



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR

MESTRADO EM CIÊNCIAS MARINHAS E TROPICAIS

GIULIAN SMITH ARAÚJO MONTEIRO

**VALIDAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES NUMÉRICAS
PARA A MODELAGEM DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BTS.**

FORTALEZA

2022

GIULIAN SMITH ARAUJO MONTEIRO

VALIDAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES NUMÉRICAS
PARA A MODELAGEM DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BTS.

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Ciências
Marinhas e Tropicais., da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre em Ciências
Marinhas e Tropicais

Área de concentração: Ciência, Tecnologia E
Gestão Costeira E Oceânica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira

Co-orientador: Prof. Dr. Guilherme Camargo
Lessa

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M776v Monteiro, Giulian Smith Araújo.
VALIDAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES NUMÉRICAS PARA A MODELAGEM DA BAÍA
DE TODOS OS SANTOS, BTS. / Giulian Smith Araújo Monteiro. – 2022.
94 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Coorientação: Prof. Dr. Guilherme Camargo Lessa.

1. Baía de Todos os Santos. 2. ROMS. 3. circulação estuarina. 4. modelagem hidrodinâmica. I. Título.
CDD 551.46

GIULIAN SMITH ARAUJO MONTEIRO

VALIDAÇÃO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES NUMÉRICAS
PARA A MODELAGEM DA BAÍA DE TODOS OS SANTOS, BTS.

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Ciências Marinhas e Tropicais., da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências Marinhas e Tropicais Área de concentração: Ciência, Tecnologia E Gestão Costeira E Oceânica

Aprovada em ___/___/2022_.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)

Universidade Federal do Ceará-UFC

Dra. Bárbara Pereira Paiva

Universidade Federal do Ceará-UFC

Dr. Pedro Paulo de Freitas

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e pelos ensinamentos.

Aos meus pais, que assim como eu suportaram a saudade nesses anos longe.

Aos meus irmãos, tios, primos e sobrinhas, que são como uma rocha onde me sustento nos tempos mais difíceis

Aos meus amigos do LOF, do LABOMAR e da vida, pelas conversas cotidianas, pelas histórias de fantasmas e pela ajuda. Vocês são muitos para serem citados, mas vocês sabem quem vocês são.

À CAPES, pelo financiamento;

Aos amigos dos tempos de UFPA (Anderson, Luana, Jeniffer, Thayane, Felipe, Raphael e Yago) por manter contato mesmo quando a distância foi grande demais;

Ao meu orientador, que mesmo em meio a um tsunami (kkkkk) encontrou tempo para a difícil tarefa de orientar remotamente.

Ao meu coorientador e a todos do grupo de trabalho na UFBA que ajudaram a tornar essa dissertação possível;

À banca avaliadora pelas sugestões e pelo tempo utilizado na avaliação desta dissertação;

Ao Dr. Martinho Marta Almeida e os pesquisadores do Grupo de Oceanografia Tropical da UFBA pelo desenvolvimento de parte dos modelos usados na dissertação e a Petrobras Petróleo Brasileiro S.A. pelo financiamento de algumas das simulações no contexto do projeto Coral Sol;

A todos os professores que participaram do meu período de mestrado e me deram a dimensão da importância e do tamanho do PPGCMT.

À simpática senhorinha que joga restos de frango pra mim desde que eu virei jacaré.

“Para vir a saborear tudo, não queiras ter gosto em nada. Para vir a saber tudo, não queiras saber algo em nada. Para vir a possuir tudo, não queiras possuir algo em nada”

(São João da Cruz)

RESUMO

A Baía de Todos os Santos é uma região de elevado potencial ecológico e econômico tanto para o estado da Bahia quanto para o Brasil como um todo. Por conta disso, houveram diversos avanços na coleta de dados oceanográficos e na criação de modelos numéricos da região nos últimos anos. Entretanto, o conjunto de configurações e condicionantes que melhor representa a hidrodinâmica na Baía de Todos os Santos permanece desconhecido. Quatro configurações diferentes foram utilizadas e comparadas entre si a fim de definir quais modelos e configurações melhor representam as condições hidrodinâmicas da Baía de Todos os Santos. Dados de salinidade, temperatura, densidade, correntes, nível e componentes harmônicos foram utilizados para comparar as quatro simulações e validar seus resultados. Estas simulações se diferenciam quanto ao uso de configurações *wet-and-dry*, forçantes superficiais e condições de contorno. A simulação desprovida do sistema *wet and dry* foi a pior entre as quatro, assinalando a necessidade do uso desse sistema na modelagem desta região. Os diferentes modelos astronômicos e de contorno oceânico utilizados tiveram performances semelhantes, com o modelo CFSR atuante em boas simulações quanto a nível e velocidade enquanto o modelo WRF auxiliou na melhor representação do campo termo-halino. O modelo HYCOM foi inferior ao GLORYS/Mercator nos dados de nível e velocidade e superior na representação do campo termo-halino. Levando em conta a possibilidade de calibração, uma simulação com o modelo GLORYS/Mercator e uma implementação híbrida dos modelos CFSR e WRF pode ser a de melhor configuração para a modelagem da BTS.

Palavras chave: Baía de Todos os Santos, ROMS, circulação estuarina, modelagem hidrodinâmica

ABSTRACT

The Todos os Santos Bay is a region with high ecological and economical potential for the Bahia state and for Brazil as a whole. Because of that, there were many advances on oceanographic data sampling and on the creation of numerical models for the region in the last few years. However, the group of configurations and conditioners that best represent the Todos os Santos Bay hydrodynamics remains unknown. Four different setups were used and compared among themselves in order to define which models and settings best represent the hydrodynamic conditions from Todos os Santos Bay. Salinity, temperature, density, currents, water level and harmonic constituents' data were used to compare the four simulations and validate their results. The simulation without the wet and dry system was the worst between the four, signaling the need for the use of this system in the modeling of such region. The different astronomical and ocean boundary models used had similar performances, with the CFSR model working in good level and velocity simulations while the WRF model helped on the best representation of the thermo-haline field. HYCOM model was inferior compared to GLORYS/Mercator in level and velocity data and superior on the thermo-haline field representation. Taking into account the possibility of calibration, a simulation with the GLORYS/Mercator model and a hybrid employment of CFSR and WRF models could be the best setup for modelling the Todos os Santos Bay.

Keywords: Todos os Santos Bay, wet and dry, estuarine circulation, hydrodynamical modelling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa da região da BTS mostrando os pontos de coleta de dados de campo.	4
Figura 2: Malha computacional utilizada nas quatro simulações hidrodinâmicas.	5
Figura 3: Batimetria da BTS interpolada e utilizada como base das simulações..	6
Figura 4: Perfis de salinidade na campanha do mês de março de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.	10
Figura 5: O mesmo da Figura 4, mas para a campanha do mês de maio.	11
Figura 6: O mesmo da Figura 4, mas para a campanha do mês de julho.	12
Figura 7: Viés médio para salinidade ao longo do transecto nos cinco meses simulados.	13
Figura 8: Índice de espalhamento para salinidade ao longo do transecto nos cinco meses simulados.	15
Figura 9: Gráficos comparativos da diferença média de salinidade entre as quatro simulações e os dados de CTD nos seis pontos de amostragem. As regiões sombreadas indicam o desvio padrão e a linha sólida em vermelho vivo indica $\Delta=0$.	17
Figura 10: Perfis de temperatura na campanha do mês de março de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.	20
Figura 11: O mesmo da Figura 10, mas para a campanha de maio.	22
Figura 12: O mesmo da Figura 10, mas para a campanha de julho.	23
Figura 13: Viés médio sobre a temperatura ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.	24
Figura 14: Índice de espalhamento para temperatura ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.	26
Figura 15: Gráficos comparativos da diferença média de temperatura entre as quatro simulações e os dados de CTD nos seis pontos de amostragem. As regiões sombreadas indicam o desvio padrão e a linha sólida em vermelho vivo indica $\Delta=0$.	28
Figura 16: Perfis de densidade na campanha do mês de março de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.	31
Figura 17: O mesmo da Figura 16, mas para a campanha do mês de maio.	33
Figura 18: O mesmo da Figura 16, mas para a campanha do mês de julho.	34
Figura 19: Viés para densidade ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.	35
Figura 20: Índice de espalhamento para densidade ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.	37
Figura 21: Gráficos comparativos da diferença média de densidade entre os as quatro simulações e os dados de CTD nos seis pontos de amostragem. As regiões sombreadas indicam o desvio padrão e a linha sólida em vermelho vivo indica $\Delta=0$.	39

Figura 22: Séries de velocidade de corrente médias da coluna de água no ponto A1 decompostas em perpendiculares (U, painéis superiores) e paralelas (V, painéis inferiores) à costa, a linha dourada indica velocidade = 0 m/s.	43
Figura 23: O mesmo da Figura 22, mas para o ponto A2.	45
Figura 24: O mesmo da Figura 22, mas para o ponto A3.	47
Figura 25: Dados de velocidade de corrente do ponto A1 filtrados em passa baixa de 53 horas. A organização dos painéis segue a apresentada nas figuras 22 a 24.	49
Figura 26: O mesmo da Figura 25, mas para o ponto A2.	51
Figura 27: O mesmo da Figura 25, mas para o ponto A3.	53
Figura 28: Séries temporais de nível do mar no ponto A1; com o painel superior comparando os dados observados às simulações NO_WD e WD-CFSR-HY, o painel central com as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY e o painel inferior comparando os dados observados com as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR, a linha dourada indica nível=0,00m.	55
Figura 29: O mesmo da Figura 28, mas para o ponto A2.	56
Figura 30: O mesmo da Figura 28, mas para o ponto A3.	57
Figura 31: Dados de nível do mar no ponto A1 filtrados com filtro passa baixa de 53 horas. A organização dos painéis seguiu a apresentada nas Figuras 28 a 30.	59
Figura 32: O mesmo da Figura 31, mas para o ponto A2.	60
Figura 33: O mesmo da Figura 31, mas para o ponto A3.	61

Figura A.1: Perfis de salinidade na campanha do mês de abril de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.	75
Figura A.2: O mesmo da Figura A.1, mas para a campanha do mês de junho.	76
Figura A.3: Perfis de temperatura na campanha do mês de abril de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.	77
Figura A.4: O mesmo da Figura A.9, mas para a campanha do mês de junho.	78
Figura A.5: Perfis de densidade na campanha do mês de abril de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.	79
Figura A.6: O mesmo da Figura A.17, mas para a campanha do mês de junho.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das diferenças de configuração entre as quatro simulações.	7
Tabela 2: Resumo das configurações gerais das simulações utilizadas.	8
Tabela 3: Valores médios de RMSE da coluna de água entre os dados de salinidade observados e calculados em cada simulação separando por ponto e campanha.	18
Tabela 4: Valores médios de RMSE da coluna de água entre os dados de temperatura observados e calculados em cada simulação separando por ponto e campanha.	29
Tabela 5: Valores médios de RMSE da coluna de água entre os dados de densidade observados e calculados em cada simulação separando por ponto e campanha.	40
Tabela 6: Valores de ρ e RMSE dos dados de correntes das simulações em relação aos dados observados. Valores em negrito são os melhores entre as simulações para cada componente.	48
Tabela 7: Estatísticas referentes à comparação dos dados de velocidade filtrados para as quatro simulações.	54
Tabela 8: Estatísticas referentes a comparação dos dados de nível do mar para as quatro simulações.	58
Tabela 9: Estatísticas dos dados filtrados de nível do mar.	62
Tabela 10: Percentual de variação de nível causada pelas marés em cada ponto e cada simulação.	62
Tabela 11: Percentual da variação das correntes perpendiculares (U) e paralelas (V) ao canal causadas pelas marés.	63
Tabela 12: Componentes harmônicos extraídos dos dados de nível observados e simulados no ponto A1. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal	63
Tabela 13: Componentes harmônicos extraídos dos dados de nível do ponto A2. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal	64
Tabela 14: Componentes harmônicos extraídos dos dados de nível do ponto A3. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal	65
Tabela 15: Componentes harmônicos extraídos dos dados de corrente do ponto A1. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal	65
Tabela 16: Componentes harmônicos extraídos dos dados de corrente do ponto A2. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal	66
Tabela 17: Componentes harmônicos extraídos dos dados de corrente do ponto A3. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal	67

LISTA DE ABREVIACÕES

- ADCP – Acoustic Doppler Current Profiler
- APA – Área de Proteção Ambiental
- BTS – Baía de Todos os Santos
- CFSR – Climate Forecast System Reanalysis
- CTD – Conductivity, Temperature and Depth
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação
- HYCOM – Hybrid Coordinate Ocean Model
- RMSE – Erro médio quadrático
- ROMS – Regional Ocean Modeling System
- SI – Scatter Index ou Índice de Espalhamento
- UFBA – Universidade Federal da Bahia
- UFC – Universidade Federal do Ceará
- WD- Wet and Dry
- WRF – Weather Research and Forecast

Sumário	
1. Introdução	1
2. Justificativa	2
3. Objetivos	3
4. Metodologia	3
5. Resultados	9
5.1 Resultados – Campo termo-halino	9
5.2 Resultados – Correntes	42
5.3 Resultados – Nível	54
5.4 Resultados – Componentes harmônicos:	62
6. Discussões	67
7. Conclusões	70
Referências	72
APÊNDICE A – Figuras dos resultados dos dados do campo termo-halino nas campanhas restantes	76

1. Introdução

A Baía de Todos os Santos (BTS) está localizada na região nordeste do Brasil e tem nas suas margens a cidade de Salvador, a terceira maior cidade do país, com mais de três milhões de habitantes. A BTS apresenta extensão de aproximadamente 50 km e área de cerca de 1233 km² e sendo, ao lado da Baía de São Marcos (MA) e de Paranaguá (PR), uma das maiores baías do Brasil (Cirano & Lessa, 2007).

A BTS abriga oito dos dez portos e terminais marítimos existentes no Estado da Bahia e o maior complexo petroquímico do hemisfério sul (Polo de Camaçari), atividades importantes para a economia do estado (Lima, 1994). A região é também um importante ponto turístico para o estado e para o país. Suas águas servem de recreação para a população local e também para turistas do país e do mundo que são atraídos pela beleza natural e pelo cunho histórico da região.

Na BTS se encontram ecossistemas com alta biodiversidade, como a expressiva extensão de recifes de corais, estuários e manguezais, que fazem da BTS um ambiente particular e de extrema significância ecológica. Como reconhecimento de sua importância ambiental, a baía foi considerada alvo de medida de preservação, através do Decreto Estadual 7.595 (de 5 de junho de 1999), que deu origem à Área de Proteção Ambiental – APA Baía de Todos os Santos.

Apesar dessa importante medida de proteção, as águas da BTS ainda são passíveis de impacto ambiental. Como exemplos destes impactos, podemos destacar a descarga de esgotos domiciliares e industriais sem tratamento, poluição por hidrocarbonetos, introdução de espécies exóticas e atividades de dragagem (Da Rocha et al., 2012; Souza Queiroz & Celino, 2008).

O primeiro artigo científico sobre a oceanografia física da BTS é da década de 1980 (Wolgemuth et al., 1981) sendo antecedido somente por pesquisas da Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN que possibilitaram a criação de tábuas de maré para a BTS. Com o desenvolvimento do Projeto Bahia Azul, a coleta de dados de campo foi intensificada o que favoreceu o surgimento de diversas frentes de pesquisa oceanográfica na região com Xavier (2002) aplicando modelagem numérica, CRA (2001) e Lima & Lessa (2002) calculando a descarga fluvial, Santos et al., (2003) que aferiram o balanço hídrico e Genz et al., (2008) que analisaram o impacto da Represa Pedra do Cavalo na circulação da BTS.

A circulação total em toda a extensão da BTS é predominantemente forçada pela maré, cuja amplitude pode chegar até 2,5m no seu interior (Cirano & Lessa, 2007). Entretanto, as forçantes baroclínicas como fluxo de calor e descarga fluvial também apresentam uma contribuição significativa para a circulação na BTS (Santana et al., 2018) e são os principais responsáveis pela circulação residual. Fenômenos de ressurgência forçada pelo vento foram reportados recentemente na entrada da BTS (Aguiar et al., 2018) e seus efeitos sobre as trocas da BTS com a plataforma ainda precisam ser esclarecidos.

No interior da BTS desaguam seis rios principais – Dona, Jaguaripe, Paraguaçu, Açú, Subaé e Traripe – com descarga média de $116 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Lessa et al, 2009) e que apresentam uma intensa sazonalidade, com valores máximos (mínimos) de descarga durante o verão (inverno), resultados do regime pluviométrico na cabeceira do Rio Paraguaçu (Hatje & Andrade, 2009), principal tributário da BTS. Os ventos na região são advindos predominantemente de Leste/Nordeste durante o verão e de Sul/Sudeste durante o inverno (Aguiar et al., 2019).

2. Justificativa

A modelagem numérica é aplicada à BTS desde 1998 (Montenegro Neto, 1998) e começou com o Princeton Ocean Model na avaliação da influência do vento na circulação central da baía. Xavier (2002) introduziu o modelo SiSBahia com análise tridimensional barotrópica na investigação do papel dos ventos e da maré no escoamento. Santana et al. (2018) utilizaram o Regional Ocean Modelling System (ROMS) forçado com condições médias para avaliar a influência dos forçantes barotrópica e baroclínica no escoamento residual e tempo de descarga da BTS. Marta-Almeida (2019) e Aguiar et. Al (2019), a partir da implementação de uma 2ª versão do ROMS com grade aninhada a uma segunda malha do ROMS de menor resolução, e utilizando forçantes datadas do CFSR e HYCOM, avaliaram o escoamento da maré e processos de troca entre a BTS e plataforma.

Entretanto, em nenhuma das simulações acima, o processo de inundação e emersão das áreas intermareais (modo *wet-and-dry*) foi implementado. Todas as simulações também utilizaram forçantes de modelos globais, os quais, dada sua escala espacial, não enxergam o contorno da BTS e não podem representar as variabilidades espaciais existentes nos campos meteorológicos. Dessa forma, novas implementações e configurações se fazem necessárias a fim de obter uma melhor representação batimétrico dos contornos da baía e da variabilidade espaço temporal dos forçantes da circulação da BTS.

3. Objetivos

- Geral
 - Definir o conjunto de configurações de modelagem numérica que melhor representa a circulação hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos.
- Específicos
 - Quantificar os ganhos da implementação da configuração wet-and-dry comparado a uma simulação sem esta tecnologia;
 - Quantificar os ganhos do uso de um modelo local para forçamento atmosférico versus um modelo global.
 - Comparar a performance de dois modelos globais como forçamento das condições de contorno na BTS.

4. Metodologia

Os dados de campo utilizados para a validação das simulações compreendem 9 campanhas de perfilamento de CTD (Conductivity, Temperature and Depth) realizadas entre março e julho de 2014. Nessas campanhas foram coletados dados de temperatura e salinidade ao longo da coluna de água durante condições de preamar de sizígia. Além disso, foram coletados dados de direção e intensidade das correntes e nível do mar através dos 3 fundeios de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) que resultaram em 2 períodos de dados horários: 1 a 30 de novembro de 2014 e 1 a 30 de abril de 2015. As posições de coletas dos dados de CTD e a posição dos fundeios dos ADCPs estão evidenciadas na Figura 1.

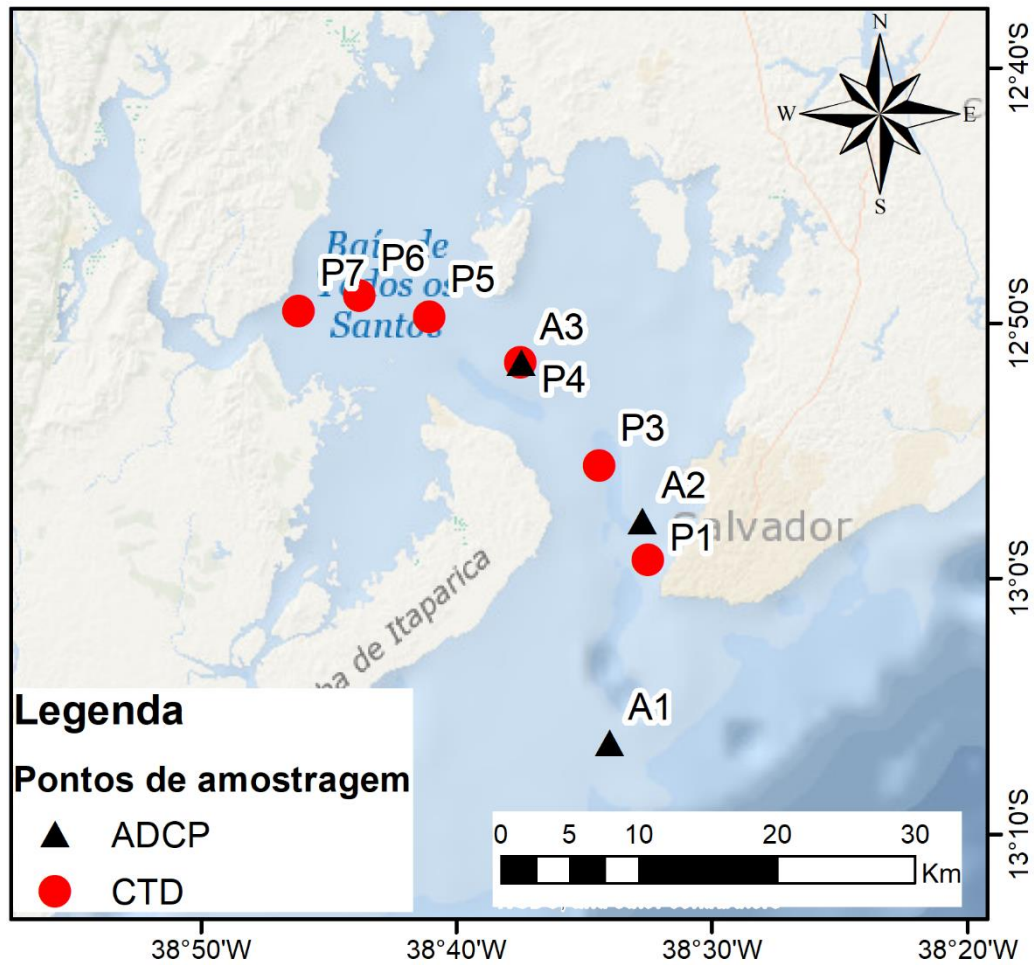


Figura 1: Mapa da região da BTS mostrando os pontos de coleta de dados de campo.

O modelo ROMS (Regional Ocean Modeling System) foi utilizado para configuração de 4 simulações distintas da BTS. Todas as simulações utilizaram a mesma malha, que possui resolução entre 60 e 200 metros, 30 camadas verticais e aninhamento em uma grade mãe de menor. A grade mãe cobre a região da BTS e plataforma adjacente e possui resolução entre 300 e 1200 metros. O conjunto de malhas utilizado nas 4 simulações é apresentado na Figura 2.

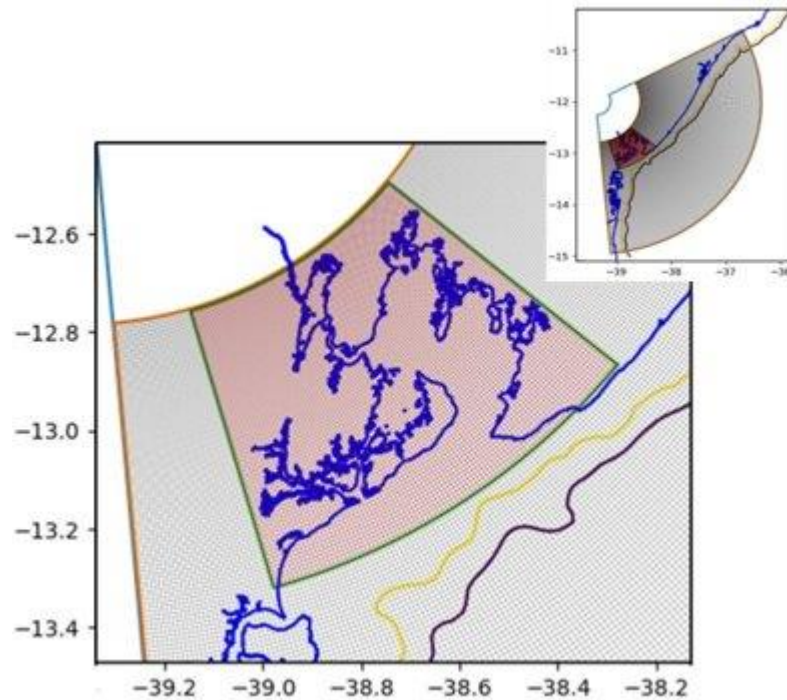


Figura 2: Malha computacional utilizada nas quatro simulações hidrodinâmicas.

