **A short course in cloud physics**. 3. ed., re ed. Oxford, p. 290: Butterwoth-Heinemann, 1996.

RUTI, P. M. et al. Comparison of analyzed and measured wind speeds in the perspective of oceanic simulations over the Mediterranean basin: Analyses, QuikSCAT and buoy data. **Journal of Marine Systems**, [s. l.], v. 70, n. 1–2, p. 33–48, 2008.

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [s. l.], v. 91, n. 8, p. 1015–1058, 2010. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2010BAMS3001.1>>

SAHA, S. et al. The NCEP Climate Forecast System Version 2. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 2014. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>>

SCHOWENGERDT, R. A. CHAPTER 7 - Correction and Calibration. In: SCHOWENGERDT, R. A. B. T.-R. S. (Third E. (Ed.). Burlington: Academic Press, 2007. p. 285–354.

SCHULZWEIDA, U. CDO User Guide. [s. l.], n. October, p. 206, 2019. Disponível em: <<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo>>

SLUITER, R. Interpolation methods for climate data. [s. l.], p. 28, 2009. Disponível em: <https://www.snap.uaf.edu/sites/default/files/files/Interpolation_methods_for_climate_data.pdf>

SONG, L.; LIU, Z.; WANG, F. Comparison of wind data from ERA-Interim and buoys in the Yellow and East China Seas. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 282–288, 2014.

WANG, C. et al. Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution. **Cryosphere**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 1661–1679, 2019.

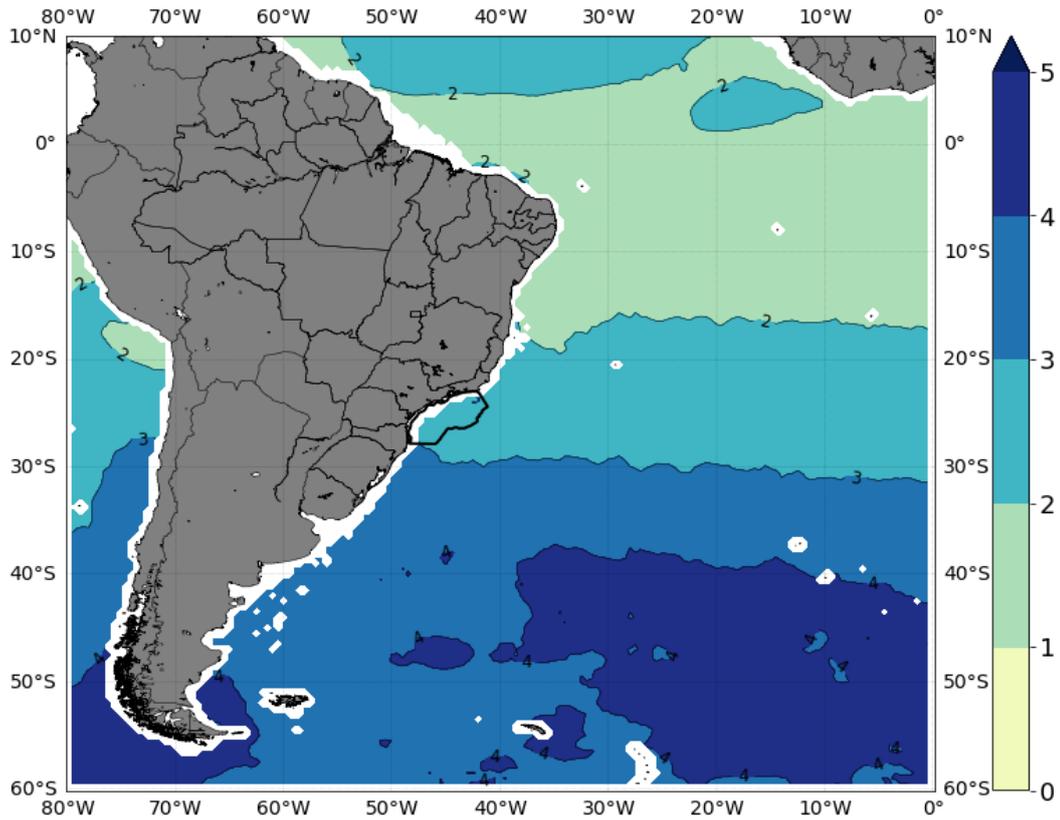
WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2nd. ed. Amsterdam ; Boston p.627: Academic Press, 1995.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. [s. l.], n. 1203, p. 1–29, 2017. Disponível em: <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166>