O forçante de maré de todas as simulações foi extraído do modelo TPXO 8.0 (Egbert e Erofeeva, 2002) e aplicado como condição de contorno na grade mãe. Foram utilizados os 8 principais componentes harmônicos de maré (M2,S2,N2,O1,K1,M4,MSF e Q1) da região como forçamento. O referido modelo possui resolução espacial original de 1/12 graus, que foi interpolada dentro da grade mãe.

Os dados batimétricos utilizados nas simulações são provenientes de coletas de campo, digitalização de cartas náuticas e de interpolações do ETOPO (Amante e Eakins, 2009). Após diversos testes feitos para encontrar o melhor método de interpolação dos dados batimétricos, o *Linear Programming Smoothing*, descrito por Sikiric et al., (2009) foi o que rendeu os melhores resultados. A batimetria utilizada nas simulações é apresentada na Figura 3.

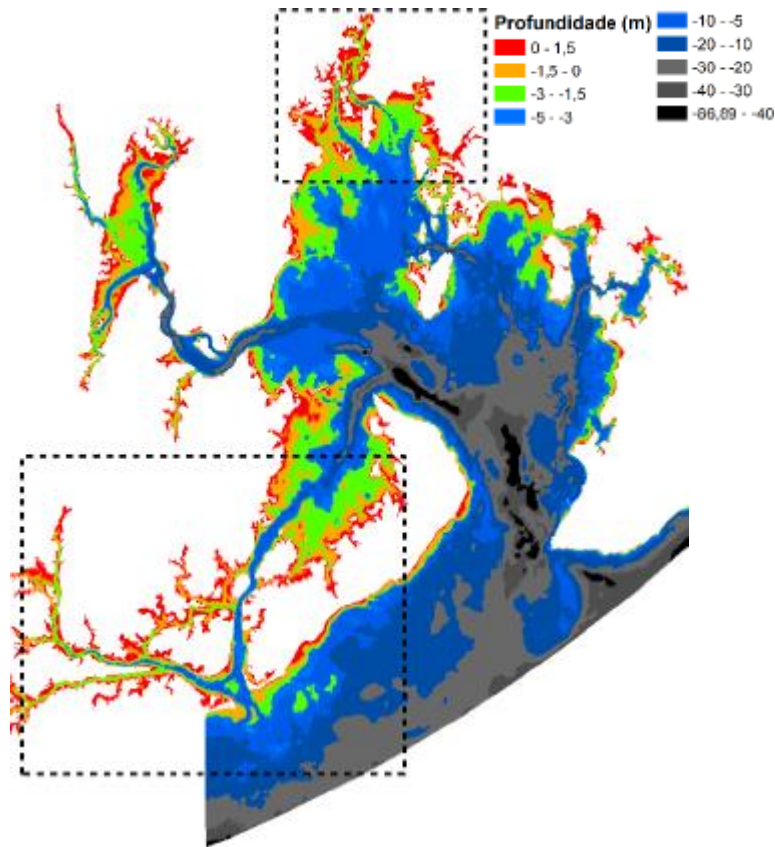


Figura 3: Batimetria da BTS interpolada e utilizada como base das simulações.

A vazão foi obtida a partir de dados da Agência Nacional de Águas. Foram utilizados dados de 42 rios dos quais 15 desaguam internamente na BTS. Nos principais rios, os dados de vazão foram obtidos a partir de medições pontuais enquanto que nos tributários menores foram feitas estimativas a partir da área de drenagem de cada rio.

A primeira simulação, chamada de NO_WD, não utilizou o sistema *wet and dry* o que tornou necessária a edição dos valores de batimetria iguais ou inferiores à 3m (baseado na amplitude máxima de maré da BTS) para 3 metros. Esse ajuste da batimetria, mudou a profundidade de cerca de 22% da área da simulação, mas se faz necessário porque simulações sem o sistema *wet and dry* não podem apresentar células que fiquem secas. Este é o mesmo tipo de simulação usada por Santana et al., (2018) e Marta-Almeida et al., (2019). Dados de ventos e fluxo de calor e água foram adicionados a esta simulação a partir do modelo CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) (Saha et al., 2010). O CFSR foi usado para o forçamento a cada 6 horas e possui resolução original de 0,3 x 0,3 graus que foi interpolada nas grades do modelo. A forçante oceânica foi extraída de dados diários de 2014 do modelo HYCOM/NCODA Hybrid Coordinate Data Assimilation (Navy Coupled Ocean Data Assimilation) e aplicada como condição de contorno na grade

mãe. O HYCOM/ NCODA possui resolução original de 1/12 graus e forneceu os dados de elevação, temperatura, salinidade e correntes baroclínicas para as simulações. A climatologia de relaxamento das simulações também foi feita com base nos dados diários do modelo HYCOM/ NCODA.

A segunda simulação, chamada WD-CFSR-HY, adotou as mesmas configurações da simulação NO_WD, diferindo desta apenas no uso da configuração *wet and dry* (Warner et al., 2013), isso permitiu que fosse usada a batimetria real nas regiões entre marés. A configuração *wet and dry* permite que o usuário adicione uma profundidade crítica que indica quais células da simulação podem ficar ora inundadas e ora secas, fazendo com que essa configuração seja útil em regiões com marés (Hedstrom, 1994). No presente caso a profundidade crítica foi configurada para 10 cm. Está simulação também é forçada em superfície pelo modelo CFSR e usa o modelo HYCOM/ NCODA como condições de contorno e climatologia.

A terceira simulação, chamada WD-WRF-HY, difere da simulação WD-CFSR-HY ao usar dados de vento e fluxo de calor da implementação local do modelo WRF (Weather Research and Forecasting). Nesta simulação o modelo HYCOM/ NCODA é usado como condições de contorno.

Por sua vez, a quarta simulação, chamada WD-WRF-MR, difere da anterior ao usar valores diários de reanálise do modelo Glorys-GLORYS/Mercator (Drevillon et al., 2008) como fonte das condições de contorno. A Tabela 1 resume as principais diferenças entre as quatro simulações utilizadas.

Tabela 1: Resumo das diferenças de configuração entre as quatro simulações.

Configurações	Simulações			
	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR
Resolução (m)	60-200			
Camadas σ	20			
Batimetria	ETOPO* + Cartas náuticas e coletas de campo			
Maré	TPXO 8.0**			
Vazão	Agência Nacional de Águas (ANA)			
Forçante superficial	Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)		Weather Research and Forecast (WRF)	
Forçante oceânica	HYCOM/NCODA ***		Glorys/GLORYS/Mercator****	
Wet and Dry	Não	Sim	Sim	Sim

O modelo WRF foi implementado com três grades aninhadas com resoluções de 16,7 Km, 5,5 Km e 1,1 Km. Foram utilizados 36 níveis verticais em todas as 3 malhas e mapas de uso de solo atualizados a fim de melhor capturar as condições atmosféricas da região. As saídas do modelo WRF foram comparadas a dados meteorológicos locais e o modelo foi calibrado e reconfigurado até atingir valores confiáveis.

Para as simulações forçadas pelo modelo WRF o campo de precipitação é proveniente dos dados de satélite compilados pelo Global Precipitation Measurement Mission (GPM), haja vista o modelo WRF não ter conseguido reproduzir de forma satisfatória a precipitação dentro da BTS. O GPM fornece dados de precipitação a cada 30 minutos com uma resolução espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (aproximadamente 10km x 10km). Estes dados foram interpolados para a grade do WRF e para uma resolução temporal de 3 horas.

Em todas as simulações o forçamento em superfície foi feito através da parametrização usando “bulk formulation” com base em dados de vento, temperatura do ar, pressão atmosférica, precipitação, humidade relativa, radiação de onda curta e radiação de onda longa. As simulações acima foram implementadas no contexto do projeto Coral Sol pelos grupos de modelagem numérica da UFBA e da UFC. Além disso todas as simulações foram configuradas seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Resumo das configurações gerais das simulações utilizadas.

Configuração	Valor
No. de Níveis Verticais	30
Mistura Vertical	GLS - k-kl
Atrito de Fundo	Logarítmico
Advecção Horizontal	Third-order upstream
Advecção Vertical	Fourth-order centered
Condições de Contorno Nível	Chapman
Condições de Contorno Velocidades	Flatter

Com o intuito de avaliar a performance das simulações em relação aos dados observados, foram utilizados os cálculos de viés médio (Equação 1), erro médio quadrado (RMSE, Equação 2) e índice de espalhamento (SI, Equação 3) entre os dados medidos e os dados observados. O viés é a diferença entre os dados modelados e observados e é uma

ferramenta usada para avaliar a acurácia das simulações. O RMSE e o Scatter Index são coeficientes que quantificam o espalhamento dos dados modelados em relação aos valores reais sendo então indicadores da precisão das simulações.

$$B = E(H) - \theta \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde B é o viés, E(H) é o dado modelado e θ é o dado observado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde \hat{y}_i é o dado modelado, y_i é o dado observado e n é o número de amostras.

$$SI = \frac{RMSE}{\theta} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde θ é o dado observado.

5. Resultados

5.1 Resultados – Campo termo-halino

Os resultados dos cálculos supracitados sobre os dados de temperatura, salinidade e densidade bem como os perfis verticais ilustrando os valores observados e os calculados nas simulações estão evidenciados nas Figuras 4 a 9. Para melhor visualização e organização do documento, as Figuras referidas apresentam os cálculos para apenas três das cinco campanhas de coleta de dados, sendo o restante das Figuras apresentado no Apêndice A. As Figuras 4 a 6 apresentam os perfis de salinidade obtidos pelo CTD e nas quatro simulações nas campanhas de março, maio e julho de 2014. O eixo x determina a distância em relação ao ponto P1 localizado na entrada da BTS (Figura 4).

Na campanha de março (Figura 4) de 2014, todas as simulações representaram bem o gradiente longitudinal de salinidade no transecto, apesar de que é possível observar que a simulação WD-WRF-MR superestimou os valores de salinidade em grande parte do transecto. Na campanha de abril, apresentada na Figura A.1 do apêndice A, a simulação WD-WRF-HY foi a que melhor representou o gradiente e a estratificação de salinidade enquanto que a simulação WD-CFSR-HY (WD-WRF-MR) subestimou (superestimou) a salinidade na porção próxima ao oceano e a simulação NO_WD subestimou a salinidade próximo ao Rio Paraguaçu.

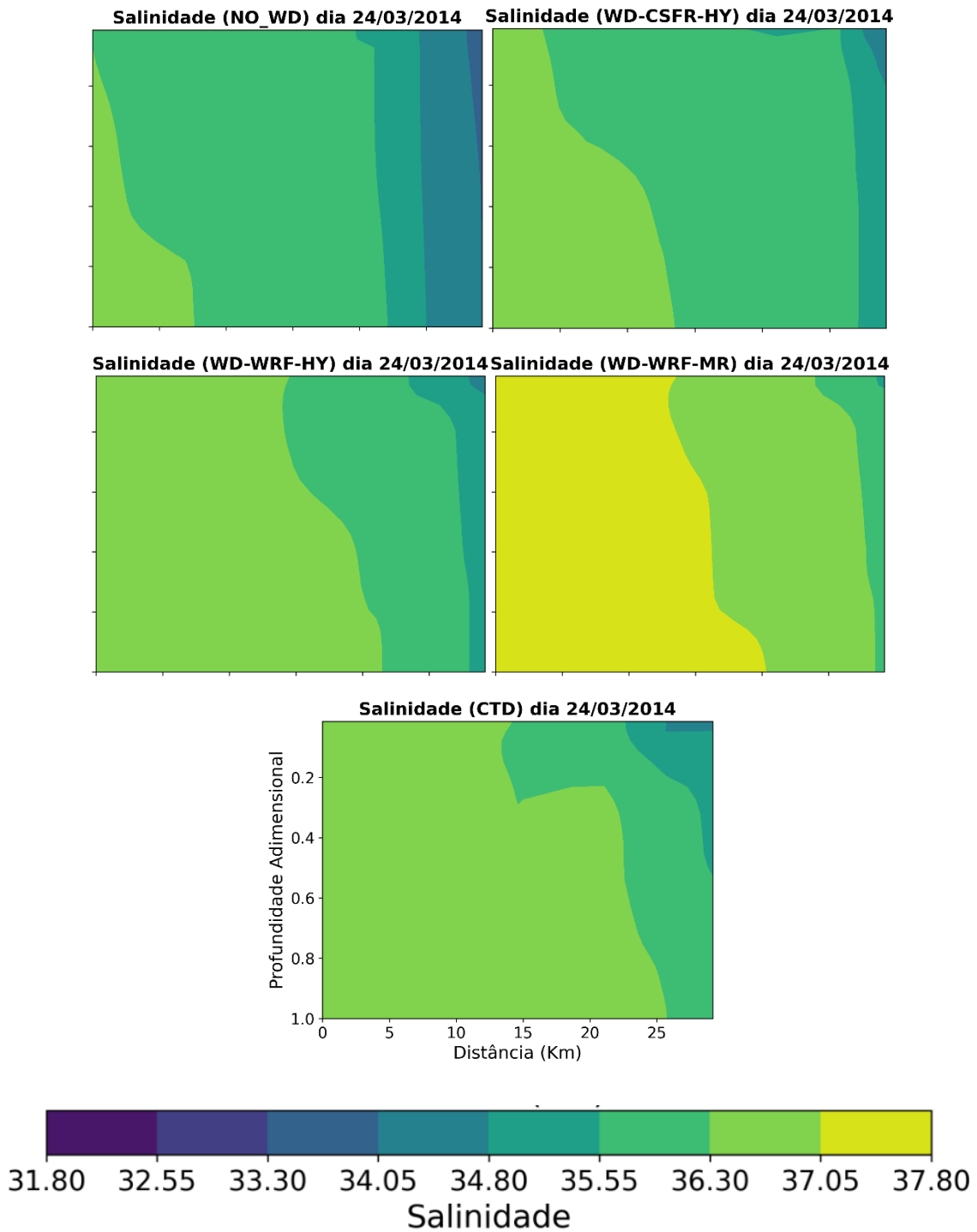


Figura 4: Perfis de salinidade na campanha do mês de março de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CSFR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.

Na campanha de maio de 2014 (Figura 5), a estratificação vertical de salinidade dos dados observados foi baixa e os valores observados ficaram entre 35 e 37. A simulação NO_WD apresentou variação horizontal de salinidade muito alta em relação aos dados observados e a simulação WD-WRF-MR novamente superestimou os valores de salinidade por todo o transecto. Na campanha de junho, apresentada na Figura A.2 do apêndice A, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY tiveram as melhores performances enquanto a simulação WD-WRF-MR voltou a superestimar a salinidade do transecto.

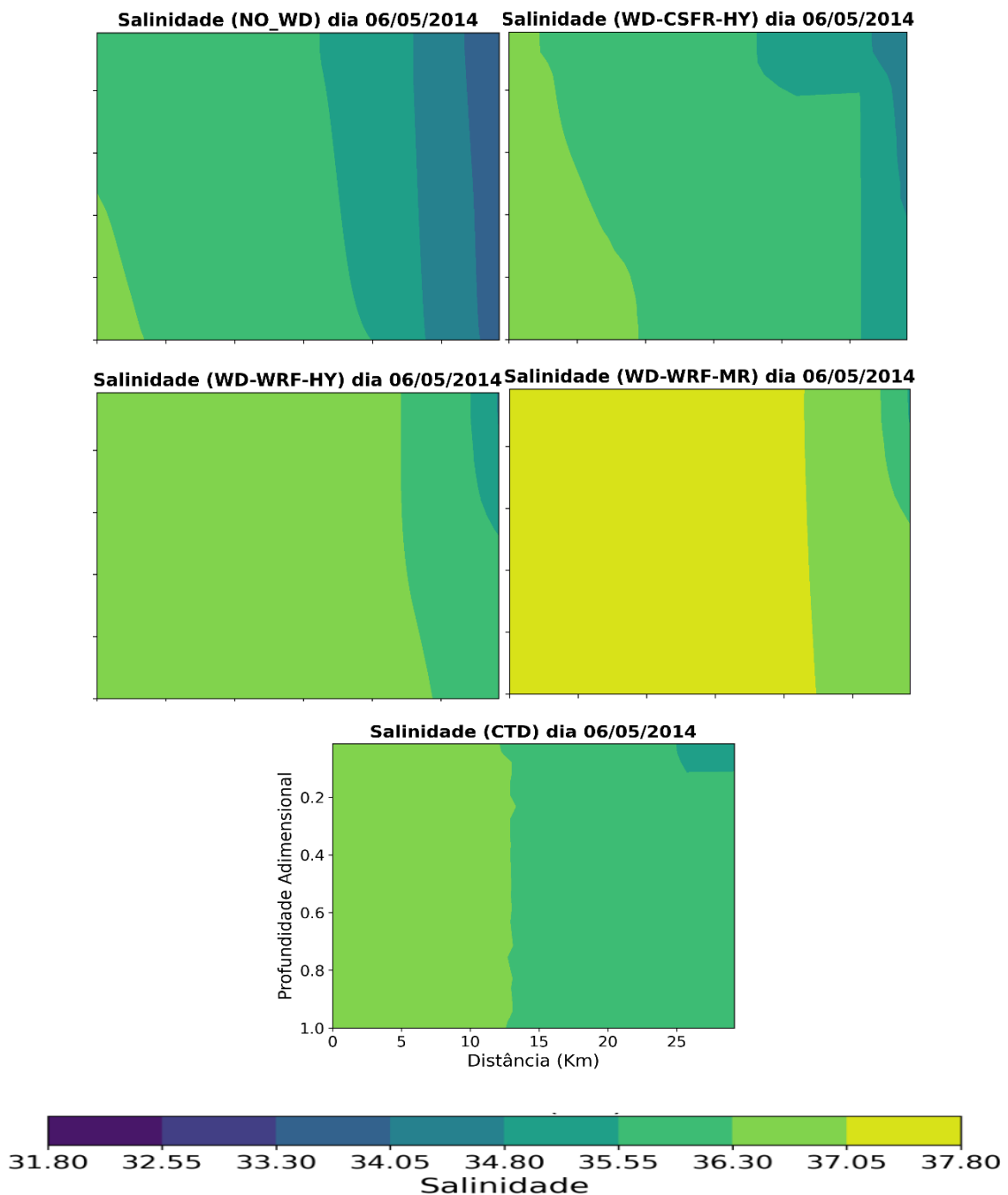


Figura 5: O mesmo da Figura 4, mas para a campanha do mês de maio de 2014.

Na campanha de julho de 2014 (Figura 6), todas as simulações representaram a estratificação de salinidade e o gradiente horizontal, de forma semelhante entre si, com o destaque negativo sendo a repetição da superestimação de salinidade na simulação WD-WRF-MR.

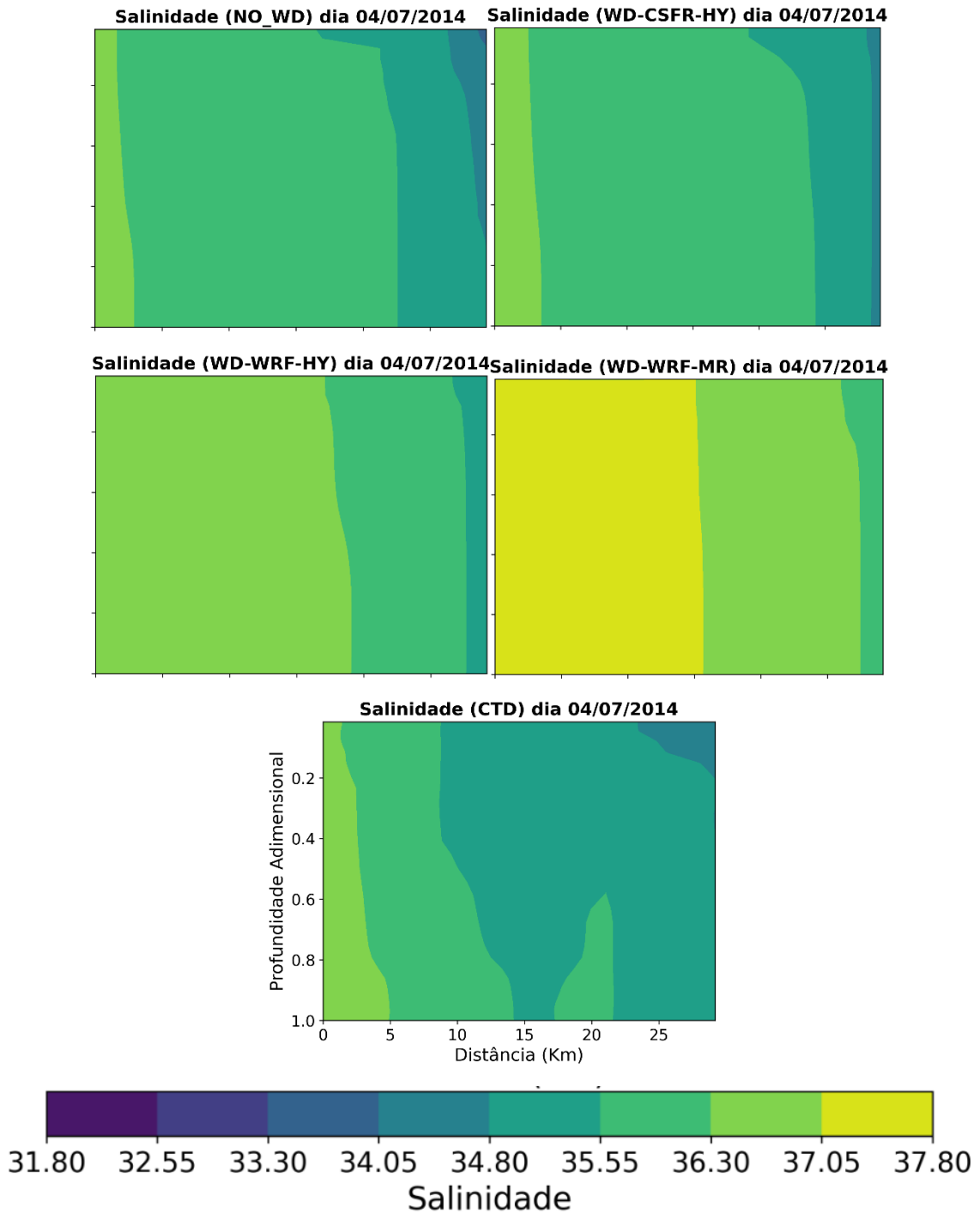


Figura 6: O mesmo da Figura 4, mas para a campanha do mês de julho.

A Figura 7 apresenta o cálculo do viés médio dos dados modelados em relação aos dados observados de salinidade, os valores em vermelho (azul) indicam regiões onde a simulação subestimou (superestimou) os valores de salinidade.