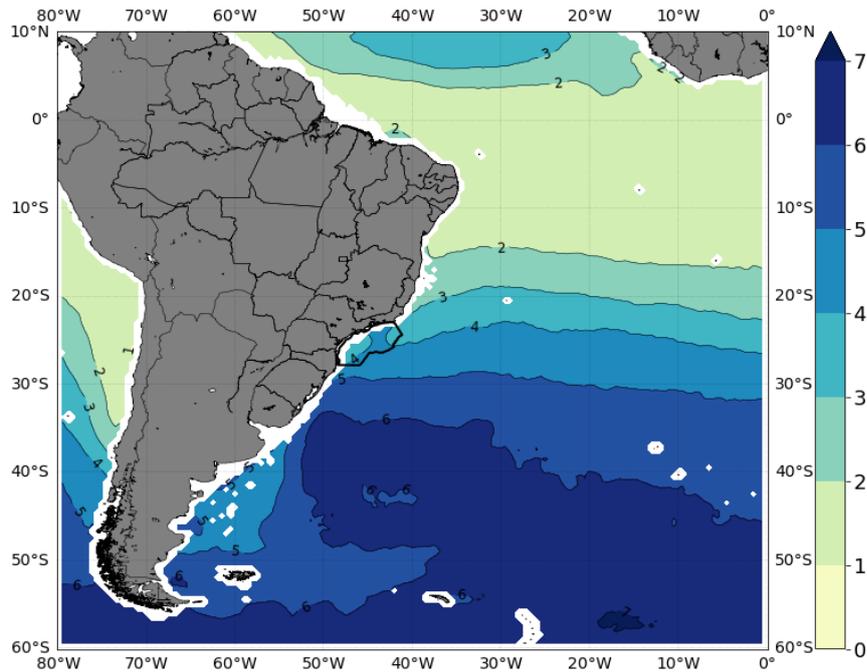
YANG, J.; ZHANG, J. Comparison of Oceansat-2 Scatterometer Wind Data with Global Moored Buoys and ASCAT Observation. **Advances in Meteorology**, [s. l.], v. 2019, p. 9, 2019.

A. Apêndice

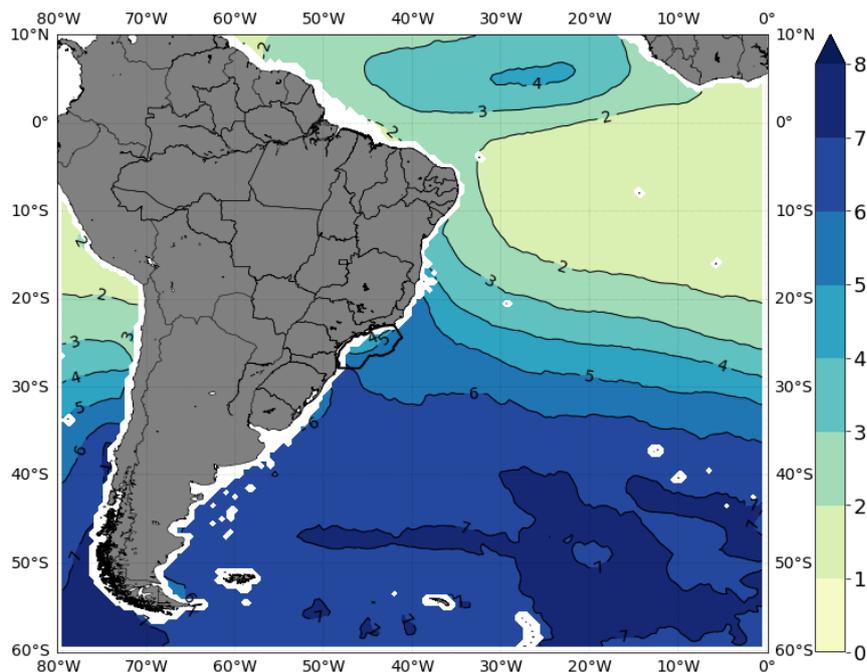
A.1. Campos de Desvio Padrão elaborados a partir das Reanálises CFSR e ERA5



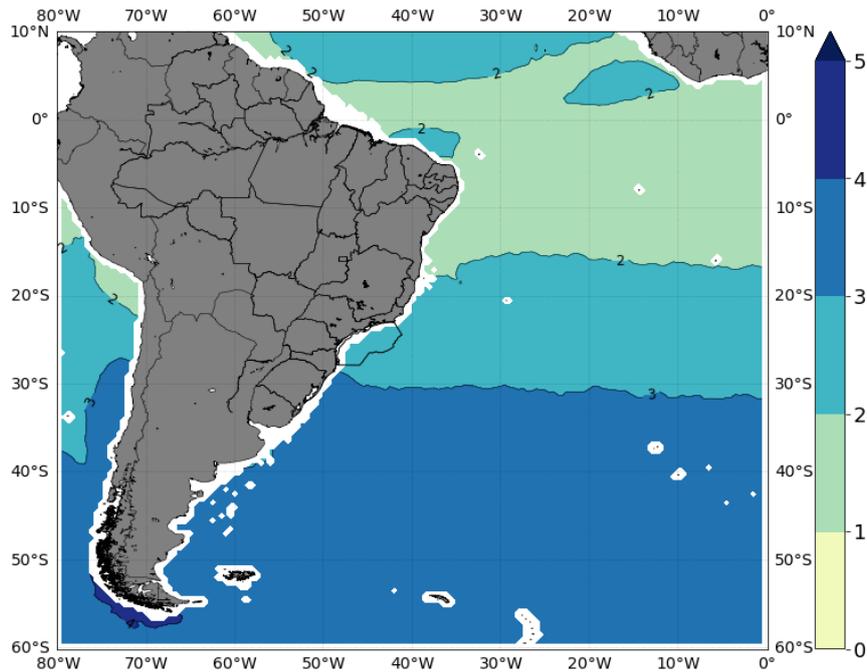
A. 1 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M para os dados do CFSR. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.



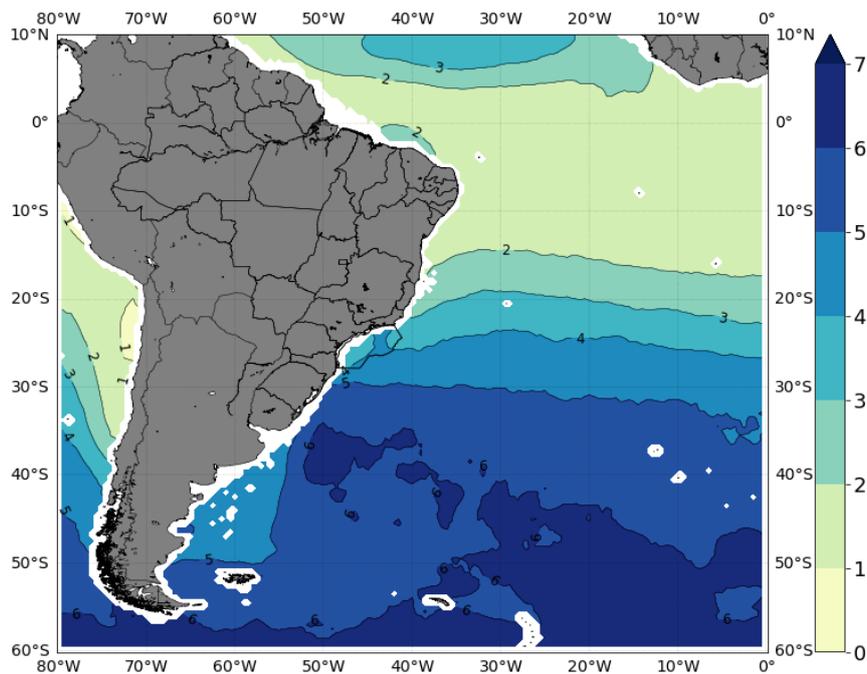
A. 2 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u_{10M} para os dados do CFSR. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada na figura.



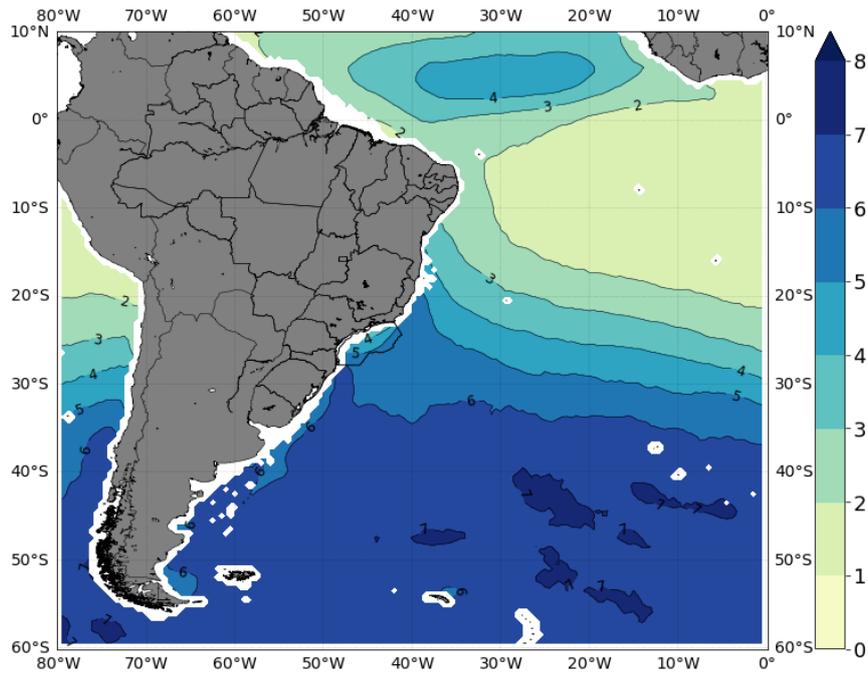
A. 3 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v_{10M} para os dados do CFSR. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada na figura.