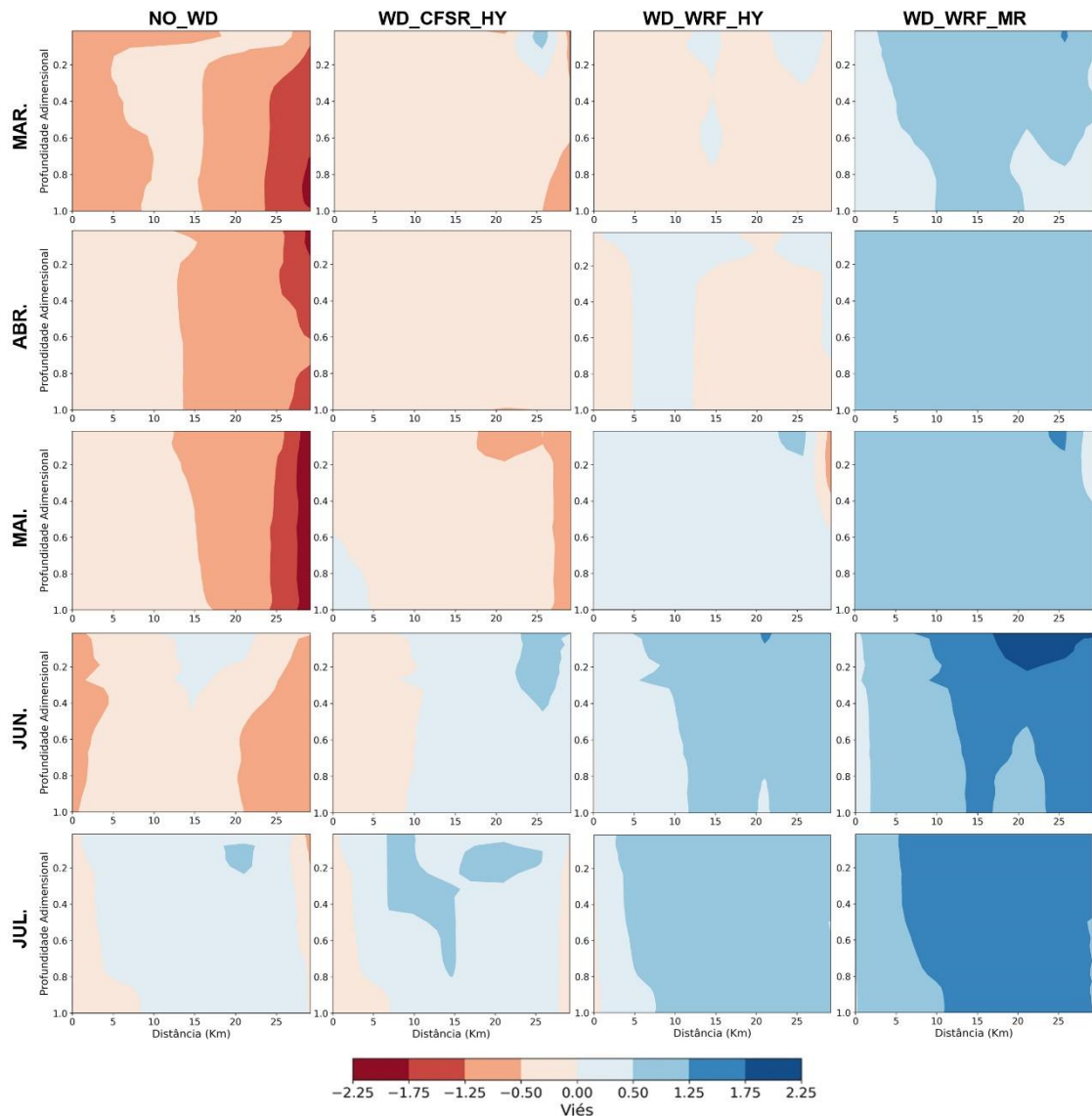


Figura 7: Viés médio para salinidade ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.

A simulação WD-WRF-HY apresentou viés para salinidade menor que $|0,5|$ em todo o transecto de março, caracterizando-se assim como a melhor performance para os dados de salinidade na campanha desse mês. Por sua vez, a simulação NO_WD apresentou viés entre -1,25 e -2,25 na porção à montante do transecto subestimando as salinidades e a simulação WD-WRF-MR apresentou viés positivo entre 0 e 1,25 em todo

o transecto superestimando os valores observados. Na campanha de abril as tendências observadas na Figura 7 se repetiram, com leve aumento do viés da simulação NO_WD.

Os resultados de viés da campanha de maio de 2014 se assemelham aos da campanha de março, com a simulação WD-WRF-HY apresentando viés menor que 0,5, simulação NO_WD com viés negativo muito alto na porção mais próxima a entrada da BTS e a simulação WD-WRF-MR com viés positivo em todo o transecto. Assim como na campanha de março, a simulação WD-CFSR-HY apresentou viés entre 0,5 e -1,25 em todo o transecto. Na campanha de maio o maior módulo de viés ficou por conta da simulação WD-WRF-MR, que ultrapassou 1,75 na superfície próximo ao Rio Paraguaçu.

Na campanha de julho, as simulações NO_WD, WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY apresentaram viés entre -0,5 e 1,25 em todo o transecto. Por sua vez, a simulação WD-WRF-MR apresentou os maiores valores de viés, ficando entre 1,25 e 1,75 em grande parte do transecto. Nesta campanha os menores valores de viés foram observados na simulação WD-CFSR-HY.

Na Figura 8 foram apresentados os valores de SI para as quatro simulações em relação aos dados observados de salinidade. As regiões representadas com cores escuras (claras) são as regiões com menor (maior) SI o que indica menor (maior) erro em relação aos dados observados.

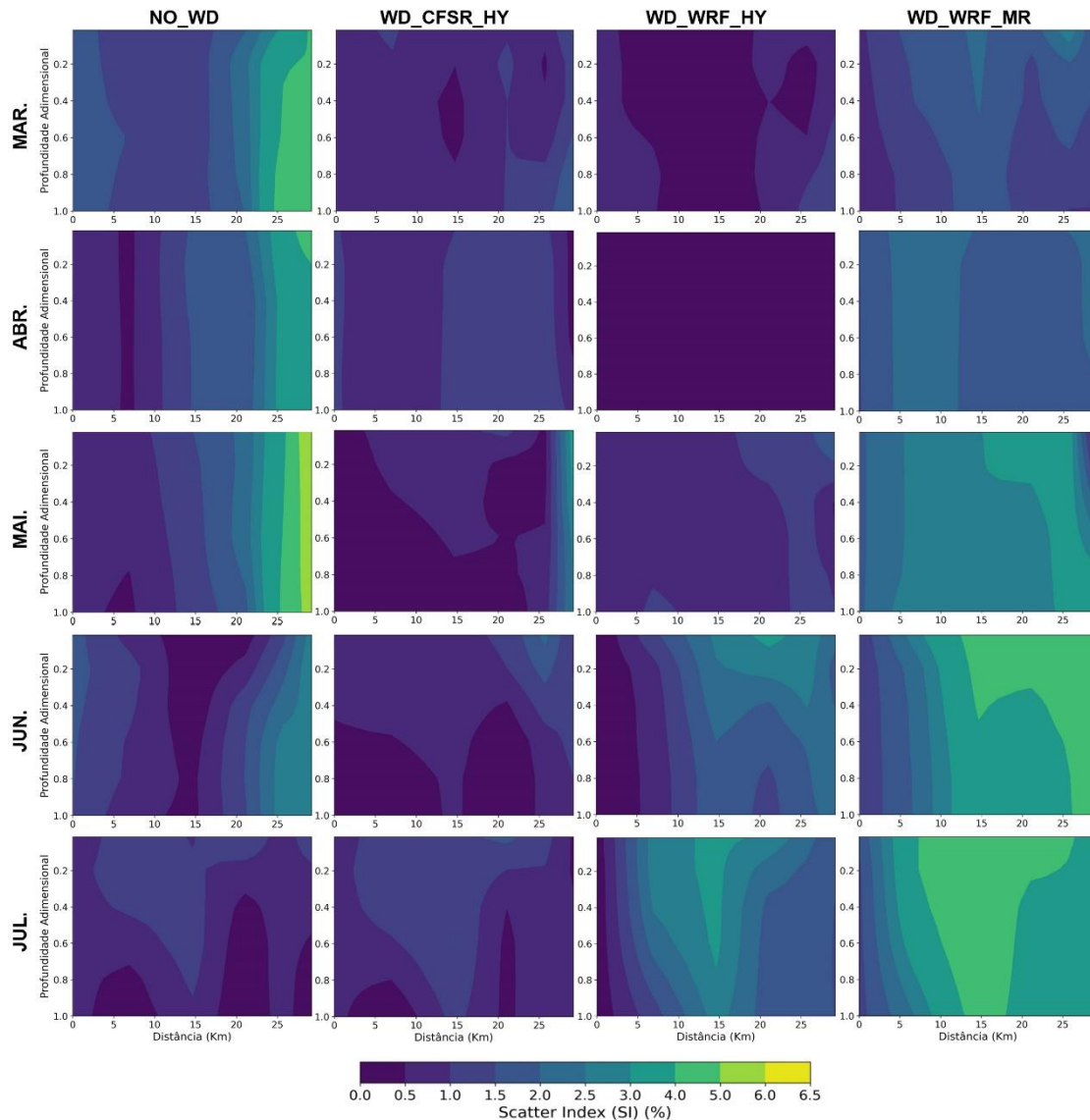


Figura 8: Índice de espalhamento para salinidade ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.

Os resultados de SI reforçam a boa performance da simulação WD-WRF-HY para os dados de salinidade na campanha de março, visto que o espalhamento calculado nessa simulação foi entre 0 e 1,5% em todo o transecto. Os resultados da simulação WD-CFSR-HY oscilaram entre 0 e 2% no transecto, sendo assim a segunda melhor performance nessa campanha. A simulação WD-WRF-MR oscilou entre 0,5 e 3%, sendo melhor apenas em relação à simulação NO_WD, que apresentou espalhamento entre 1 e 5%. Na campanha de abril a simulação WD-WRF-HY apresentou o melhor espalhamento entre todos os dados de salinidade, ficando abaixo de 0,5% em todo o transecto.

Para a campanha de maio de 2014, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY tiveram performances próximas, com a primeira (última) tendo melhor performance na porção de maior (menor) salinidade da BTS. A simulação WD-WRF-MR oscilou entre 0 e 4% de espalhamento, sendo novamente superior à simulação NO_WD que apresentou espalhamento entre 0 e 6%. Na campanha de junho, todas as simulações oscilaram entre 0 e 3% de espalhamento exceto a simulação WD-WRF-MR, que foi a única a apresentar espalhamento maior que 4%.

Na campanha de julho, o SI para as simulações NO_WD e WD-CFSR-HY obtiveram as melhores performances em relação ao espalhamento dos dados de salinidade, com ambas oscilando entre 0 e 1,5%. A simulação WD-WRF-HY oscilou entre 0 e 4% enquanto a simulação WD-WRF-MR apresentou a pior performance variando entre 1 e 5%,

Em seguida os dados foram analisados a partir dos pontos de amostragem P1 a P7. Através das comparações dos perfis verticais fica mais evidente a performance de cada simulação na representação da estratificação observada. A Figura 9 apresenta as diferenças médias entre a salinidade modelada e a salinidade observada em cada um dos 6 pontos de amostragem.

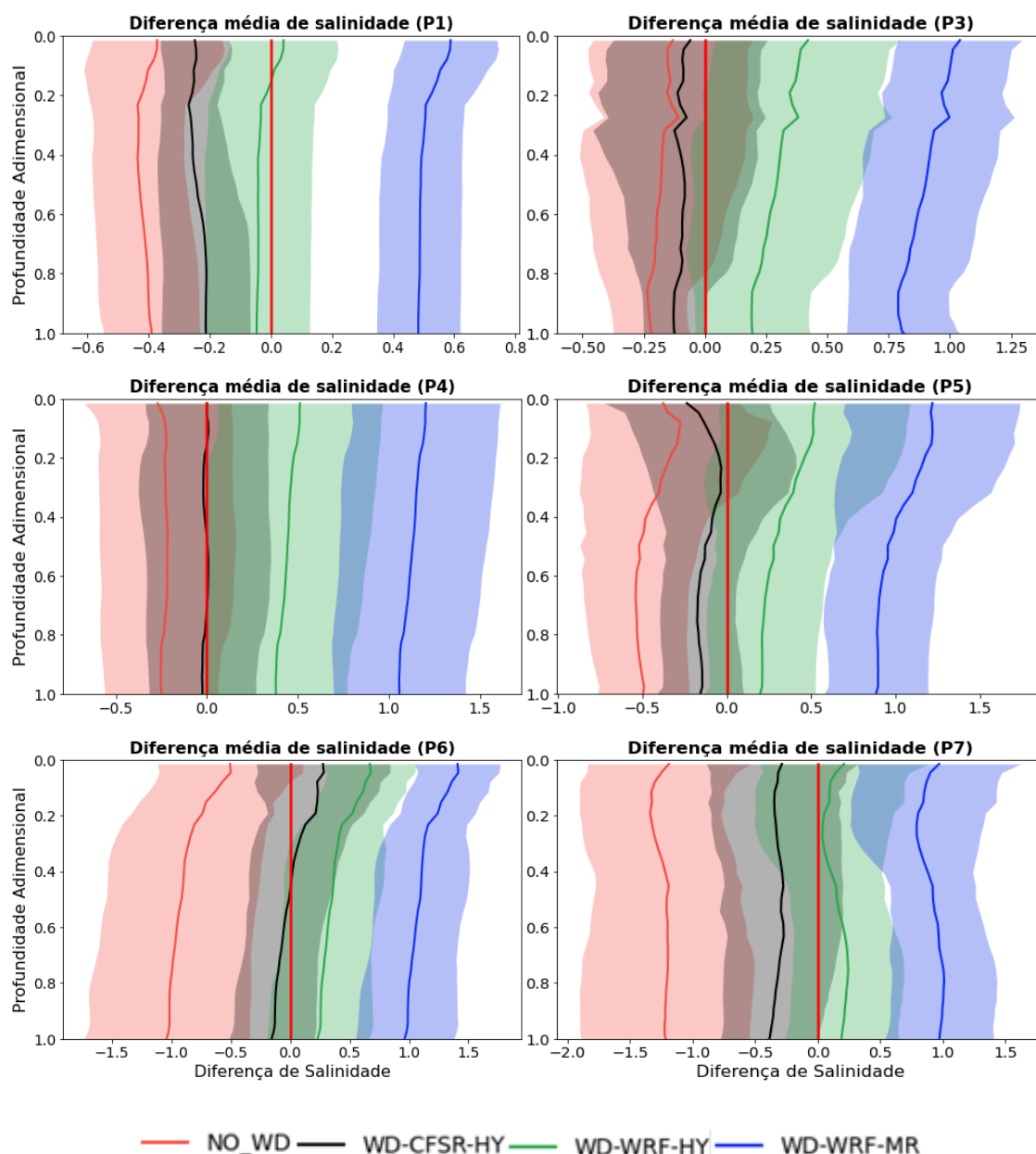


Figura 9: Gráficos comparativos da diferença média de salinidade entre as quatro simulações e os dados de CTD nos seis pontos de amostragem. As regiões sombreadas indicam o desvio padrão e a linha sólida em vermelho vivo indica $\Delta=0$.

Na Figura 9 fica evidente que a simulação WD-WRF-MR superestimou os dados de salinidade em todos os pontos de amostragem enquanto a simulação NO_WD subestimou a salinidade em todos os pontos. Dessa forma, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY foram as que mais se aproximaram dos dados de CTD.

Para agregar à análise estatística e a comparação por pontos de amostragem, o RMSE médio da coluna d'água de cada simulação separado por ponto e campanha foi calculado e está apresentado na Tabela 3. Com o objetivo de dinamizar a leitura da

referida tabela, uma legenda identificando os melhores valores de cada ponto, campanha e ponto em determinada campanha também foi disponibilizada.

Tabela 3: Valores médios de RMSE da coluna de água entre os dados de salinidade observados e calculados em cada simulação separando por ponto e campanha.

		Março	Abril	Maió	Junho	Julho
P1	NO_WD	0,628	0,331	0,260	0,584	0,250
	WD-CFSR-HY	0,315	0,382	0,082	0,217	0,232
	WD-WRF-HY	<u>0,245</u>	<u>0,159</u>	0,258	0,006	0,085
	WD-WRF-MR	0,309	0,564	0,697	0,411	0,544
P3	NO_WD	0,505	0,154	0,225	0,309	<u>0,321</u>
	WD-CFSR-HY	0,342	0,193	<u>0,167</u>	<u>0,173</u>	0,373
	WD-WRF-HY	<u>0,149</u>	0,078	0,345	0,358	0,790
	WD-WRF-MR	0,531	0,864	0,995	0,858	1,213
P4	NO_WD	0,445	0,564	0,488	<u>0,103</u>	<u>0,367</u>
	WD-CFSR-HY	0,191	0,351	<u>0,236</u>	0,265	0,478
	WD-WRF-HY	0,023	0,052	0,327	0,794	1,061
	WD-WRF-MR	0,702	0,694	1,084	1,451	1,663
P5	NO_WD	0,744	0,650	0,748	0,421	<u>0,272</u>
	WD-CFSR-HY	0,376	0,460	<u>0,318</u>	<u>0,198</u>	0,326
	WD-WRF-HY	<u>0,214</u>	0,077	0,328	0,807	0,773
	WD-WRF-MR	0,532	0,641	1,043	1,412	1,416
P6	NO_WD	1,410	1,213	1,416	0,810	<u>0,264</u>
	WD-CFSR-HY	0,415	0,450	<u>0,267</u>	<u>0,509</u>	0,369
	WD-WRF-HY	<u>0,318</u>	0,106	0,467	0,845	0,723
	WD-WRF-MR	0,735	0,679	1,186	1,554	1,422
P7	NO_WD	1,577	1,459	2,018	0,940	0,321
	WD-CFSR-HY	0,596	0,198	1,042	<u>0,333</u>	<u>0,181</u>
	WD-WRF-HY	<u>0,390</u>	0,086	<u>0,474</u>	0,793	0,534
	WD-WRF-MR	0,458	0,737	0,846	1,518	1,267

Legenda

0,0000	Melhor valor do ponto
0,0000	Melhor valor da campanha
<u>0,0000</u>	Melhor valor do ponto na campanha

A partir dos resultados apresentados até aqui, bem como os apresentados no Apêndice A, é possível afirmar que as simulações WD-WRF-HY e WD-CFSR-HY tiveram performance mais satisfatória em comparação com as outras duas simulações em relação aos dados de salinidade. A simulação NO_WD apresentou os maiores valores de

RMSE, viés e SI principalmente próximo ao ponto P7, indicando que o setup sem o sistema *wet and dry* não é recomendado para representar a porção próxima ao Rio Paraguaçu, o que também impactou a qualidade dos dados estuário abaixo.

Por sua vez, a simulação WD-WRF-MR apresentou superestimação de salinidade durante todo o período de análise, com erro mais pronunciado nas campanhas de junho e julho, o que indica que o modelo HYCOM gerou dados de salinidade mais confiáveis que os gerados pelo modelo GLORYS/Mercator como condição de contorno. Quanto ao uso dos modelos WRF e CFSR, foi possível observar uma ligeira vantagem no uso do modelo local WRF visto que a performance da simulação WD-WRF-HY foi ligeiramente melhor que a da simulação WD-CFSR-HY forçado pelo modelo global CFSR, sendo a primeira melhor nos 3 primeiros meses e a última melhor nos 2 últimos meses.

Os mesmos tratamentos e divisões usados nos dados de salinidade foram aplicados nos dados de temperatura. Nas Figuras 10 a 12 são mostradas as seções verticais de temperatura das simulações e observadas pelo CTD nas campanhas de março, maio e julho de 2014, sendo as campanhas restantes, a exemplo do que foi feito com as figuras de salinidade, expostas no Apêndice A.

Na campanha de março, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR capturaram o gradiente horizontal de temperatura de forma semelhante entre si e melhor que as outras simulações em comparação aos dados de CTD. As diferenças observadas para estas duas simulações também são menores que as simulações NO-WD e WD-CFSR-HY. Na campanha de maio (Figura A.3), as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR foram as que mais se aproximaram dos dados observados.

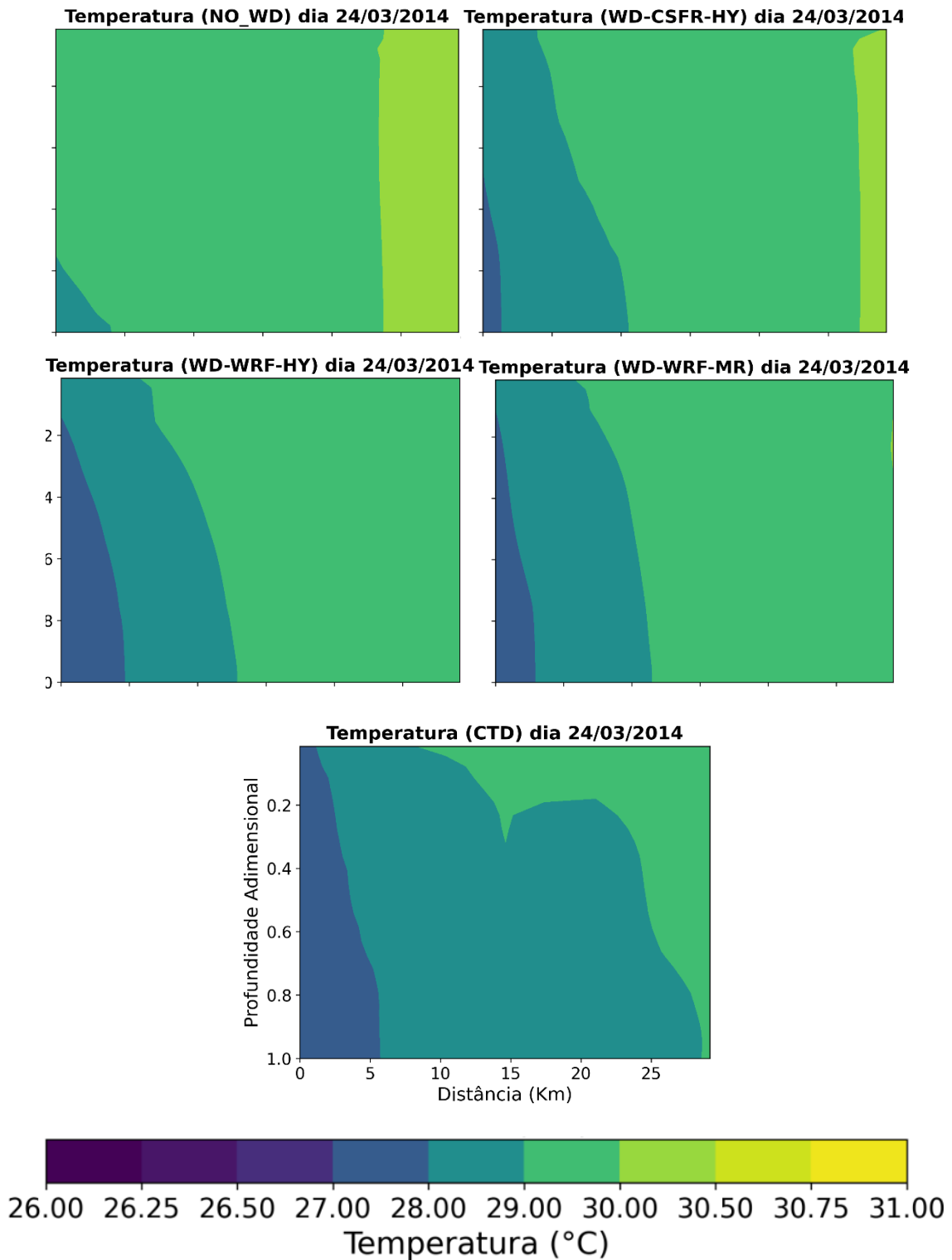


Figura 10: Perfis de temperatura na campanha do mês de março de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CSFR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.

Na campanha de maio de 2014 (Figura 11), a estratificação vertical e os gradientes horizontais de temperatura foram muito pequenos e, com todos os valores do CTD ficando entre 27 e 28°C. As simulações NO_WD e WD-CFSR-HY representaram bem a uniformidade da temperatura do transecto, mas superestimaram todos os valores de temperatura dessa campanha. Por outro lado, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR representaram bem a temperatura na porção mais afastada do oceano, mas superestimaram no restante do transecto. Na campanha de junho (Figura A.4), o padrão de performance das campanhas anteriores se repetiu e as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR seguiram sendo as de melhor performance, ainda que todas as simulações tenham superestimado a temperatura em todo o transecto.