A. 4 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável MAG10M para os dados do ERA5. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada na figura.

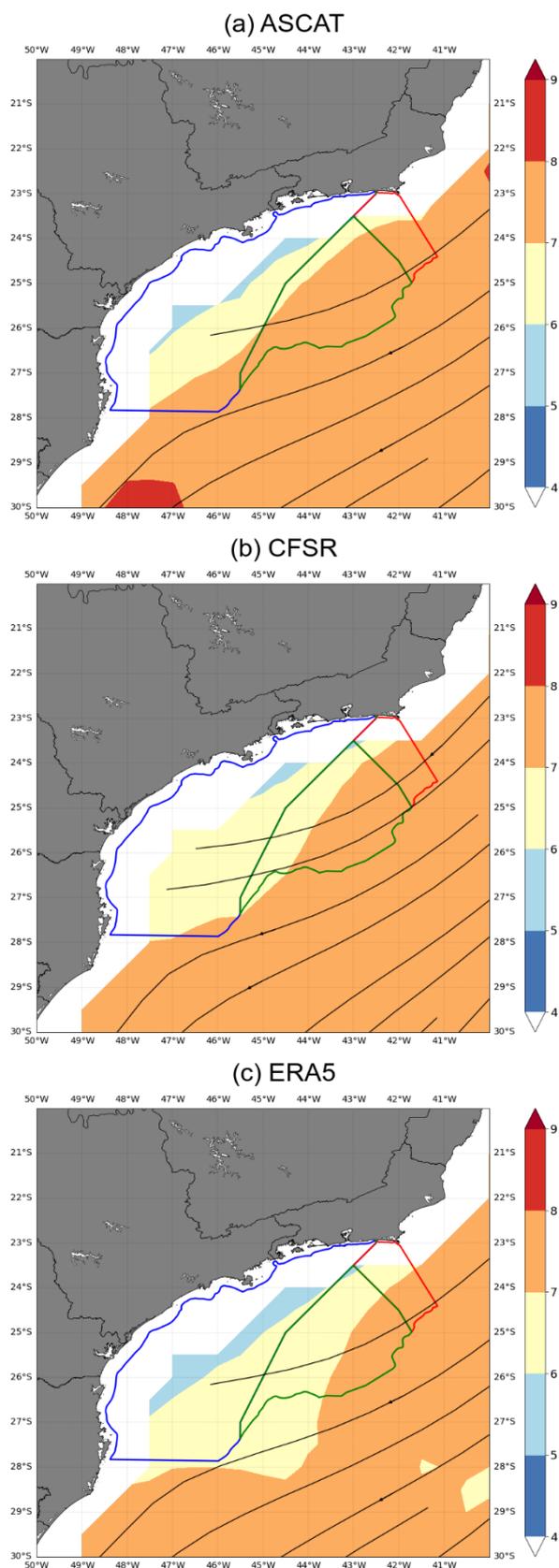


A. 5 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável u10M para os dados do ERA5. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Baía de Santos se encontra destacada na figura