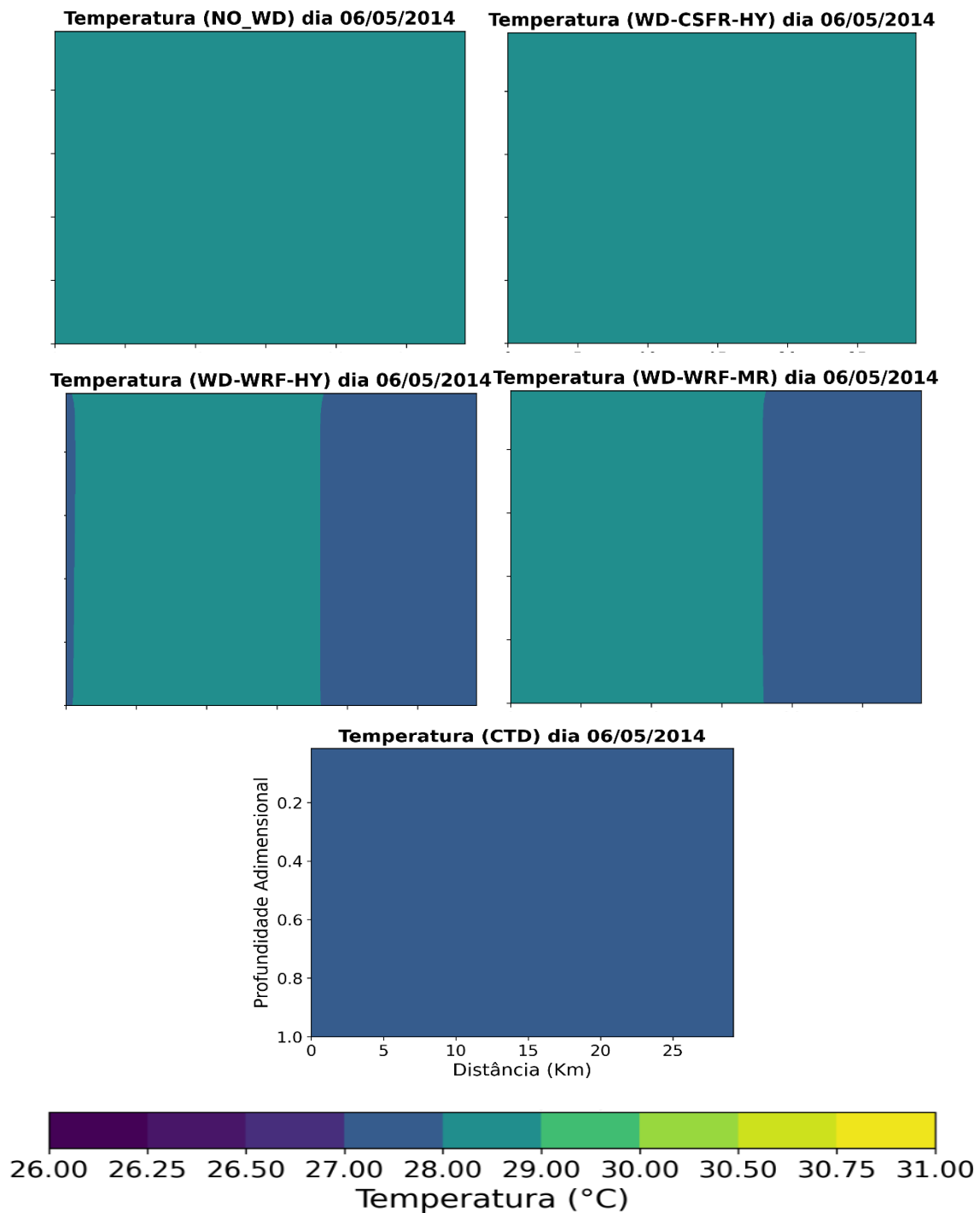


Figura 11: O mesmo da Figura 10, mas para a campanha do mês de maio.

Na campanha de julho de 2017 (Figura 12), as temperaturas registradas pelo CTD variaram entre 26 e 26,5°C. As simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR tiveram performances semelhantes, com resultados entre 26 e 26,5°C a ~10Km do início do transecto e valores entre 26,5 e 27°C nos primeiros 10Km. Por sua vez, as simulações NO_WD e WD-CSFR-HY registraram dados entre 27 e 29°C em todo o transecto, ficando fora do intervalo dos dados observados.

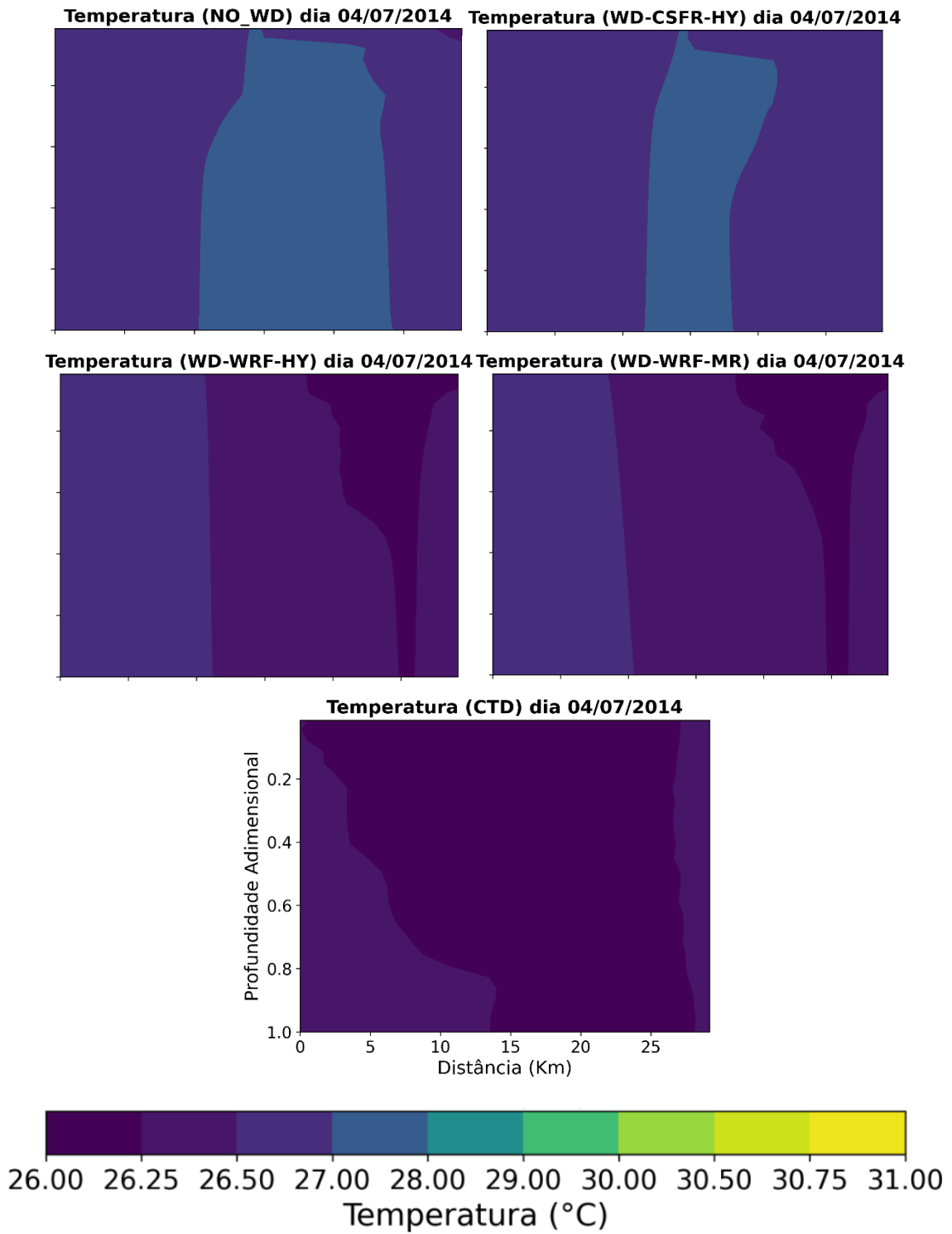


Figura 12: O mesmo da Figura 10, mas para a campanha do mês de julho.

Seguindo o padrão utilizado na Figura 7, a Figura 13 apresenta os gráficos de viés, em graus célsius, para temperatura das quatro simulações nas três campanhas supracitadas.

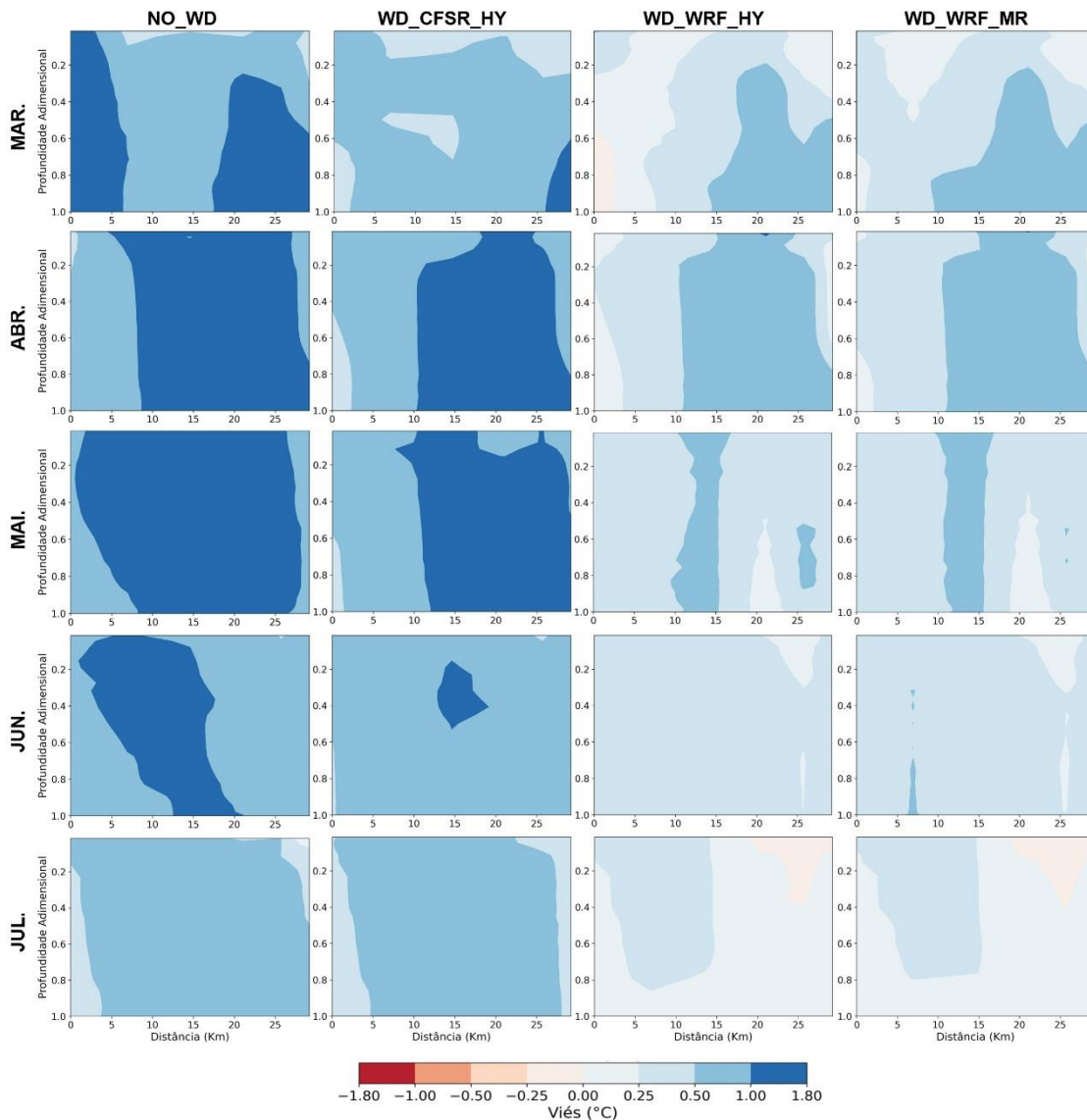


Figura 13: Viés médio sobre a temperatura ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.

Na campanha de março de 2014, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR tiveram padrões de viés semelhante entre si e ambas renderam resultados melhores que as outras duas simulações, ficando abaixo de 1°C de viés em todo o transecto. Por outro lado, as simulações NO_WD e WD-CFSR-HY apresentaram problemas na representação das porções limítrofes do transecto, apresentando viés entre 0,25 e 1,8°C nessas regiões. Na campanha de abril, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR foram as únicas a

apresentar viés menor que 1°C. As simulações NO_WD e WD-CFSR-HY apresentaram viés entre 1 e 1,8°C na porção intermediária do transecto.

Na campanha de maio, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR voltaram a apresentar valores de viés parecidos entre si e melhores que os das outras duas simulações. A simulação NO_WD foi a de pior performance, apresentando uma zona de ~20Km de extensão com viés entre 1 e 1,8°C. Na campanha de junho, o viés das simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR permaneceu abaixo de 1°C enquanto que as outras duas simulações apresentaram viés maior que 0,5°C durante todo o transecto.

A campanha de julho foi a de melhor performance das quatro simulações em relação ao viés de temperatura, sendo que o viés de todas simulações ficaram em um intervalo de -0,25 a 1°C. A exemplo das outras campanhas apresentadas, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR apresentaram os melhores intervalos de viés, ficando entre -0,25 e 0,5°C por todo o transecto.

A Figura 14 apresenta os gráficos de SI para temperatura nas quatro simulações. Assim como na Figura 13, é possível observar a melhor performance das simulações WRF em relação às simulações CFSR.

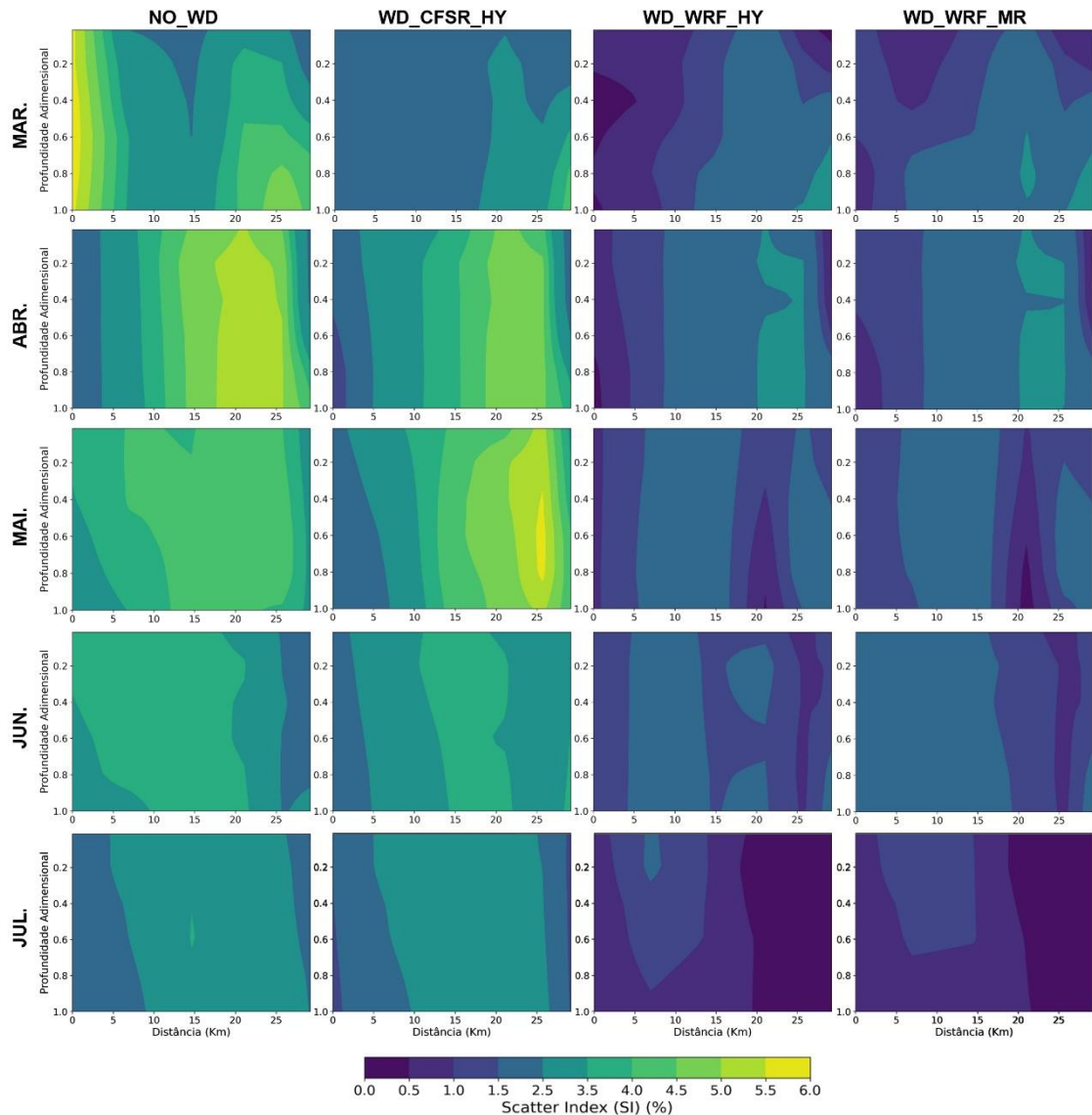


Figura 14: Índice de espalhamento para temperatura ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.

Na campanha de março, é possível observar a pior performance da simulação NO_WD principalmente na porção mais próxima do oceano, onde o espalhamento chegou perto dos 6%. Na campanha de abril todas as quatro simulações apresentaram maior espalhamento na região entre 20 e 25 Km do eixo x, que corresponde a região do ponto P5.

Na campanha de maio de 2014, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR tiveram espalhamento muito próximo, com a última tendo uma ligeira vantagem sobre a primeira. Por sua vez, as outras duas simulações apresentaram espalhamento elevado na porção intermediária do transecto, com espalhamento entre 4 e 6%. Na campanha de

junho, os padrões de performance da campanha de maio se repetiram, sendo a principal diferença uma ligeira vantagem da simulação WD-WRF-HY sobre a simulação WD-WRF-MR.

Assim como a campanha de maio, o índice de espalhamento para campanha de julho também possui melhores resultados para as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR, sendo a principal diferença a redução do espalhamento das simulações NO_WD e WD-CFSR-HY, que agora oscilaram entre 2,5 e 4,5% e 1,5 e 4% respectivamente.

Os resultados apresentados nas figuras 13 e 14 ilustraram não só a superioridade das simulações forçadas pelo modelo local WRF sobre os modelos globais CFSR na representação da temperatura no transecto como também evidenciaram que a condição de contorno não influencia muito os dados de temperatura das simulações, de forma que os resultados das simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR tiveram performances muito semelhantes entre si. Fora isso fica claro a melhor performance dos modelos usando *wet-and-dry*. A Figura 15 mostram como as quatro simulações se comparam com os dados observados de temperatura nos 6 pontos de amostragem.

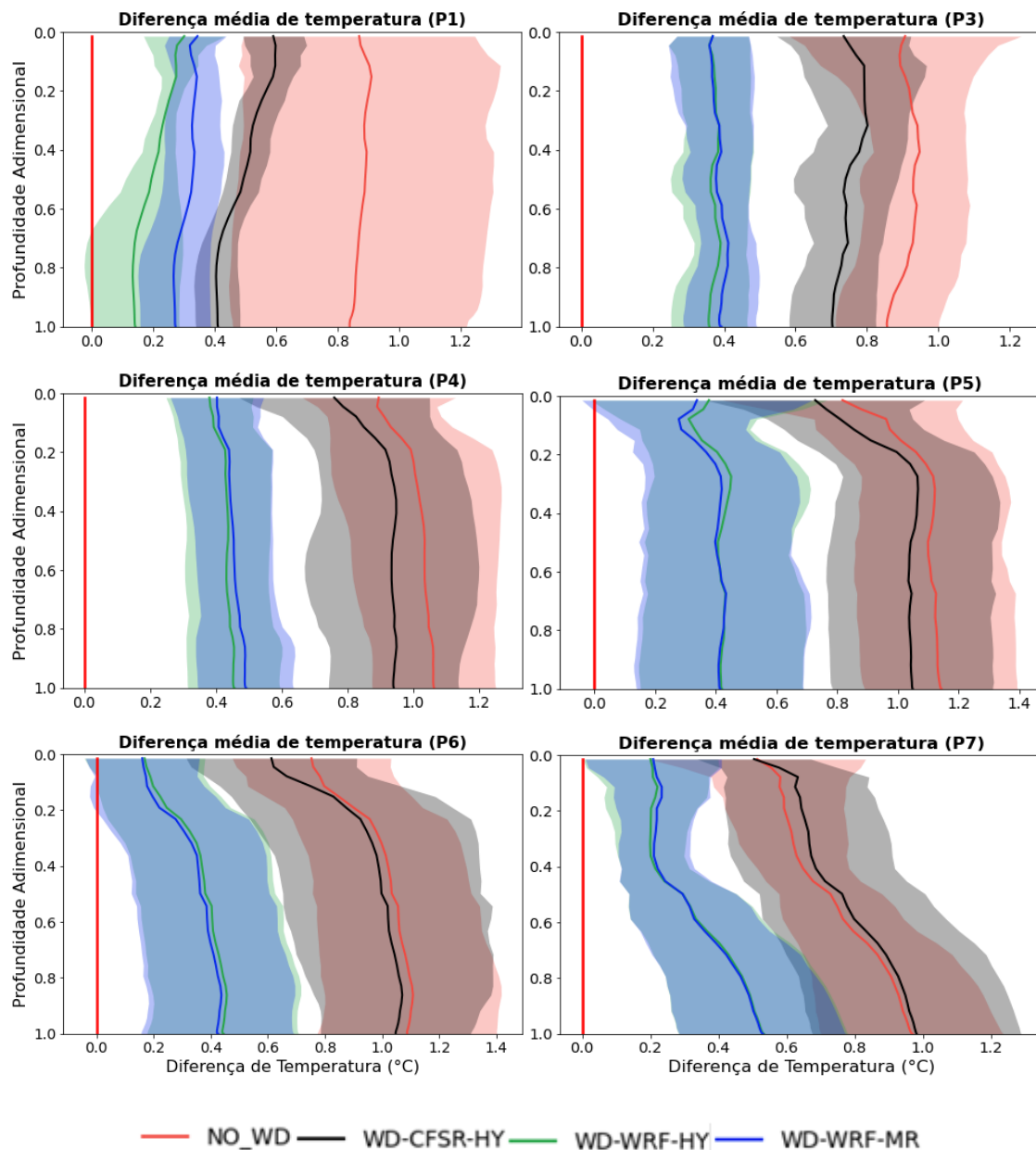


Figura 15: Gráficos comparativos da diferença média de temperatura entre as quatro simulações e os dados de CTD nos seis pontos de amostragem. As regiões sombreadas indicam o desvio padrão e a linha sólida em vermelho vivo indica $\Delta=0$.

Em todos os gráficos comparativos, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR foram as que mais se aproximaram dos dados de CTD, sendo difícil identificar qual das duas foi a de melhor performance uma vez que ambas apresentaram curvas semelhantes entre si nos seis pontos de amostragem. Por sua vez, a simulação WD-CFSR-HY se aproximou mais da temperatura observada em comparação com a simulação NO_WD, indicando ganho de performance ao implementar o sistema *wet-and-dry*.

Ao encontro do que foi evidenciado nas figuras 13 a 15, a Tabela 4 apresenta os valores de RMSE médios verticais entre as temperaturas simulada e as observações em cada ponto e campanha, permitindo evidenciar e quantificar a qualidade das performances de cada simulação.

Tabela 4: Valores médios de RMSE da coluna de água entre os dados de temperatura observados e calculados em cada simulação separando por ponto e campanha.

		Março	Abril	Mai	Junho	Julho
P1	NO_WD	1,566	0,498	0,927	0,932	0,444
	WD-CFSR-HY	0,536	0,429	0,525	0,531	0,397
	WD-WRF-HY	<u>0,222</u>	0,174	<u>0,246</u>	<u>0,294</u>	0,187
	WD-WRF-MR	0,289	0,256	0,339	0,459	<u>0,181</u>
P3	NO_WD	0,866	0,962	1,065	0,990	0,668
	WD-CFSR-HY	0,561	0,891	0,795	0,823	0,663
	WD-WRF-HY	0,218	<u>0,386</u>	0,451	<u>0,470</u>	0,337
	WD-WRF-MR	0,344	0,400	<u>0,425</u>	0,497	<u>0,295</u>
P4	NO_WD	0,739	1,331	1,138	1,027	0,876
	WD-CFSR-HY	0,544	1,070	1,177	0,985	0,840
	WD-WRF-HY	<u>0,415</u>	0,596	<u>0,540</u>	<u>0,396</u>	0,231
	WD-WRF-MR	0,473	<u>0,578</u>	0,569	0,441	0,246
P5	NO_WD	1,068	1,518	1,147	0,933	0,807
	WD-CFSR-HY	0,756	1,391	1,237	0,929	0,745
	WD-WRF-HY	<u>0,621</u>	0,758	0,239	0,400	0,086
	WD-WRF-MR	0,634	<u>0,757</u>	0,189	<u>0,359</u>	0,112
P6	NO_WD	1,148	1,412	1,124	0,660	0,762
	WD-CFSR-HY	0,741	1,288	1,419	0,784	0,666
	WD-WRF-HY	0,525	0,689	0,467	0,228	0,070
	WD-WRF-MR	<u>0,509</u>	<u>0,683</u>	<u>0,419</u>	0,220	0,076
P7	NO_WD	0,977	0,955	0,887	0,655	0,522
	WD-CFSR-HY	0,957	0,837	1,027	0,492	0,359
	WD-WRF-HY	0,621	<u>0,429</u>	0,413	<u>0,409</u>	0,099
	WD-WRF-MR	<u>0,609</u>	0,430	<u>0,411</u>	0,419	0,093

Legenda

0,0000	Melhor valor do ponto
0,0000	Melhor valor da campanha
<u>0,0000</u>	Melhor valor do ponto na campanha

Com relação aos dados de temperatura, as melhores performances foram das simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR, ambas forçadas pelo modelo atmosférico local WRF, sendo a diferença dos resultados entre essas simulações insignificante, o que permite afirmar que os modelos HYCOM e GLORYS/Mercator foram igualmente capazes de fornecer condições de contorno para a simulação da temperatura da água na BTS. Por sua vez, a simulação WD-CFSR-HY, forçada pelo modelo global CFSR, apresentou SI, viés e RMSE mais altos demonstrando os ganhos na implementação de um modelo atmosférico local para a representação da temperatura da BTS. Assim, como nos dados de salinidade a simulação NO_WD apresentou os piores resultados, o que indica que a aplicação do sistema *wet and dry* otimizou a performance das simulações quanto à representação das características termo-halinas da BTS.

Ao contrário do que foi observado nos dados de salinidade, as performances das simulações não pioram de forma constante em direção ao interior da BTS (pontos P6 e P7) uma vez que o ponto mais mal representado em temperatura pelas simulações é o ponto P5 e o mais bem representado, assim como nos dados de salinidade, é o ponto P1. Referente à performance em cada campanha, a campanha de julho de 2014 foi a mais bem representada ao passo que as campanhas de abril e maio foram as que tiveram a pior performance nas simulações.

Haja vista a circulação gravitacional estuarina ser forçada pelos gradientes de densidade, foram também validados os campos de densidade das simulações. Para tanto, o cálculo da densidade da água observada nos transectos foi feito com o auxílio do pacote Gibbs SeaWater (GSW) Oceanographic Toolbox (McDougall & Barker, 2011) a partir dos dados de salinidade e temperatura do CTD que foram comparados com os campos de densidade gerados pelas simulações. As Figuras 16 a 18 mostram os perfis verticais de densidade calculados a partir dos dados de CTD e das quatro simulações.

Na campanha de março (Figura 16), os resultados deixam evidente a boa representação do gradiente horizontal de densidade bem como a boa representação da estratificação vertical na porção mais distante da costa em todas as simulações exceto na simulação NO_WD. Nas campanhas de março e abril (Figura A.5), a simulação WD-WRF-HY foi a que melhor representou o gradiente de densidade do transecto.

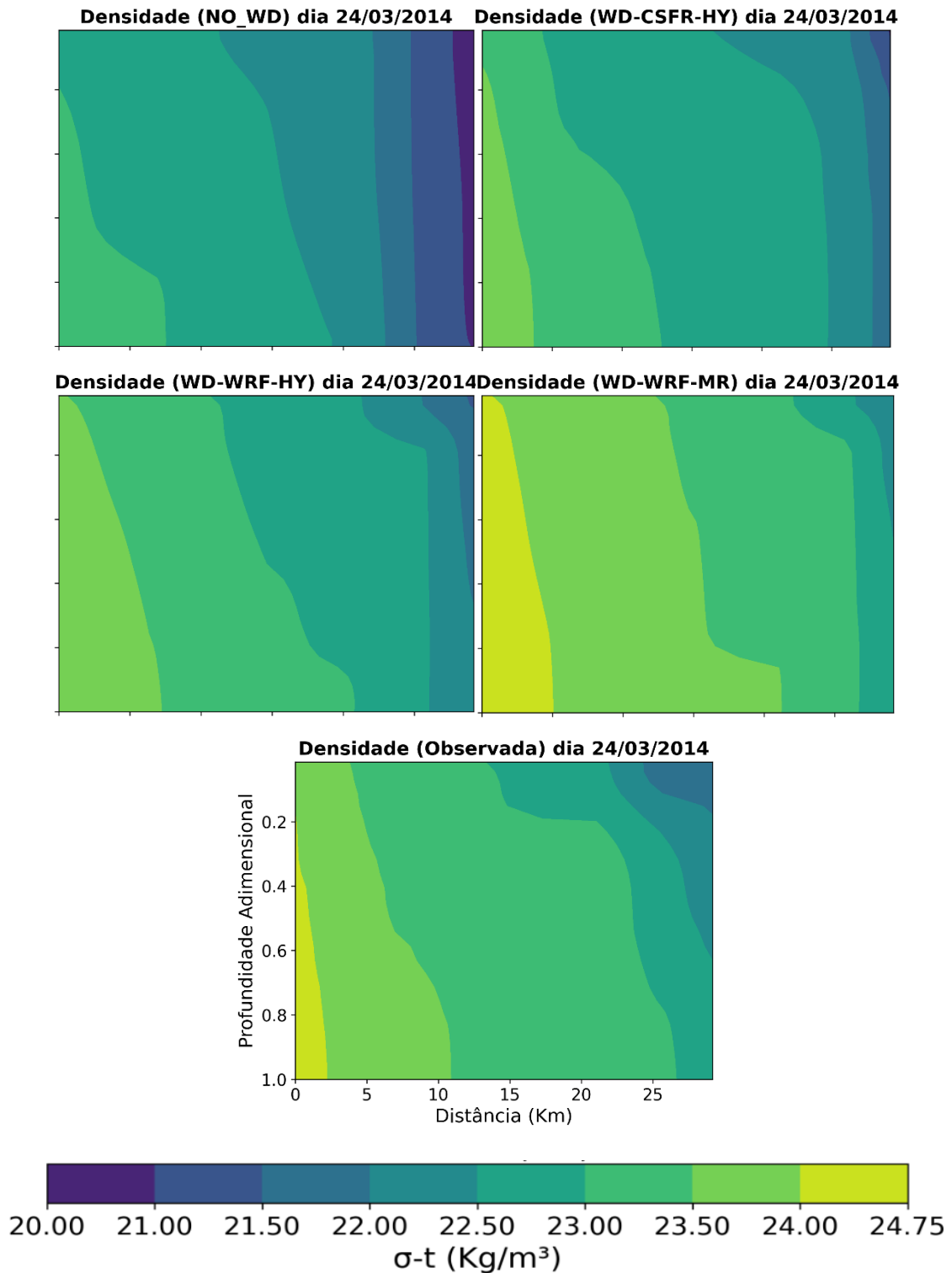


Figura 16: Perfis de densidade sigma na campanha do mês de março de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.

Na campanha de maio (Figura 17), o gradiente horizontal de densidade é menos pronunciado em relação a campanha de março, com o $\sigma-t$ dos dados de CTD variando entre 22,5 e 24 Kg/m³. Todavia, as simulações NO_WD e WD-CFSR-HY seguiram apresentando um elevado gradiente horizontal de densidade, incompatível com o observado nos dados de CTD. Por sua vez, a simulação WD-WRF-MR apresentou $\sigma-t$ entre 22,5 e 24,75 Kg/m³ em uma área de ~25Km de extensão, um pouco superior ao intervalo observado. A simulação WD-WRF-HY foi a que mais se aproximou de representar os padrões dos dados observados. Na campanha de junho (Figura A.6), a simulação WD-CFSR-HY foi a que melhor representou o gradiente de densidade do transecto. A simulação WD-WRF-HY foi a que melhor representou a densidade na porção próxima ao oceano enquanto que a simulação WD-CFSR-HY foi a que melhor representou a densidade da região próxima ao Rio Paraguaçu nessa campanha.

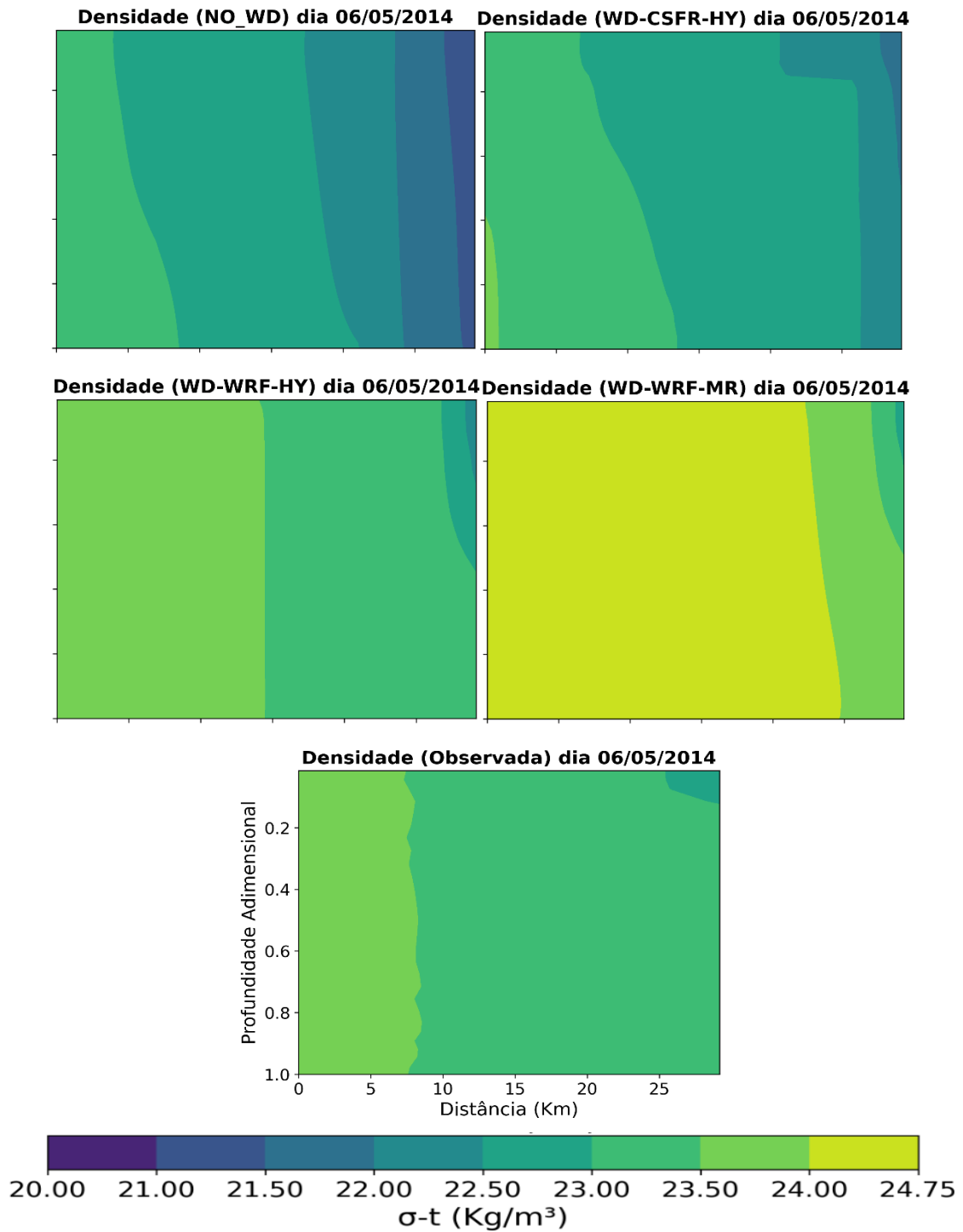


Figura 17: O mesmo da Figura 16, mas para a campanha do mês de maio.

Na campanha de julho (Figura 18), os valores de densidade sigma observados variou entre 22,5 e 24,75 Kg/m³. Apesar de representarem bem a densidade da porção próxima ao oceano, as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR não apresentaram gradiente semelhante ao dos dados observados, o que se deve ao declínio da performance dessas simulações nos dados de salinidade da campanha de julho na entrada da BTS. Por

outro lado, as simulações NO_WD e WD-CSFR-HY tiveram melhor performance em relação as outras simulações no mês de julho de 2014.

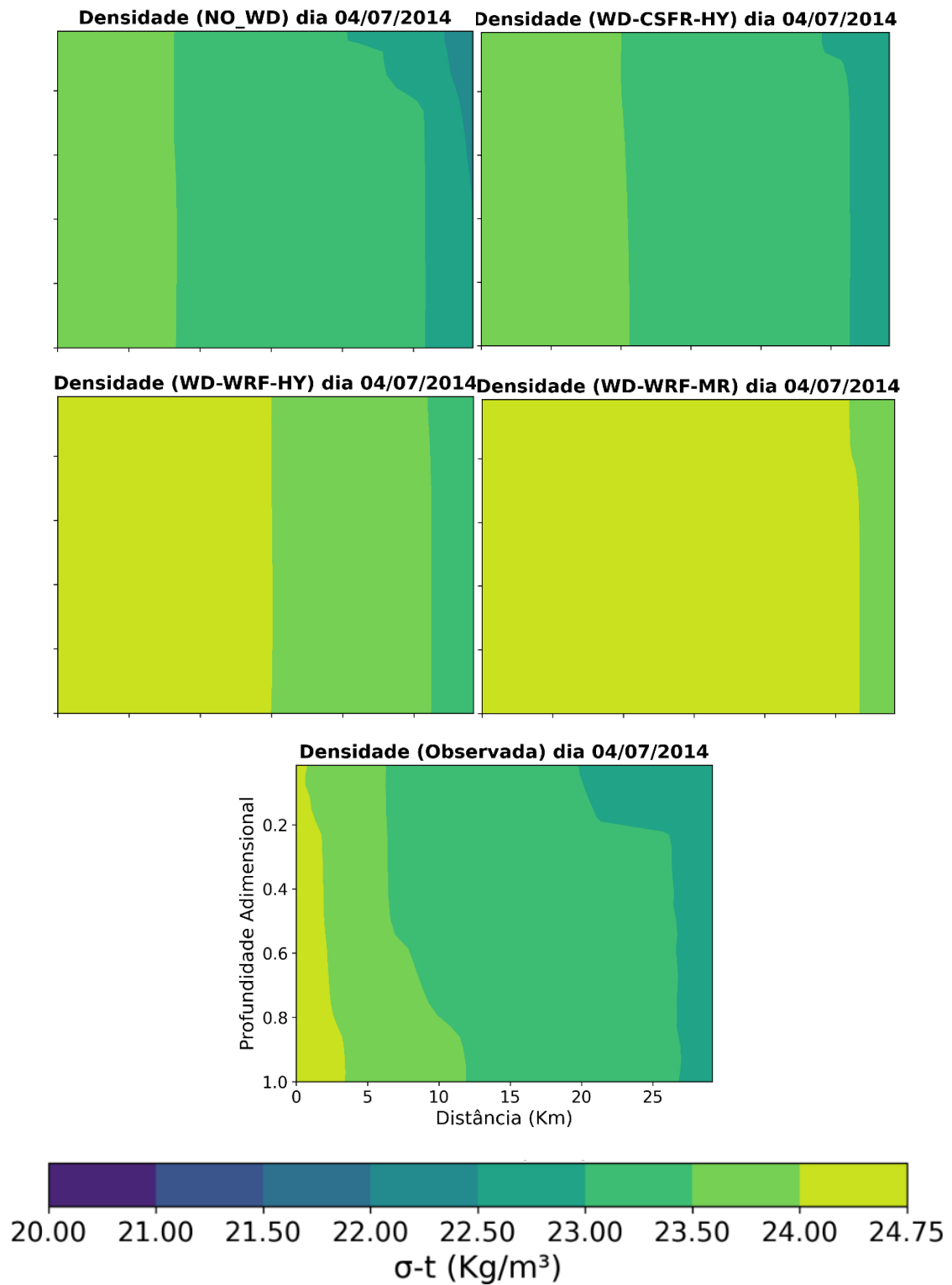


Figura 18: O mesmo da Figura 16, mas para a campanha do mês de julho.

Para evidenciar ainda mais a performance de cada simulação em cada região do transecto, a Figura 19 apresentam o viés de cada simulação em relação aos dados de densidade observados.

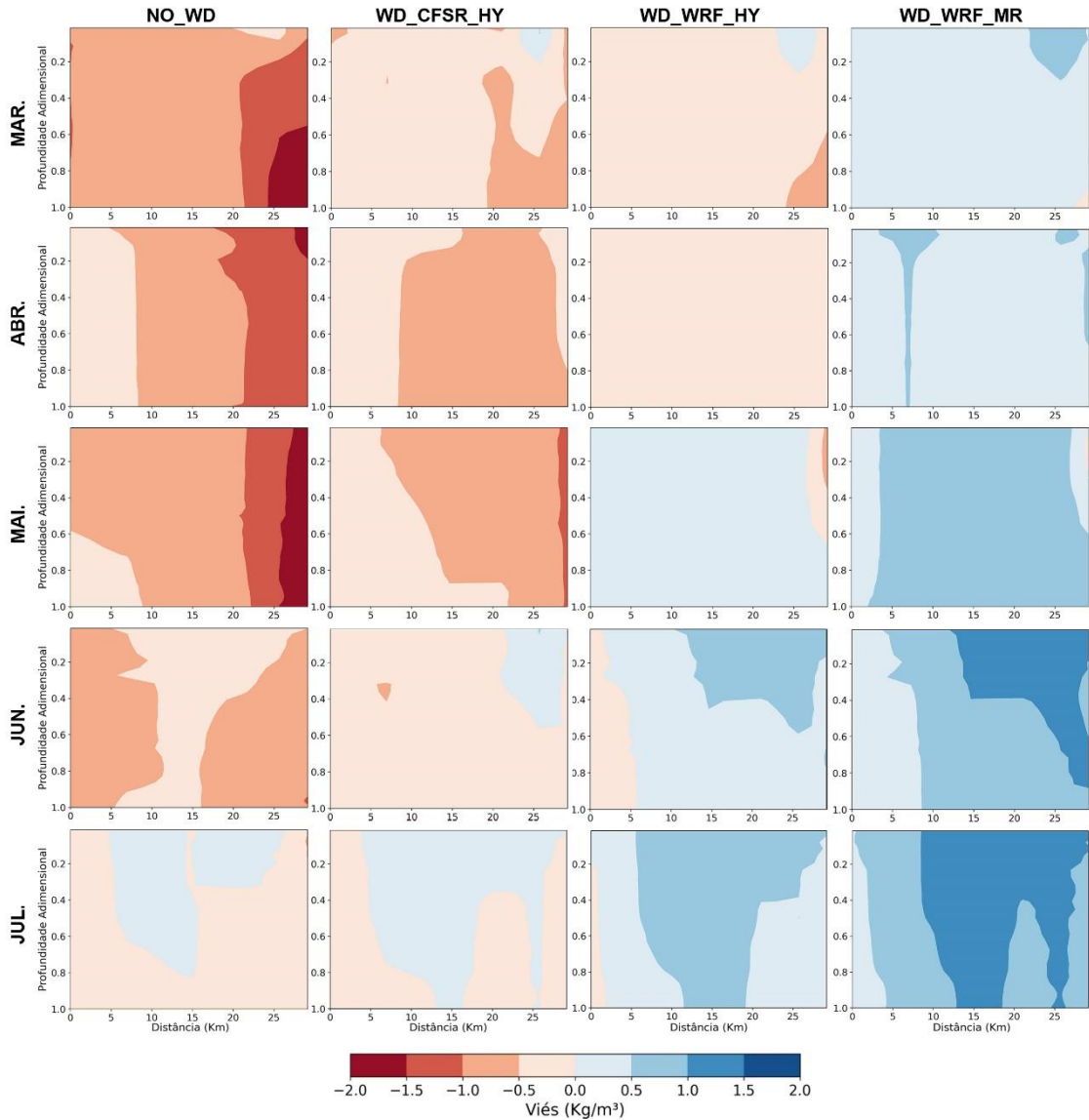


Figura 19: Viés para densidade ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.

Na campanha de março, as simulações WD-CFSR-HY, WD-WRF-HY e WD-WRF-MR foram as que apresentaram menor intervalo de viés, ficando sempre abaixo de $|\text{Kg/m}^3|$, sendo a última superior as simulações WD-CFSR-HY, WD-WRF-HY. Já a simulação NO_WD apresentou viés entre 0 e -2 Kg/m^3 , com os maiores valores em módulo ocorrendo na região do transecto mais afastada do oceano. Na campanha de abril, a simulação WD-WRF-HY apresentou o melhor intervalo de viés ficando entre 0 e 0,5

Kg/m^3 em todo o transecto enquanto que a simulação NO_WD foi a de pior performance apresentando viés maior que $1|\text{Kg/m}^3$ na porção próxima ao Rio Paraguaçu.

Para o mês de maio os resultados repetem os padrões apresentados no mês de março de 2014 visto que os intervalos de viés se repetem, com exceção do intervalo da simulação WD-CFSR-HY, que passa a apresentar valores entre -1 e -1,5 Kg/m^3 . Neste mês a simulação WD-WRF-HY apresentou os menores vieses. O melhor intervalo de viés da campanha de junho foi da simulação WD-CFSR-HY que ficou entre -0,5 e 0,5 Kg/m^3 durante todo o transecto.

No mês de julho de 2014 fica clara a inversão dos padrões apresentados nas duas campanhas anteriores. As simulações NO_WD e WD-CFSR-HY passam a apresentar os melhores resultados com valores de viés entre -0,5 e 0,5 Kg/m^3 em todo o transecto. As simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR apresentaram problemas na representação da densidade da porção intermediária do transecto, com a primeira apresentando viés entre 0,5 e 1 Kg/m^3 e a última com viés entre 1 e 2 Kg/m^3 nessa região.

Na Figura 20 estão os resultados de SI para densidade sigma das quatro simulações em relação aos dados observados. Ao comparar as figuras 19 e 20, é possível observar a repetição de certos padrões temporais e espaciais que serão discutidos posteriormente.

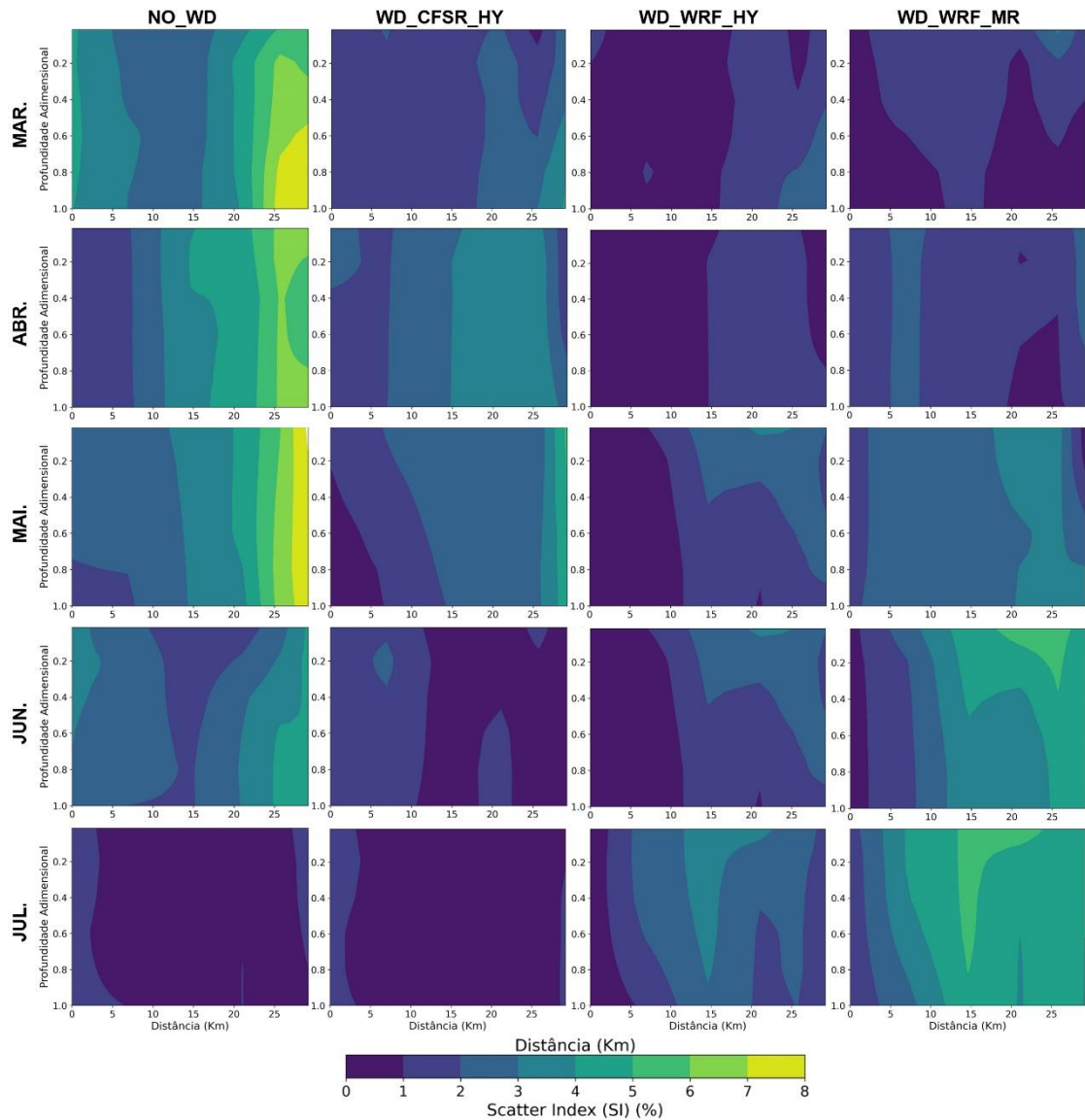


Figura 20: Índice de espalhamento para densidade ao longo do transecto nos cinco meses de 2014 simulados.