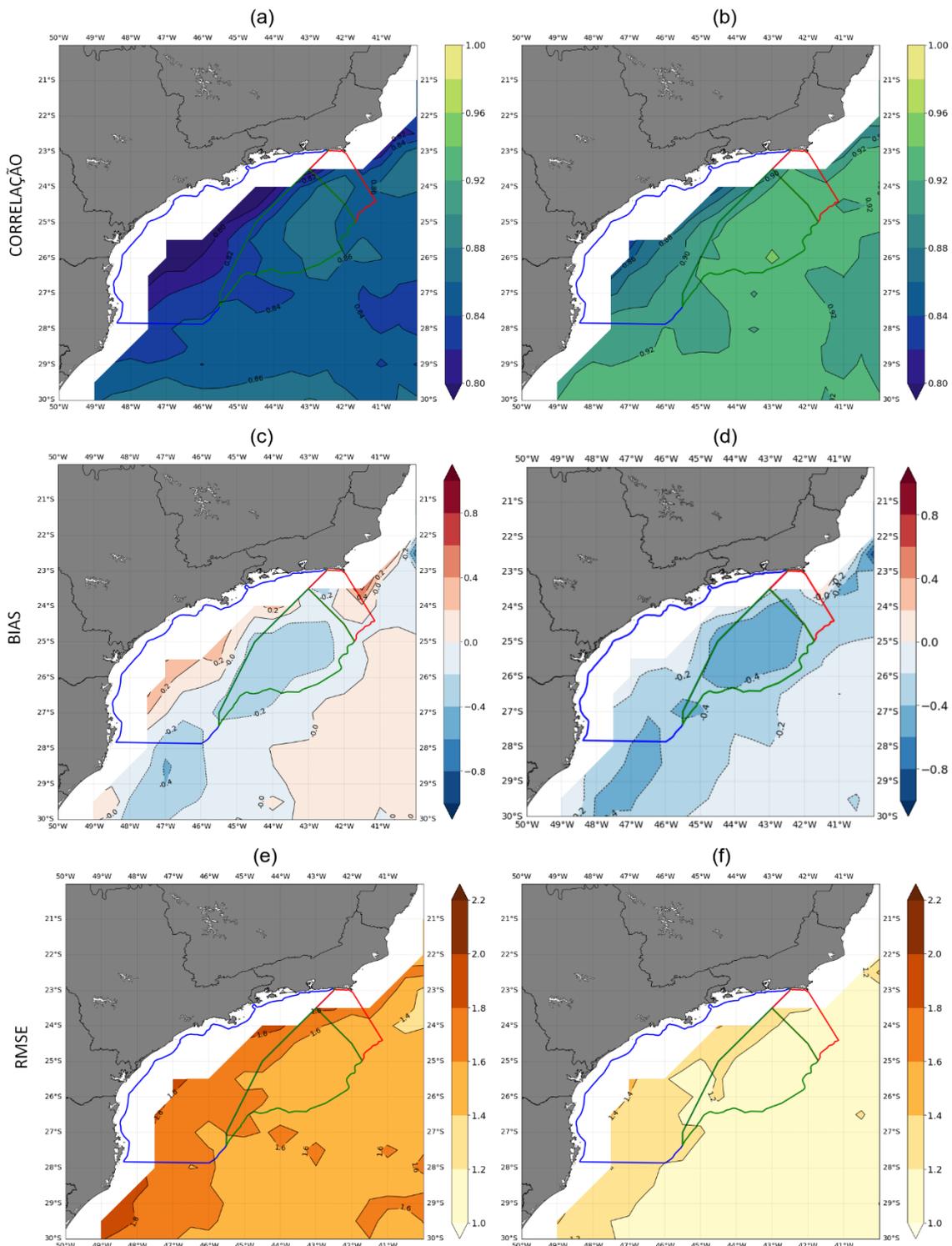


A. 6 - Desvio Padrão calculado para cada ponto de grade da região em estudo para a variável v10M para os dados do ERA5. Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados das reanálises e do ASCAT são concomitantes. A Bacia de Santos se encontra destacada na figura.