Na campanha de março, as performances das simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR foram semelhantes entre si, com espalhamento entre 0 e 3% ao longo do transecto. A terceira melhor performance nessa campanha foi da simulação WD-CFSR-HY, que oscilou entre 0 e 4% sendo melhor que a simulação NO_WD, que variou entre 3 e 8%. Na campanha de abril, a simulação WD-WRF-HY foi a que apresentou menor espalhamento, ficando abaixo de 1% durante os 15 primeiros quilômetros do transecto. Por sua vez, a simulação NO_WD foi a única a apresentar espalhamento maior que 5%, sendo a pior performance dessa campanha.

A performance da simulação WD-WRF-HY sobre a densidade da campanha de maio foi a melhor entre todas as performances dos dados do campo termo-halino visto que o espalhamento ficou entre 0 e 1% nos primeiros 25 Km do transecto. As simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-MR oscilaram entre 0 e 5% e 0 e 4% respectivamente, enquanto a simulação NO_WD apresentou os piores resultados, ficando com valores entre 1 e 8%. Na campanha de junho, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY foram as de melhor performance, apresentando espalhamento menor que 3% em grande parte do transecto, com a primeira simulação representando melhor a porção intermediária e a mais próxima do Rio Paraguaçu enquanto que a última representou melhor a região próxima ao oceano.

Na campanha de julho, as melhores performances foram das simulações NO_WD e WD-CFSR-HY, que oscilaram entre 0 e 2% de espalhamento, com ligeira vantagem para a simulação WD-CFSR-HY em relação à NO_WD. A simulação WD-WRF-HY oscilou entre 0 e 4% sendo superior à simulação WD-WRF-MR, que variou entre 1 e 7%.

As figuras 19 e 20 ajudaram a evidenciar a presença de padrões espaciais e temporais de erro em todas as simulações. Para apresentar como essas simulações se comparam entre si, a Figura 21 mostra os perfis verticais de diferença entre a densidade modelada e a observada nos 6 pontos de amostragem.

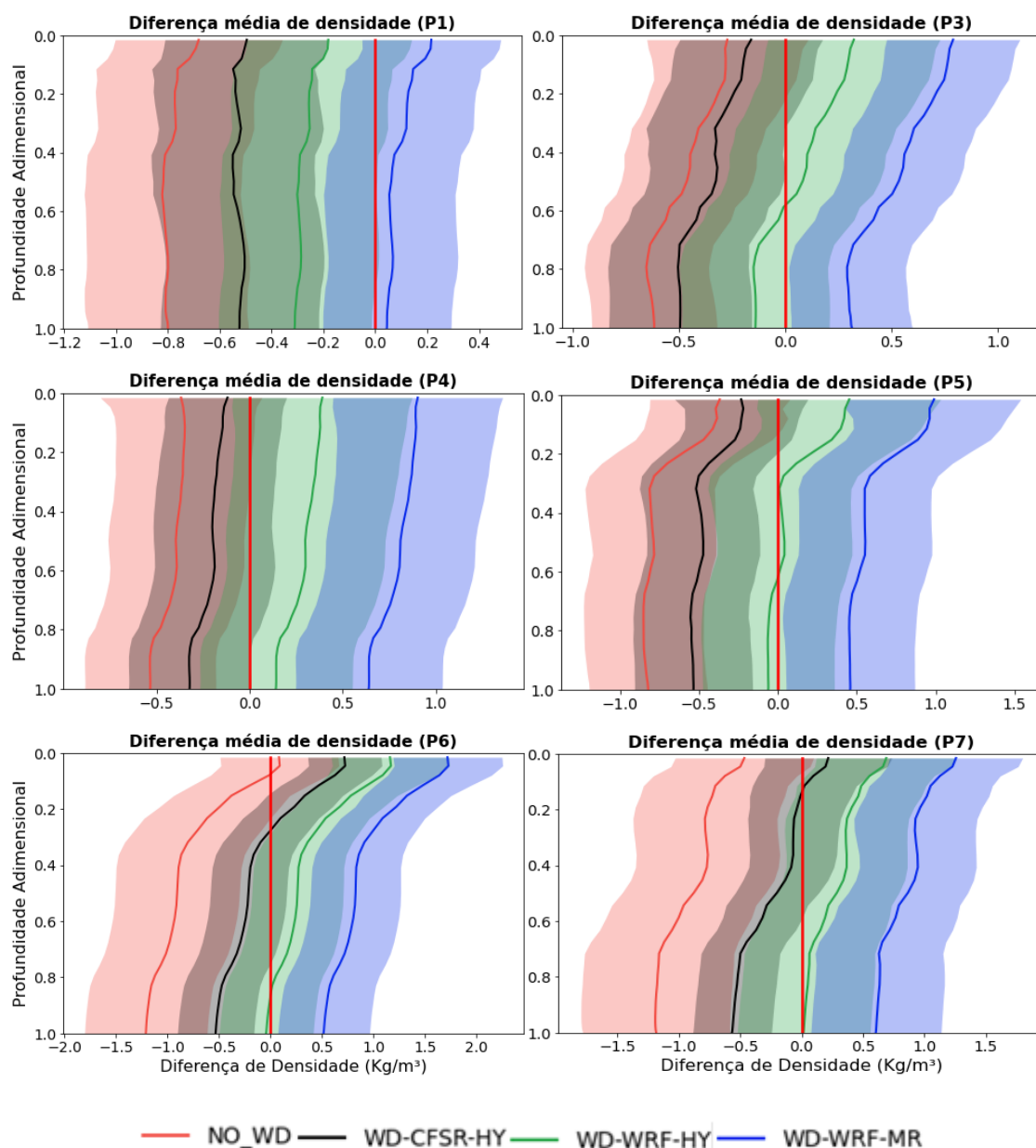


Figura 21: Gráficos comparativos da diferença média de densidade entre os as quatro simulações e os dados de CTD nos seis pontos de amostragem. As regiões sombreadas indicam o desvio padrão e a linha sólida em vermelho vivo indica $\Delta=0$.

Em todos os pontos de amostragem, a simulação WD-WRF-HY foi a que mais se aproximou dos valores de densidade observados, sendo a única das quatro simulações a atingir a linha de $\Delta=0$ com o desvio padrão em todos os pontos. A simulação WD-CFSR-HY foi a segunda melhor, seguida da simulação WD-WRF-MR que, apesar dos maus resultados em salinidade, foi capaz de manter diferença média de densidade menor que 1 Kg/m^3 nos 6 pontos de amostragem. Por sua vez, a simulação NO_WD foi a pior entre as quatro, tendo sua pior performance nos pontos mais próximos ao Rio Paraguaçu (P6 e P7).

O último recurso utilizado para avaliar a performance das simulações quanto a densidade foi o cálculo do RMSE médio da coluna de água para cada ponto e campanha. A Tabela 5 apresenta os valores de RMSE obtidos nas 5 campanhas e nos 6 pontos de coleta para cada simulação.

Tabela 5: Valores médios de RMSE da coluna de água entre os dados de densidade observados e calculados em cada simulação separando por ponto e campanha.

		Março	Abril	Maio	Junho	Julho
P1	NO_WD	0,990	0,416	0,501	0,743	0,326
	WD-CFSR-HY	0,412	0,426	0,211	0,334	0,296
	WD-WRF-HY	0,215	<u>0,174</u>	0,114	<u>0,095</u>	0,084
	WD-WRF-MR	0,142	0,341	0,413	0,161	0,353
P3	NO_WD	0,666	0,442	0,519	0,551	0,148
	WD-CFSR-HY	0,443	0,447	0,375	0,388	<u>0,145</u>
	WD-WRF-HY	<u>0,182</u>	0,072	<u>0,110</u>	<u>0,146</u>	0,489
	WD-WRF-MR	0,309	0,514	0,610	0,489	0,822
P4	NO_WD	0,581	0,878	0,741	0,378	0,030
	WD-CFSR-HY	0,325	0,651	0,559	<u>0,131</u>	0,096
	WD-WRF-HY	<u>0,144</u>	<u>0,214</u>	0,068	0,472	0,727
	WD-WRF-MR	0,381	0,327	0,629	0,950	1,177
P5	NO_WD	0,918	1,002	0,938	0,597	0,190
	WD-CFSR-HY	0,531	0,821	0,588	<u>0,221</u>	0,140
	WD-WRF-HY	0,368	0,313	<u>0,170</u>	0,496	0,567
	WD-WRF-MR	<u>0,219</u>	<u>0,227</u>	0,729	0,954	1,046
P6	NO_WD	1,445	1,392	1,430	0,815	0,060
	WD-CFSR-HY	0,505	0,779	0,644	<u>0,226</u>	0,096
	WD-WRF-HY	<u>0,384</u>	0,300	<u>0,205</u>	0,570	0,545
	WD-WRF-MR	0,460	<u>0,297</u>	0,759	1,104	1,074
P7	NO_WD	1,507	1,408	1,806	0,917	0,350
	WD-CFSR-HY	0,763	0,434	1,111	0,090	<u>0,243</u>
	WD-WRF-HY	0,496	<u>0,199</u>	<u>0,389</u>	0,468	0,381
	WD-WRF-MR	<u>0,227</u>	0,443	0,522	1,010	0,935

Legenda

0,0000	Melhor valor do ponto
0,0000	Melhor valor da campanha
<u>0,0000</u>	Melhor valor do ponto na campanha

A partir das estatísticas apresentadas acima, é possível afirmar que a simulação WD-WRF-HY foi a que apresentou melhor performance em relação aos dados de densidade, o que é possível graças a performance superior dessa simulação sobre os dados de salinidade e muito próxima a simulação WD-WRF-MR no caso da temperatura.

As simulações WD-WRF-MR e WD-CFSR-HY tiveram performances semelhantes entre si, isso se deve a simulação WD-WRF-MR ter apresentado boa performance sobre os dados de temperatura e ruim sobre os dados de salinidade enquanto que a simulação WD-CFSR-HY teve boa performance sobre os dados de salinidade e um pouco pior sobre os dados de temperatura, o que acabou equilibrando a performance dessas duas simulações sobre os dados de densidade.

A simulação NO_WD apresentou a pior performance em relação aos dados de densidade, principalmente nas campanhas entre março e maio. Nas campanhas de junho e julho, a simulação NO_WD chegou até a ter a melhor performance entre todas as simulações nos pontos P4 e P6, o que se deve à melhora da performance em temperatura e salinidade nessas campanhas, mas também à compensação de erros nesses dois parâmetros, visto que a performance dessa simulação sobre os dados de temperatura no ponto P4 não foi especialmente boa (RMSE = 0,876) a ponto de explicar a excelente performance (RMSE= 0,030) sobre os dados de densidade desse ponto.

A exemplo do que foi visto nos dados de salinidade, as simulações forçadas com o modelo atmosférico local WRF apresentaram performance melhor (pior) que as simulações forçadas pelo modelo atmosférico global CFSR nas campanhas de março a maio (junho e julho). Com relação ao uso dos modelos Hycom e GLORYS/Mercator como condição de contorno e climatologia, o modelo Hycom mostrou-se superior na representação da densidade nos transectos, o que se deve ao maior erro do modelo GLORYS/Mercator sobre os dados de salinidade. Referente ao sistema *wet and dry*, este se mostrou necessário na representação da densidade na BTS, ainda que a simulação NO_WD tenha gerado bons resultados nas campanhas de junho e julho, os erros nas outras campanhas, principalmente na porção próxima a desembocadura do Rio Paraguaçu onde o SI passa de 7% e o viés passa de -1,5 Kg/m³. Dessa forma, a implementação do sistema *wet and dry* se faz necessária para a melhor representação do campo termo-halino da BTS.

5.2 Resultados - Correntes

Os dados de velocidade das correntes nos pontos A1, A2 e A3 foram convertidos em dados médios da coluna d'água e decompostos em uma componente perpendicular (U) e paralela (V) ao canal estuarino. As Figuras 40 a 42 apresentam a comparação dos resultados observados e simulados referentes às componentes U e V nos 3 pontos supracitados. A organização dos gráficos visa facilitar a visualização, comparando NO_WD x WD-CFSR-HY x Observado, o que permite avaliar o impacto do sistema *wet and dry*, WD-CFSR-HY x WD-WRF-HY x Observado, comparando a performance os modelos forçados pelo modelo global CFSR e local WRF e WD-WRF-HY x WD-WRF-MR x Observado, comparando o impacto do uso do modelos Hycom e GLORYS/Mercator como condição de contorno e climatologia.

O ponto A1 (Figura 22), localizado na plataforma continental adjacente a BTS, registrou limites de velocidades semelhantes nos componentes U e V, com ambas ficando ao redor de -0,3 e 0,4 m/s. A performance das quatro simulações nesse ponto não apresentou disparidades visíveis, sendo o desempenho das quatro nesse ponto melhor explicitado nos coeficientes estatísticos apresentados adiante na Tabela 6. De forma geral todas as simulações representaram bem o campo de correntes observadas.

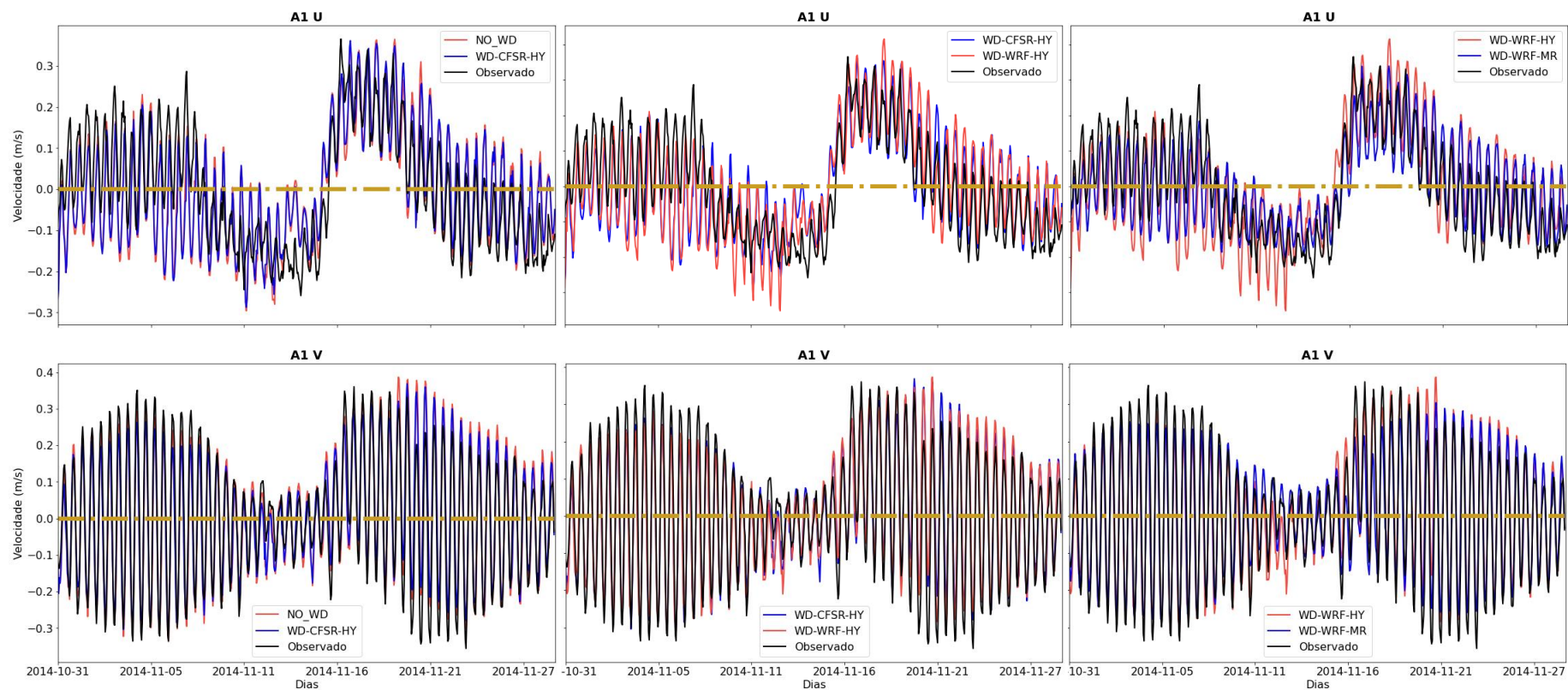


Figura 22: Séries de velocidade de corrente médias da coluna de água no ponto A1 decompostas em perpendiculares (U, painéis superiores) e paralelas (V, painéis inferiores) ao canal, a linha dourada indica velocidade = 0 m/s.

No ponto A2 (Figura 23), localizado dentro da BTS próximo a cidade de Salvador, a predominância das correntes de maré é evidenciada pelo aspecto harmônico com intervalo semi-diurno das correntes paralelas ao canal (componente V) bem como pela magnitude dessa corrente, que é ~10 vezes maior em módulo que as correntes perpendiculares ao canal (U). Quanto a performance das simulações, estas apresentaram desempenho semelhante na representação das correntes perpendiculares enquanto nas correntes paralelas ao canal, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-MR apresentaram performances melhores que as outras duas simulações.

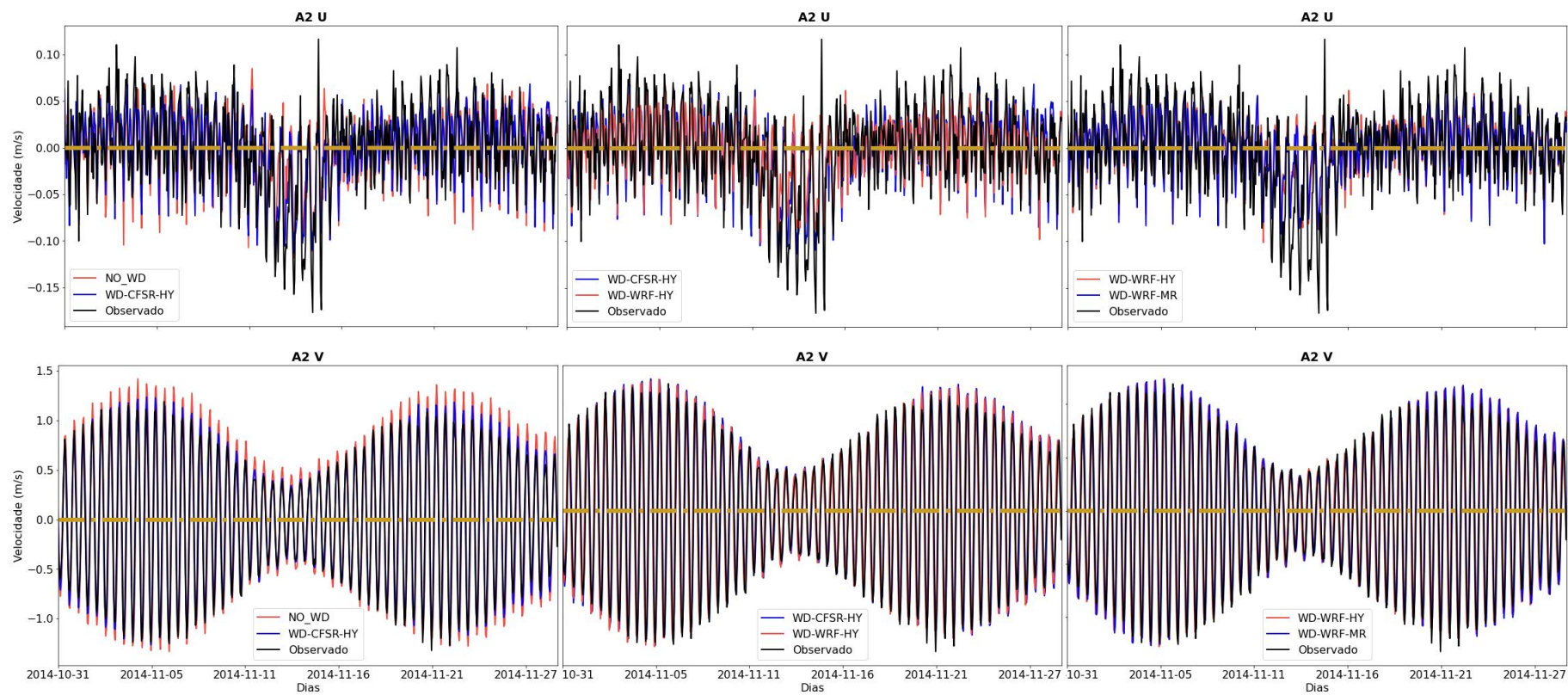


Figura 23: O mesmo da Figura 22, mas para o ponto A2.

No ponto A3 (Figura 24), a presença de correntes causadas pelas marés segue evidente nos gráficos de correntes paralelas ao canal (V). As simulações, a exemplo do ocorrido no ponto anterior, não apresentaram disparidades visíveis entre si na representação das correntes perpendiculares ao canal (U). Contudo, nas correntes paralelas ficou claro que a simulação NO_WD superestimou as correntes de vazante, representadas pelos valores negativos, enquanto as outras 3 simulações representaram melhor os valores de vazante observados.

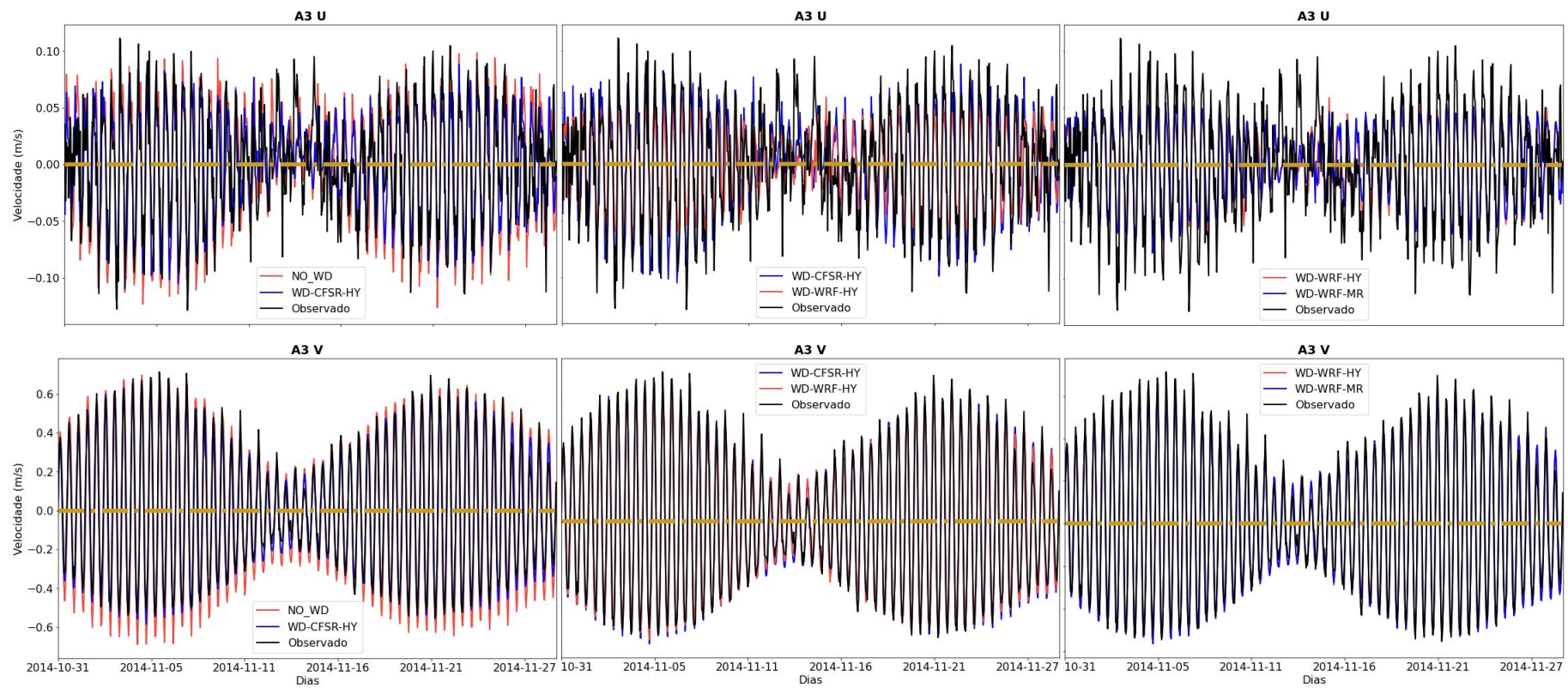


Figura 24: O mesmo da Figura 22, mas para o ponto A3.

Com o intuito de facilitar a avaliação da performance das simulações nos 3 pontos de amostragem, a Tabela 6 apresenta os valores de correlação de Spearman e RMSE entre cada simulação e os dados observados em todos os pontos e componentes.

Tabela 6: Valores de ρ e RMSE dos dados de correntes das simulações em relação aos dados observados. Valores em negrito são os melhores entre as simulações para cada componente.

	Correlação (ρ)				RMSE (m/s)			
	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR
A1U	0,716	0,718	0,701	0,812	0,101	0,098	0,107	0,082
A1V	0,946	0,938	0,927	0,946	0,061	0,063	0,068	0,060
A2U	0,566	0,646	0,593	0,591	0,037	0,032	0,035	0,035
A2V	0,945	0,976	0,947	0,974	0,244	0,141	0,209	0,148
A3U	0,692	0,726	0,734	0,746	0,039	0,033	0,032	0,032
A3V	0,958	0,983	0,985	0,985	0,118	0,062	0,058	0,060

Além da influência harmônica das marés, as correntes também são influenciadas por eventos como ventos, chuva e vazão fluvial (Cerralbo Peñarroya et al., 2018). A influência destes forçantes pode ser acessada a partir da filtragem dos dados de corrente total. A comparação entre dados observados e modelados filtrados nos fornece a informação de quão bem a circulação gerada por estes forçantes são representados nas simulações. As correntes filtradas muitas vezes são até uma ordem de grandeza menos intensa que as correntes de maré, mas sua característica não cíclica é fundamental nos processos de transporte e advecção. As Figuras 25 a 27 apresentam os resultados da comparação dos dados de correntes nos pontos A1, A2 e A3 filtrados em passa-baixa com frequência de corte de 53 horas.

No ponto A1 (Figura 25) é possível observar que todas as simulações representaram de forma satisfatória as correntes filtradas perpendiculares, mas o mesmo não pode ser afirmado sobre as correntes filtradas paralelas, onde os erros ficaram próximos de 0,037 m/s, sendo proporcionalmente maiores que os erros nas correntes filtradas perpendiculares.

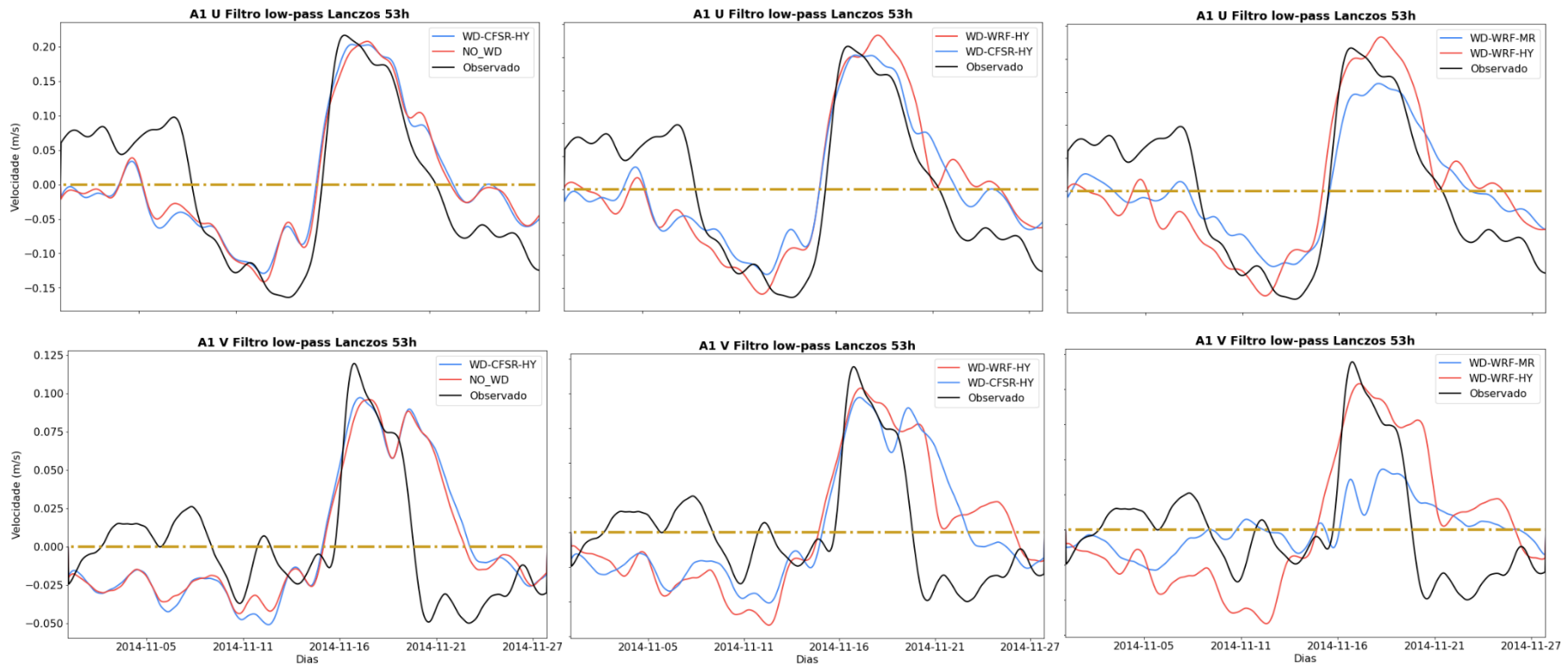


Figura 25: Dados de velocidade de corrente do ponto A1 filtrados em passa baixa de 53 horas. A organização dos painéis segue a apresentada nas figuras 22 a 24.

No ponto A2 (Figura 26), todas as simulações também representaram de forma satisfatórias as correntes filtradas perpendiculares (U), com a simulação WD-CFSR-HY sendo a de melhor performance. Por sua vez, a performance as correntes filtradas paralelas (U) foi semelhante a registrada no ponto anterior, com a principal diferença sendo o declínio do desempenho da simulação NO_WD, que foi a pior entre as quatro.

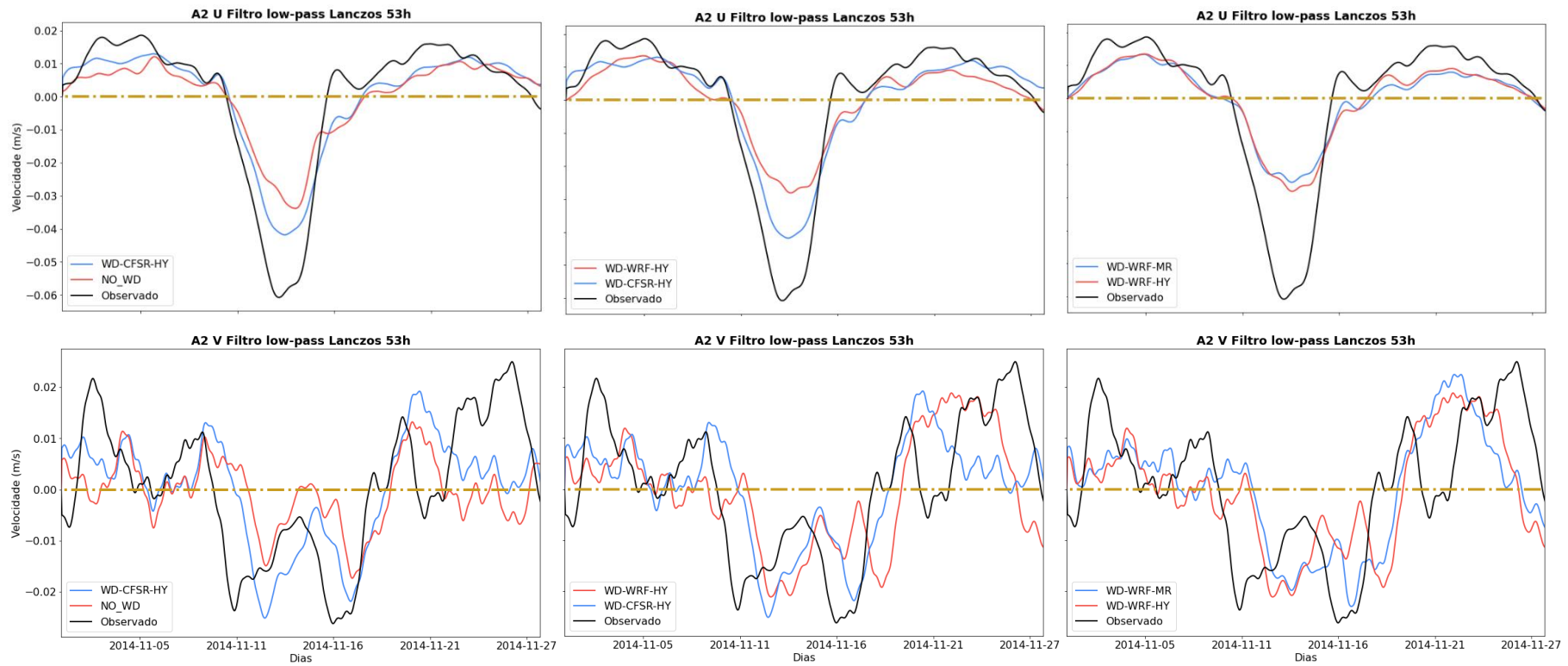


Figura 26: O mesmo da Figura 25, mas para o ponto A2

Ao contrário do que foi observado nos pontos anteriores, no ponto A3 (Figura 27) as simulações representaram com qualidade semelhante as correntes filtradas paralelas e perpendiculares, com a primeira sendo ligeiramente melhor representada que a última. Em ambas, a simulação WD-CFSR-HY foi a de melhor performance e a simulação NO_WD a pior.

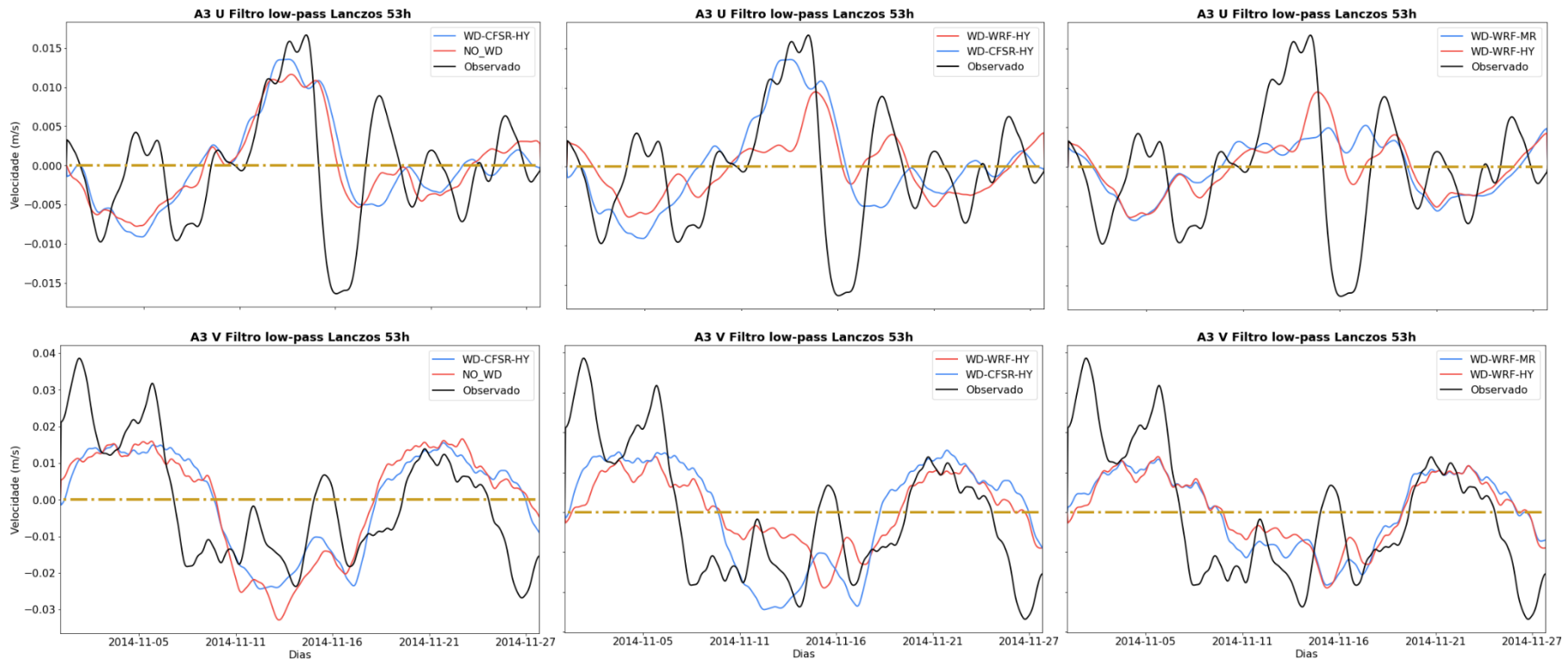


Figura 27: O mesmo da Figura 25, mas para o ponto A

Em seguida, a Tabela 7 apresenta os resultados estatísticos da comparação dos dados filtrados de velocidade de corrente observados e simulados. Em negrito são evidenciados os melhores valores de cada componente.

Tabela 7: Estatísticas referentes à comparação dos dados de velocidade filtrados para as quatro simulações.

	Correlação (p)				RMSE (m/s)			
	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR
A1U	0,823	0,811	0,800	0,875	0,059	0,061	0,065	0,054
A1V	0,552	0,526	0,539	0,415	0,037	0,039	0,041	0,035
A2U	0,943	0,967	0,955	0,955	0,010	0,007	0,010	0,011
A2V	0,265	0,590	0,519	0,537	0,012	0,010	0,011	0,011
A3U	0,537	0,649	0,502	0,416	0,006	0,006	0,006	0,007
A3V	0,764	0,774	0,739	0,769	0,013	0,012	0,013	0,012

A performance das quatro simulações com relação às correntes filtradas repetiu as tendências observadas na avaliação da performance sobre os dados de corrente, com as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-MR sendo as melhores, indicando que a boa representação das correntes filtradas é importante na representação da corrente como um todo.

Nos pontos A2 e A3 a simulação WD-CFSR-HY apresentou os melhores resultados de correlação e RMSE que as demais simulações, porém na maioria das vezes a diferença para os resultados da simulação WD-WRF-MR é muito pequena, com exceção da componente U do ponto A3. Assim, é possível afirmar que o sistema *wet and dry* também produziu melhores resultados e que o uso do local WRF em relação ao modelo global CFSR não apresentou uma grande melhora nas simulações. Com relação a condição de contorno e condições iniciais o modelo GLORYS/Mercator produziu os melhores resultados tendo em vista a comparação dos resultados das simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR.

5.3 Resultados - Nível

O nível do mar observado foi extraído a partir dos sensores de pressão instalados nos ADCPs dos pontos A1, A2 e A3. A formatação dos gráficos e o tratamento estatístico utilizado é semelhante ao utilizado nos dados de corrente e o tamanho das séries temporais utilizadas foi determinado pela quantidade de dados observados contínuos para cada

ponto. Nas Figuras 28 a 30 são apresentadas as séries temporais de nível do mar para os três pontos de amostragem.

No ponto A1 (Figura 28), localizado na plataforma continental, foi possível observar que as quatro simulações apresentaram excelentes resultados na representação do nível total, com pouca distinção quanto ao desempenho de cada simulação. De forma geral percebe-se uma pequena superestimação das amplitudes mais evidente na simulação NO-WD.

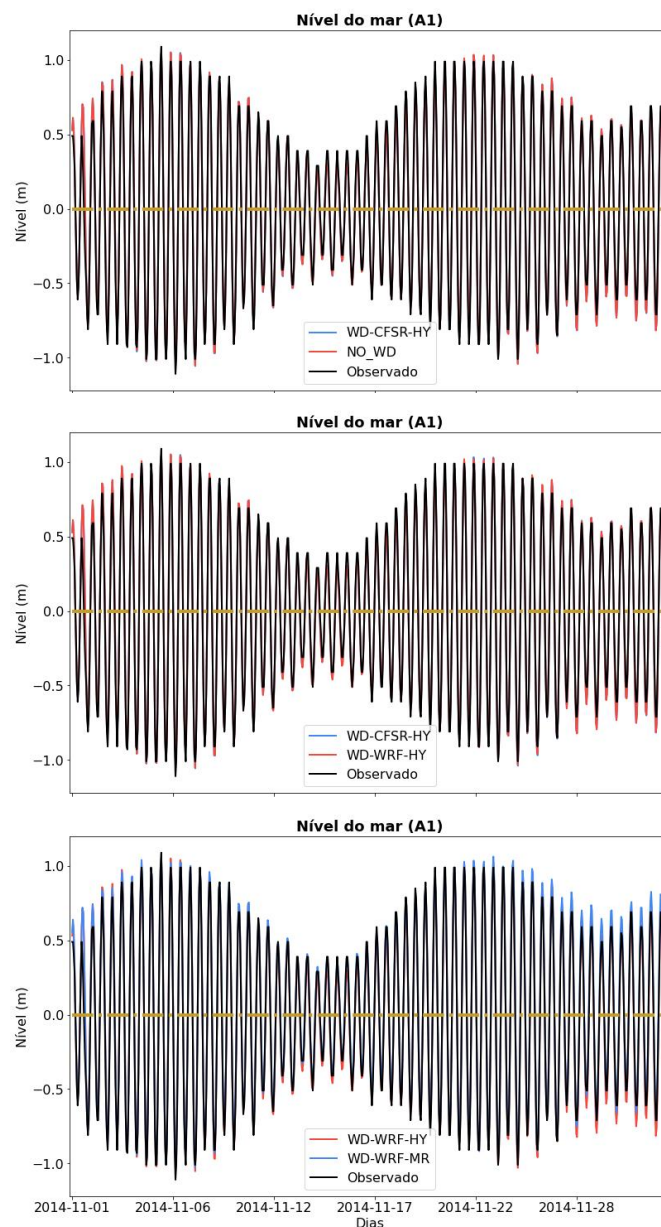


Figura 28: Séries temporais de nível do mar no ponto A1; com o painel superior comparando os dados observados às simulações NO_WD e WD-CFSR-HY, o painel central com as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY e o painel inferior comparando os dados observados com as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR, a linha dourada indica nível=0,00m.

No ponto A2 (Figura 29), as quatro simulações seguiram apresentando excelentes resultados, sendo esses resultados até melhores em comparação aos observados no ponto anterior. Por outro lado, a performance da simulação NO_WD não evoluiu como as demais, apresentando níveis do mar ligeiramente abaixo das outras simulações e dos dados observados.

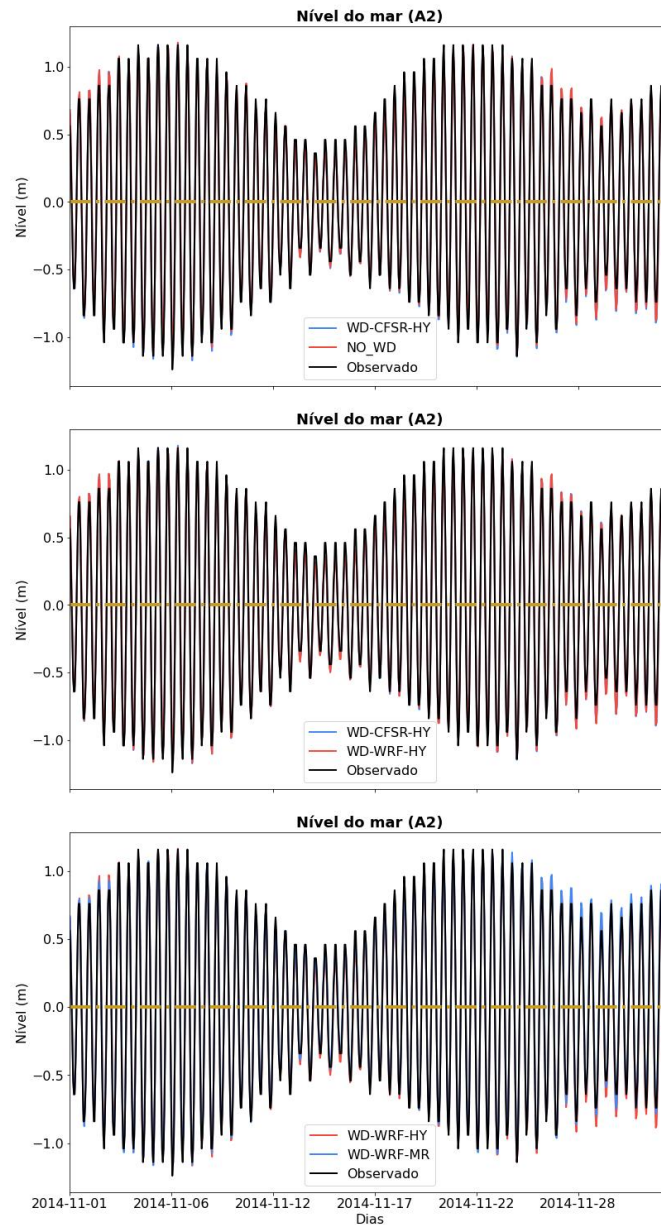


Figura 29: O mesmo da Figura 28, mas para o ponto A2.

No ponto A3 (Figura 30), a performance das quatro simulações piorou levemente em relação ao ponto A2. As diferenças chegam a 10 cm em situações de maré alta para a simulação NO-WD.

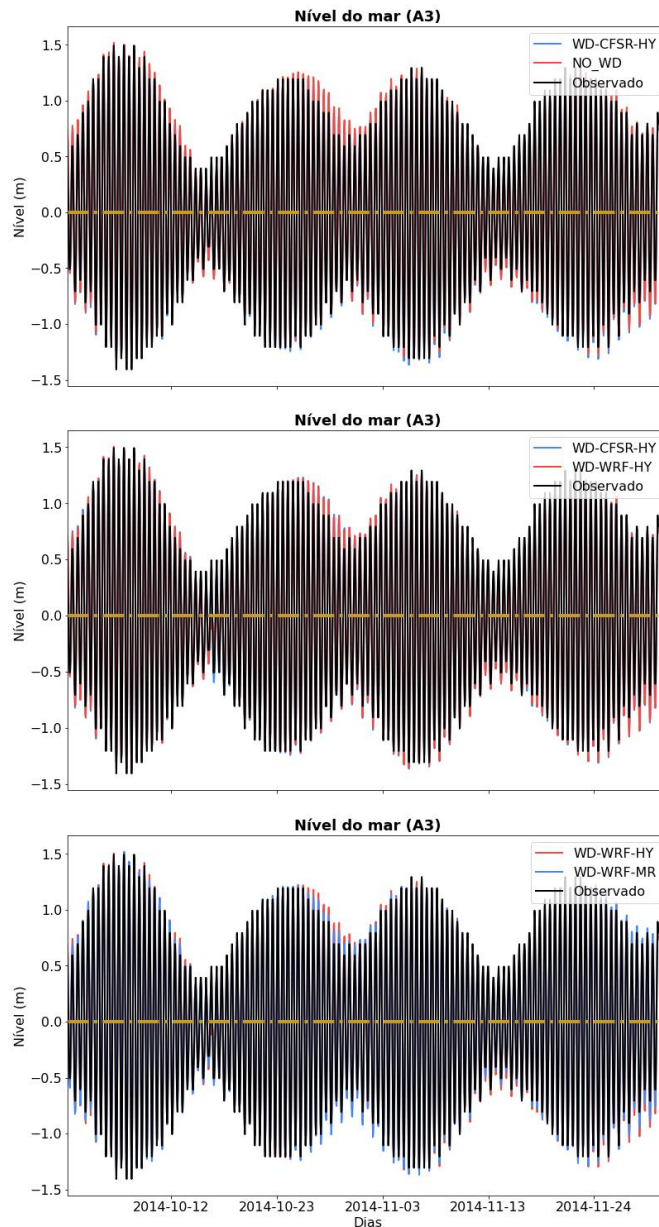


Figura 30: O mesmo da Figura 28, mas para o ponto A3.