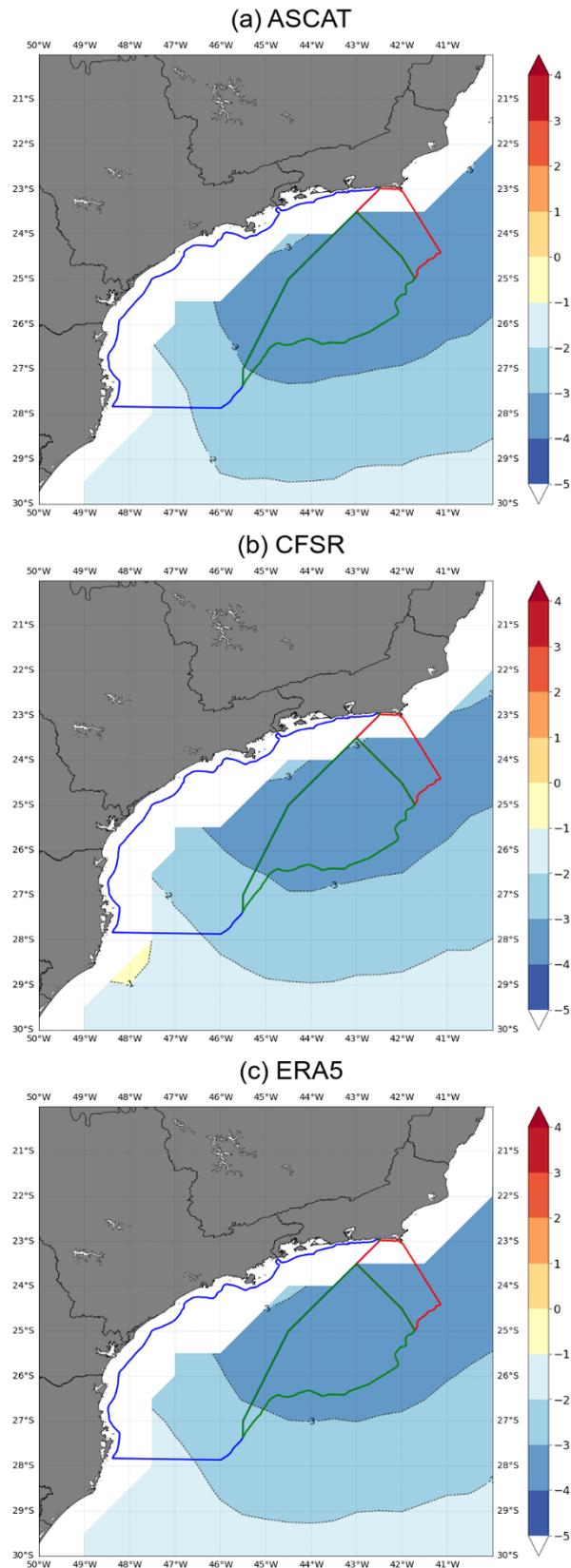
A.2. Recorte dos campos de Média, CORR, BIAS e RMSE para a região da Bacia de Santos



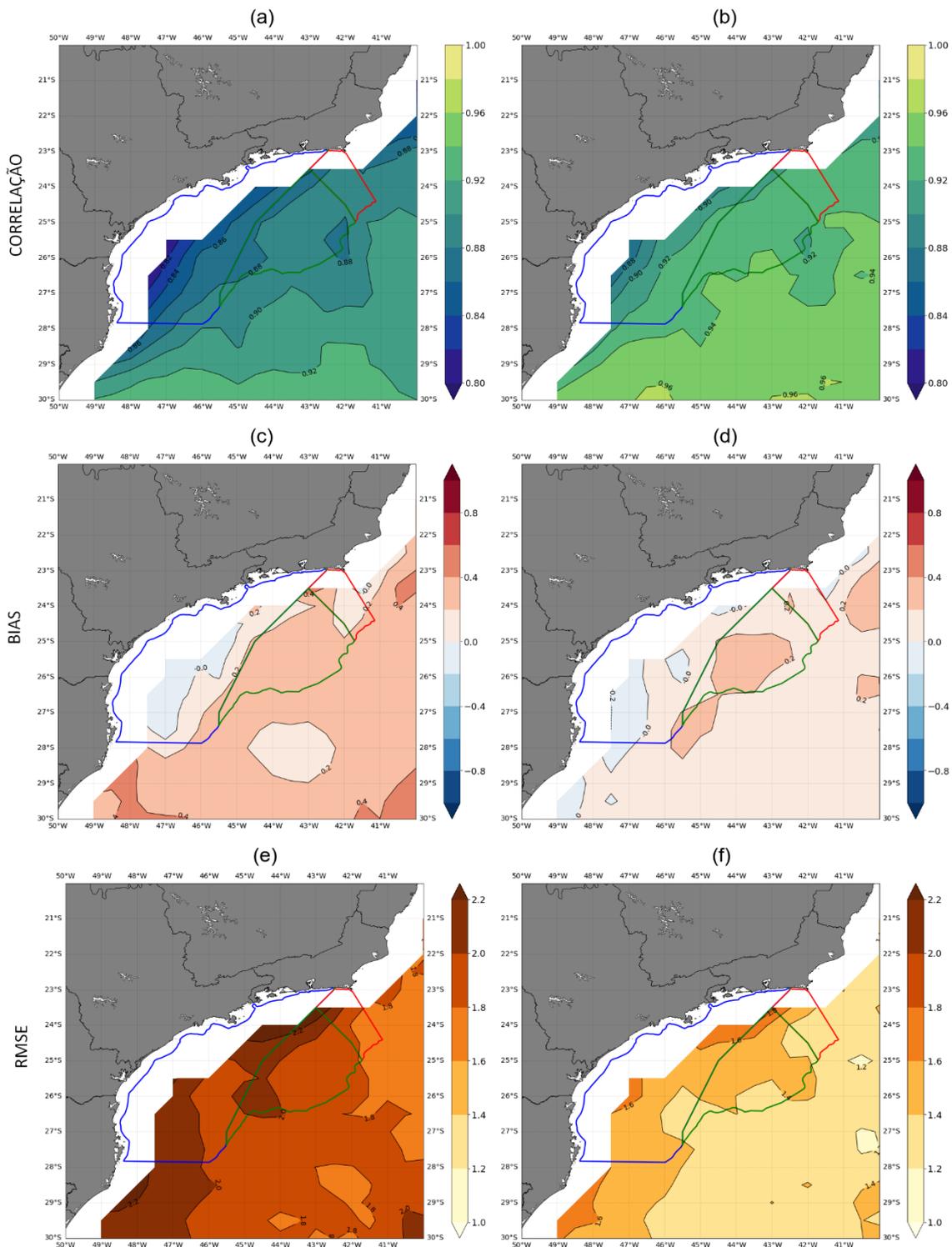
A. 7 – Recorte do campo da média de MAG10M (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio se encontram destacadas na figura.



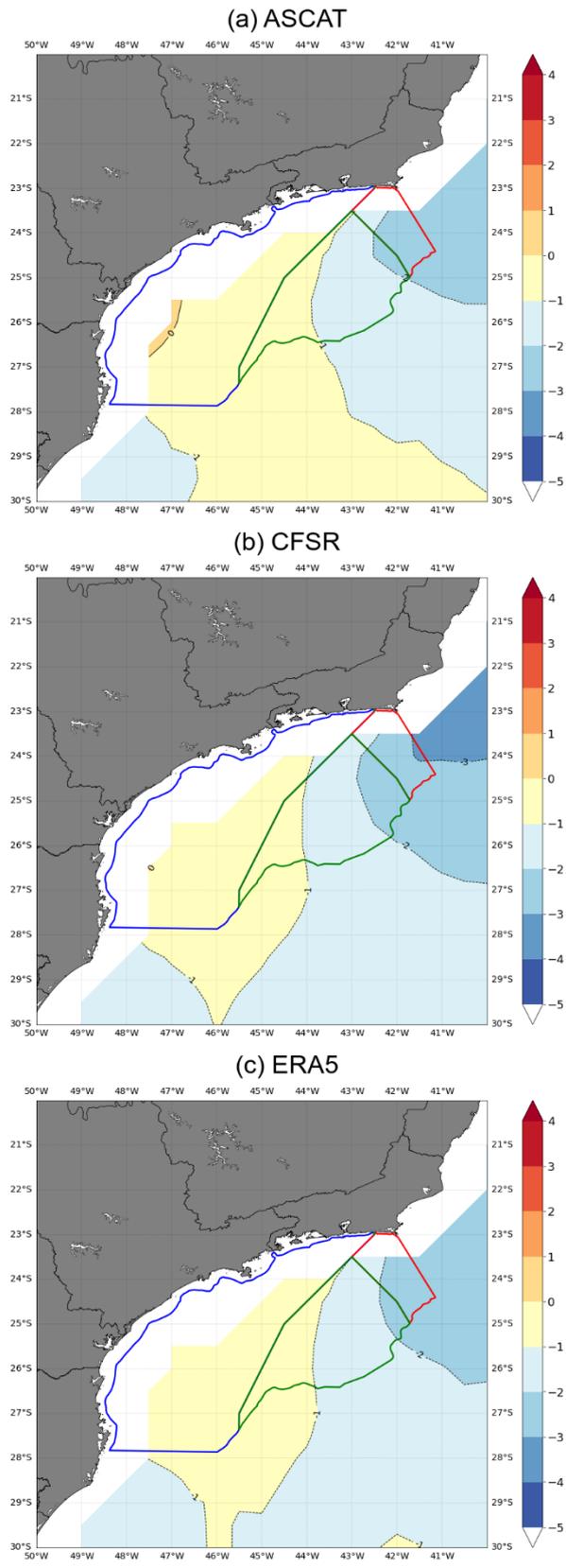
A. 8 – Recorte dos campos de (a) e (b) CORR (m/s), (c) e (d) BIAS (m/s), (e) e (f) RMSE para a região da BS para a variável MAG10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio, se encontram destacadas na figura.



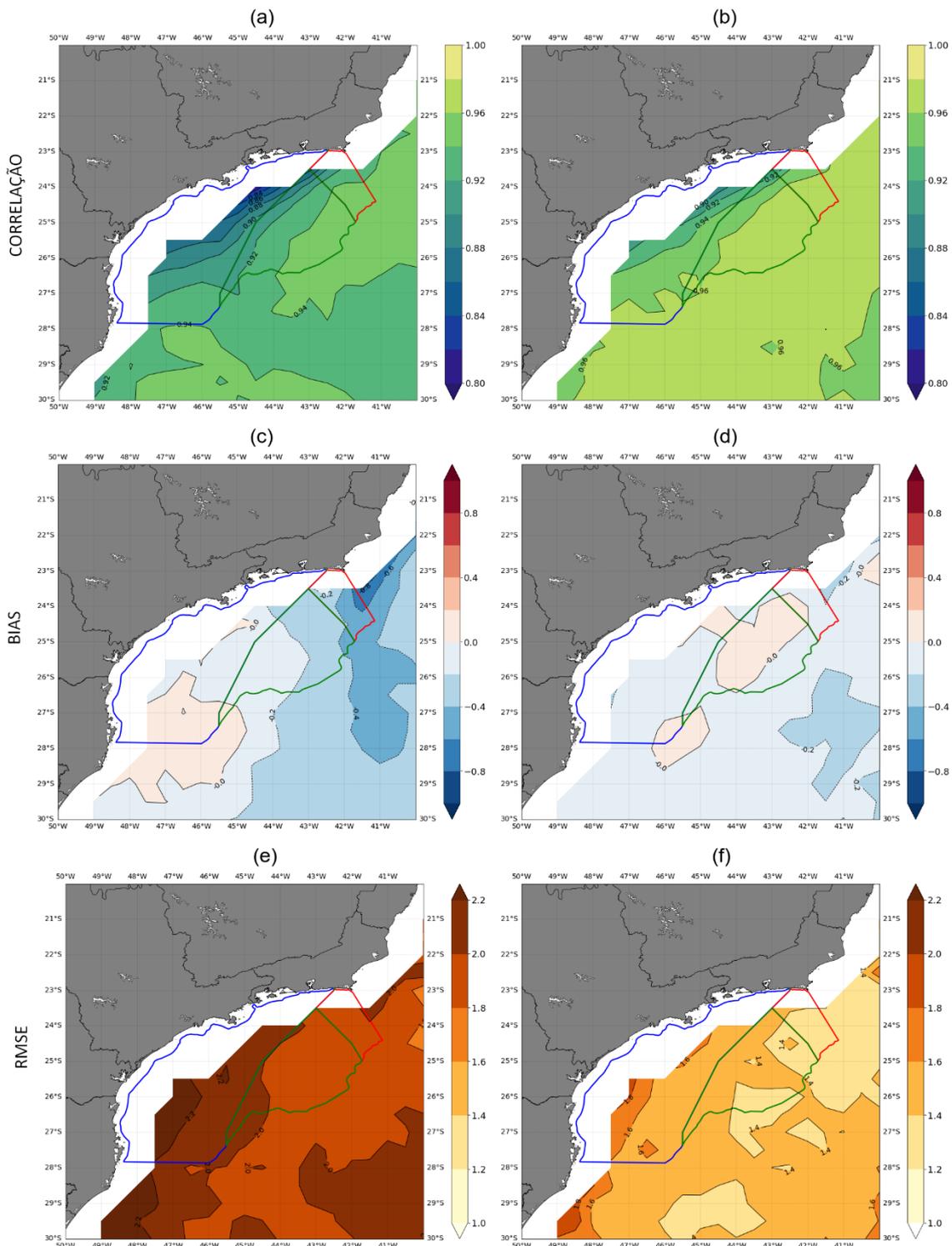
A. 9 - Recorte do campo médio de u_{10M} (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio se encontram destacadas na figura.



A. 10 - Recorte dos campos de (a) e (b) CORR (m/s), (c) e (d) BIAS (m/s), (e) e (f) RMSE para a região da BS para a variável u10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio, se encontram destacadas na figura.



A. 11 - Recorte do campo médio de u_{10M} (m/s) para (a) ASCAT, (b) CFSR e (c) ERA5 para o período de 01/01/2009 a 31/12/2017. A média apresentada foi elaborada apenas nos horários em que havia dados concomitantes das reanálises e do ASCAT. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio se encontram destacadas na figura.



A. 12 - Recorte dos campos de (a) e (b) CORR (m/s), (c) e (d) BIAS (m/s), (e) e (f) RMSE para a região da BS para a variável u10M das Reanálises CFSR (coluna da esquerda) e ERA5 (coluna da direita). Período de dados utilizado: 01/01/2009 a 31/12/2017. Resultado calculado nos horários em que os dados da reanálise e do ASCAT são concomitantes. As três Áreas da BS, Área Rasa, Área Profunda e Área Cabo Frio, se encontram destacadas na figura.