Em seguida, a Tabela 8 apresenta os valores de correlação de Spearman e de RMSE da comparação de cada simulação em relação aos dados de nível observados. Em negrito são evidenciados os melhores valores de cada ponto. Como esperado, por se tratarem de comparações de nível forçado principalmente por marés, as correlações são bem altas, porém os valores de RMSE são menores do que 10 cm em todas as simulações, com exceção do ponto A3 para a simulação NO-WD. Os melhores resultados são apresentados na simulação WRF-GLORYS/MERCATOR, porém as diferenças de correlação e RMSE com as outras simulações é muito pequeno, sugerindo que todas as simulações foram capazes de reproduzir as variações de nível do mar devido as marés.

Tabela 8: Estatísticas referentes a comparação dos dados de nível do mar para as quatro simulações.

	Correlação (ρ)				RMSE (m)			
	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR
A1	0,993	0,993	0,993	0,995	0,063	0,063	0,064	0,068
A2	0,993	0,995	0,995	0,996	0,072	0,063	0,064	0,062
A3	0,987	0,993	0,992	0,995	0,109	0,083	0,089	0,071

As variações de nível na BTS estão principalmente associadas às marés, porém variações residuais causadas por fatores atmosféricos também se fazem presentes e a análise de sua representação é importante na determinação da performance das simulações. As Figuras 31 a 33 apresentam os dados de nível filtrados em passa baixa de 53 horas.

No ponto A1 (Figura 31), as quatro simulações tiveram dificuldades para representar as oscilações de maior período dos dados filtrados de nível, porém de forma geral conseguem representar as variações. A principal diferença observada nas simulações é entre a simulação usando o modelo HYCOM como condição de contorno (WD-WRF-HY) e a simulação usando o modelo GLORYS/Mercator (WD-WRF-MR), sendo a última superior a primeira neste ponto. A diferença nestes resultados é maior do que a mudança do forçamento global (WD-CFSR-HY) para o local (WD-WRF-HY) mostrando a importância de forçantes externos, representados através da condição de contorno, na solução das simulações.

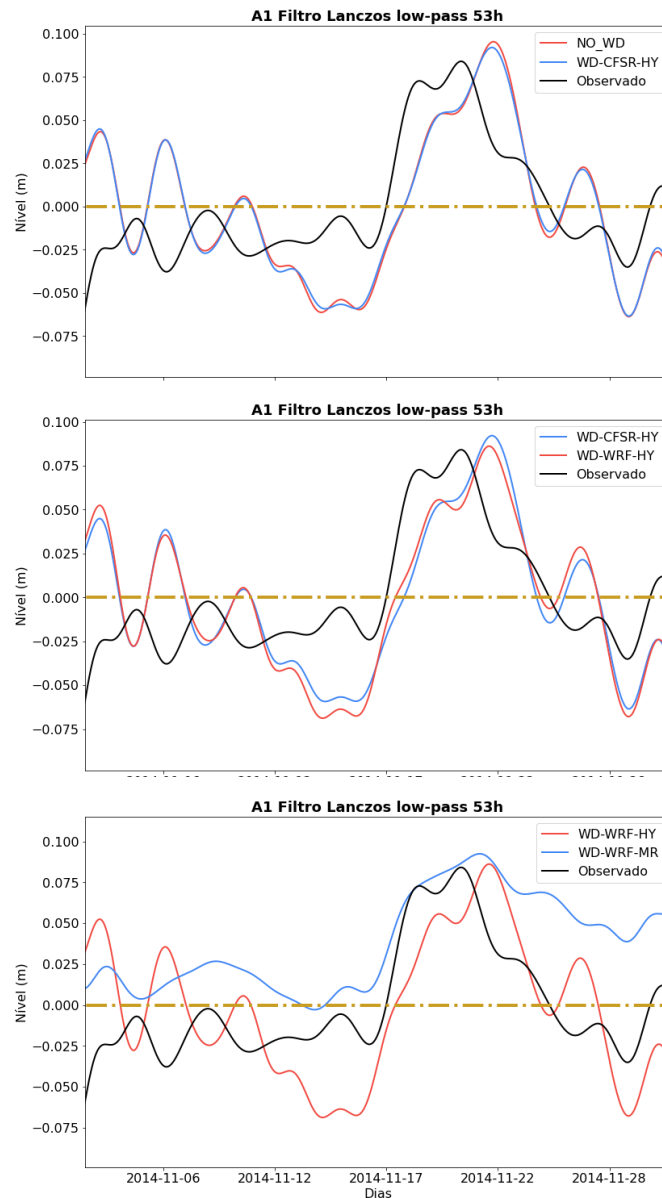


Figura 31: Dados de nível do mar no ponto A1 filtrados com filtro passa baixa de 53 horas. A organização dos painéis seguiu a apresentada nas Figuras 28 a 30.

A exemplo do que foi observado nos dados não filtrados, a performance das quatro simulações foi melhor no ponto A2 (Figura 32) do que no ponto A1 (Figura 31). Assim como no ponto A1, a simulação WD-WRF-MR despontou em relação as demais na representação dos dados filtrados, mostrando que a condição de contorno também influencia o nível do mar dentro da BTS.

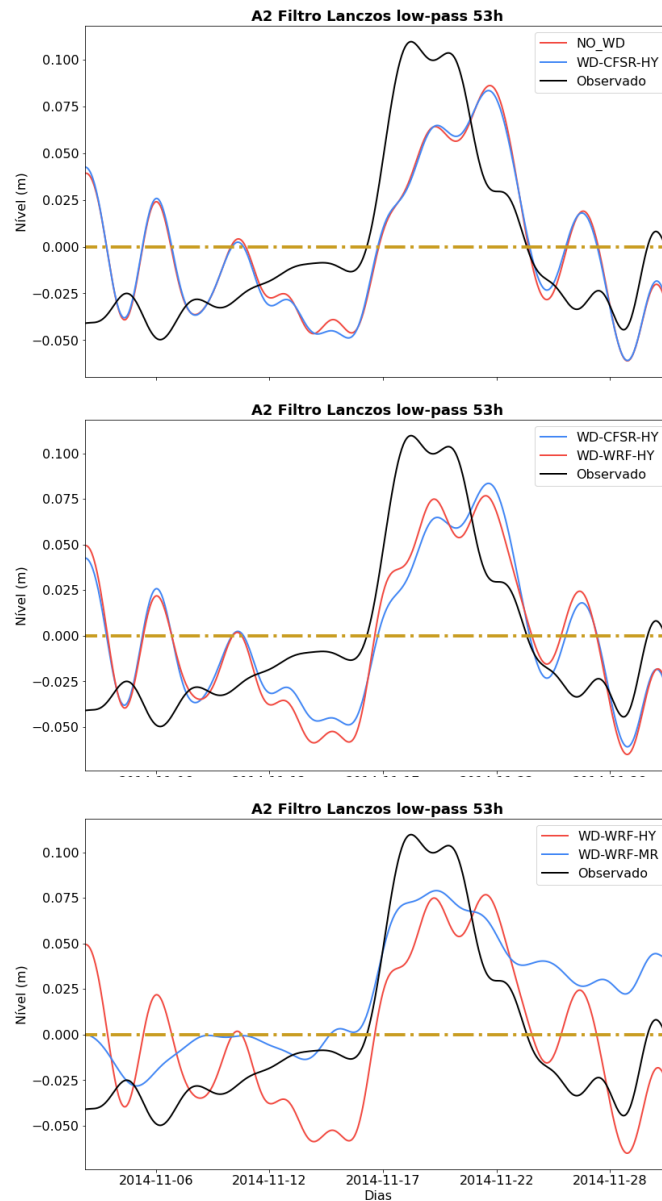


Figura 32: O mesmo da Figura 31, mas para o ponto A2.

No ponto A3 (Figura 33), as simulações WD-WRF-MR também teve performance melhor que as demais simulações. Observa-se que a amplitude das oscilações de baixa frequência aumentam em direção ao interior da BTS.

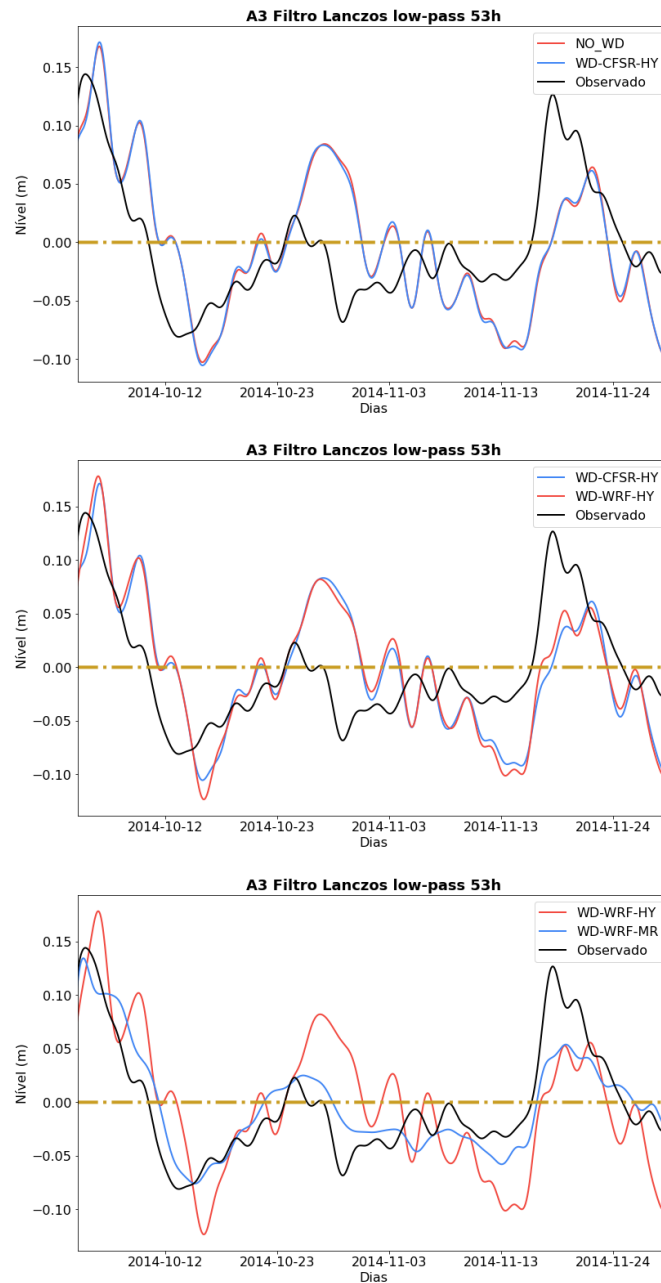


Figura 33: O mesmo da Figura 31, mas para o ponto A3.

Por fim, a Tabela 9 apresenta as estatísticas referentes a comparação dos dados de nível filtrados observados e das quatro simulações, com os valores em **negrito** evidenciando as melhores performances.

Tabela 9: Estatísticas dos dados filtrados de nível do mar.

	Correlação (ρ)				RMSE (m)			
	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR	NO_WD	WD-CFSR-HY	WD-WRF-HY	WD-WRF-MR
A1	0,404	0,410	0,396	0,750	0,042	0,041	0,042	0,048
A2	0,567	0,565	0,573	0,808	0,038	0,038	0,038	0,035
A3	0,561	0,565	0,590	0,879	0,053	0,044	0,044	0,025

A partir dos dados analisados, é possível afirmar que a simulação WD-WRF-MR apresentou os melhores resultados tanto em relação ao nível do mar total quanto em relação aos dados de baixa frequência. As simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY tiveram performances semelhantes entre si, indicando que a troca entre os modelos CFSR e WRF não causou grandes disparidades entre os dados de nível das duas simulações. A simulação NO_WD foi a de pior performance entre as quatro, indicando que o sistema *wet and dry* é imprescindível na representação do nível do mar na BTS.

5.4 Resultados – Componentes harmônicos:

O último parâmetro utilizado na validação das simulações foi a extração e comparação dos componentes harmônicos de maré, que fornecem informações sobre a performance dos modelos na representação das variações de nível e correntes devido as marés na BTS. O cálculo dos componentes harmônicos foi realizado conforme proposto por (Pawlowicz et al., 2002) usando os dados de nível e velocidade de corrente dos pontos A1, A2 e A3. Antes de descrever os componentes harmônicos calculados em cada ponto, é importante avaliar a porcentagem de influência harmônica no nível e nas correntes de cada ponto. Para tal fim, a Tabela 10 apresenta o percentual da elevação de nível do mar que é causada pelas marés em cada ponto.

Tabela 10: Percentual de variação de nível causada pelas marés em cada ponto e cada simulação.

	A1	A2	A3
ADCP	99,3	99,3	99
NO_WD	99,5	99,7	99,2
WD-CFSR-HY	99,5	99,7	99,1
WD-WRF-HY	99,5	99,6	98,7
WD-WRF-MR	99,8	99,8	99,4

Na Tabela 10 é possível observar que todas as simulações apresentaram percentual de variação de nível relacionada as marés semelhante ao percentual dos dados de ADCP, com variações ligeiras e insignificantes em cada simulação. A seguir, a Tabela 11 apresenta o percentual de variação das correntes causado pelas marés nos pontos A1, A2 e A3.

Tabela 11: Percentual da variação das correntes perpendiculares (U) e paralelas (V) ao canal causadas pelas marés.

	A1			A2			A3		
	U	V	Total	U	V	Total	U	V	Total
ADCP	75,2	91,4	84,9	41,8	99,4	99,1	70,1	98,3	97,7
NO_WD	41,1	90,5	70,8	62,7	99,7	99,6	93,7	99,4	99,3
WD-CFSR-HY	36,6	88,1	66,2	54,6	99,7	99,5	91,4	99,4	99,3
WD-WRF-HY	32	86,7	61,4	60	99,7	99,6	95,3	99,7	99,6
WD-WRF-MR	43,7	95,9	76,1	70,6	99,7	99,7	95,1	99,7	99,6

A Tabela 11 reafirma a dificuldade que todas as simulações tiveram de representar as correntes perpendiculares ao canal ao passo em que as correntes paralelas ao canal tiveram a influência das marés representada com erros insignificantes por todas as simulações. Em seguida, as Tabelas 12 a 14 apresentam os valores de amplitude e fase dos principais componentes harmônicos extraídos dos dados de nível, com os dados em negrito marcando os valores que mais se aproximaram dos valores dos dados de ADCP.

Tabela 12: Componentes harmônicos extraídos dos dados de nível observados e simulados no ponto A1. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal

Cons.	ADCP		NO_WD		WD-CFSR-HY		WD-WRF-HY		WD-WRF-MR	
	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)
M2	0,71	303,92	0,71	303,77	0,71	303,62	0,72	303,59	0,72	303,87
S2	0,23	73,77	0,24	73,62	0,24	73,39	0,24	73,20	0,24	73,62
N2	0,12	146,66	0,13	144,61	0,13	144,24	0,13	144,67	0,14	144,01
O1	0,05	311,09	0,05	313,24	0,05	313,32	0,05	312,94	0,05	314,39
MSF	0,02	102,04	0,04	116,05	0,04	115,11	0,04	112,61	0,02	110,76
K1	0,04	201,11	0,04	199,78	0,04	199,46	0,04	199,19	0,04	199,16
Q1	0,01	135,95	0,02	128,50	0,02	129,24	0,02	129,33	0,02	131,97
ETA2	0,01	328,27	0,01	311,94	0,01	308,66	0,01	312,96	0,01	312,83
NO1	0,00	109,33	0,00	122,42	0,00	124,51	0,00	130,16	0,00	152,53

OO1	0,00	132,88	0,00	92,71	0,00	94,15	0,00	122,54	0,00	130,50
J1	0,00	284,98	0,00	319,50	0,00	312,77	0,00	336,18	0,00	337,58
M4	0,01	209,26	0,00	298,26	0,00	315,40	0,00	304,33	0,00	320,92
M6	0,00	259,16	0,00	335,93	0,00	325,64	0,00	323,65	0,00	327,66

No ponto A1 (Tabela 12), como esperado a performance das 4 simulações foi semelhante, com ligeira vantagem para a simulação WD-WRF-MR nos cinco primeiros componentes. Existe uma ótima representação das marés neste ponto, com diferenças muito pequenas tanto para a amplitude como para fases.

Para o ponto A2 (Tabela 13) é possível observar que as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR apresentam vantagem em relação às outras duas simulações, obtendo juntas 17 dos 20 melhores resultados para amplitude e fase, mas novamente as diferenças são muito pequenas entre todas as simulações.

Tabela 13: Componentes harmônicos extraídos dos dados de nível do ponto A2. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal

Cons.	ADCP		NO_WD		WD-CFSR-HY		WD-WRF-HY		WD-WRF-MR	
	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)
M2	0,82	281,67	0,80	299,65	0,80	282,36	0,80	282,53	0,81	282,80
S2	0,27	55,87	0,26	83,91	0,26	53,51	0,26	53,42	0,26	53,92
N2	0,14	126,98	0,15	136,12	0,15	126,14	0,15	126,74	0,15	126,24
O1	0,05	301,84	0,06	123,95	0,06	302,20	0,06	301,74	0,06	302,96
K1	0,04	191,40	0,04	23,93	0,05	187,45	0,04	187,55	0,05	187,35
MSF	0,03	67,25	0,01	77,51	0,04	103,44	0,04	98,76	0,03	66,24
Q1	0,01	137,13	0,02	296,74	0,02	119,68	0,02	120,68	0,01	124,46
M4	0,01	275,31	0,01	304,45	0,01	276,55	0,01	274,24	0,01	271,27

No ponto A3 (Tabela 14), as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR foram as que apresentaram melhor performance, indicando que nos pontos de amostragem dentro da BTS, essas duas simulações são as que melhor representam os componentes harmônicos. Neste ponto, apesar dos resultados ainda serem muito parecidos percebe-se uma maior diferença entre as simulações WD e NO-WD, mostrando a importância desta configuração também para a boa representação das elevações de maré dentro da BTS.

Tabela 14: Componentes harmônicos extraídos dos dados de nível do ponto A3. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal

Cons.	ADCP		NO_WD		WD-CFSR-HY		WD-WRF-HY		WD-WRF-MR	
	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)	Amp. (m)	Fase (°)
M2	0,89	255,18	0,91	260,78	0,90	257,03	0,89	257,21	0,90	257,67
S2	0,34	54,99	0,33	64,31	0,34	60,07	0,34	60,78	0,34	60,73
N2	0,15	244,19	0,16	257,39	0,17	253,52	0,17	254,86	0,17	253,10
O1	0,05	255,22	0,06	260,78	0,06	259,55	0,05	258,95	0,06	260,44
MM	0,02	316,53	0,04	345,98	0,04	346,28	0,04	346,58	0,03	336,30
MSF	0,04	116,91	0,04	145,91	0,04	145,47	0,04	141,76	0,03	133,30
K1	0,03	213,60	0,04	205,19	0,04	202,98	0,04	202,74	0,04	206,30
MU2	0,03	161,68	0,03	229,83	0,02	217,10	0,02	200,59	0,02	215,88
Q1	0,01	217,37	0,02	230,58	0,02	229,91	0,02	236,89	0,02	229,76
M4	0,02	213,05	0,02	208,78	0,02	289,60	0,02	297,18	0,02	296,15

Os dados de velocidade de correntes nos 3 pontos supracitados foram utilizados para extrair dados de amplitude do maior e menor eixo, fase e inclinação da elipse de marés. A Tabela 15 exibe os dados dos componentes harmônicos de velocidade do ponto A1.

Tabela 15: Componentes harmônicos extraídos dos dados de corrente do ponto A1. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal

comp.	ADCP				NO_WD				WD-CSFR-HY			
	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha
M2	0,21	0,02	112,03	85,45	0,23	0,07	114,89	93,72	0,20	0,07	113,93	86,30
S2	0,10	-0,01	103,43	244,50	0,09	0,01	112,02	259,03	0,08	0,01	112,78	251,71
N2	0,04	0,00	110,14	279,43	0,04	0,00	123,95	296,62	0,04	0,00	124,81	291,73
M4	0,01	0,00	62,13	280,88	0,01	0,00	146,48	154,56	0,01	0,00	157,73	125,13
O1	0,01	-0,01	97,37	348,73	0,01	0,00	131,19	349,80	0,01	0,00	140,24	342,11
K1	0,01	0,00	117,39	265,82	0,01	0,00	137,24	253,72	0,01	0,00	113,02	266,30
	WD-WRF-HY				WD-WRF-MR				major = amplitude (m) do eixo maior			
comp.	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha				
M2	0,20	0,09	110,82	84,22	0,20	0,06	113,46	83,66	minor = amplitude (m) do eixo menor			
S2	0,08	0,02	112,07	251,01	0,08	0,01	117,09	254,77				
N2	0,04	0,00	124,92	290,53	0,04	0,01	111,32	284,80	inc = inclinação (°) da elipse			
M4	0,01	0,00	166,89	135,00	0,01	0,00	7,41	349,19				
O1	0,01	-0,01	129,45	335,92	0,01	0,00	115,24	345,33				

K1	0,01	0,00	94,72	247,74	0,01	0,00	105,64	263,66	pha = fase (°) do componente harmônico
----	------	------	-------	--------	------	------	--------	--------	--

No ponto A1 (Tabela 15) é possível afirmar que as quatro simulações tiveram performances semelhantes entre si, com as simulações WD-WRF-HY e WD-WRF-MR levando vantagem na representação da inclinação e da fase dos componentes avaliados. Em seguida, a Tabela 16 apresenta os dados dos componentes harmônicos no ponto A2.

Tabela 16: Componentes harmônicos extraídos dos dados de corrente do ponto A2. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal

	ADCP				NO_WD				WD-CSFR-HY			
tide	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha
M2	0,82	-0,02	90,06	81,48	0,95	-0,02	90,83	98,04	0,84	-0,02	90,99	91,01
S2	0,32	-0,01	87,21	243,11	0,31	-0,01	90,04	266,73	0,29	0,00	89,76	259,27
N2	0,12	-0,01	82,24	269,85	0,17	0,00	87,57	288,54	0,16	0,00	86,81	282,56
M4	0,04	0,01	67,94	303,10	0,04	-0,01	51,71	262,56	0,02	0,01	2,12	269,83
O1	0,02	0,00	89,67	331,93	0,03	0,00	89,59	323,80	0,02	0,00	86,88	318,54
K1	0,03	0,00	95,01	251,77	0,03	0,00	84,63	249,88	0,02	0,00	84,83	248,19
	WD-WRF-HY				WD-WRF-MR				major = amplitude (m) do eixo maior			
tide	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha	minor = amplitude (m) do eixo menor			
M2	0,84	-0,01	91,15	63,23	0,84	-0,02	90,60	92,03	inc = inclinação (°) da elipse			
S2	0,29	-0,01	90,42	228,77	0,30	-0,01	90,17	259,23	pha = fase (°) do componente harmônico			
N2	0,16	-0,01	88,61	253,95	0,16	0,00	88,48	280,70				
M4	0,03	0,01	33,96	282,87	0,02	0,01	7,46	282,41				
O1	0,03	0,00	84,05	303,15	0,03	0,00	85,63	317,26				
K1	0,03	0,00	82,99	240,50	0,03	0,00	83,40	255,93				

No ponto A2, a simulação WD-CFSR-HY foi a que melhor representou a amplitude dos principais componentes harmônicos. Apesar de representar bem o componente S2, a simulação NO_WD apresentou erro elevado no componente M2, distando mais de 13 cm do valor obtido a partir dos dados observados no eixo maior. A seguir, a Tabela 17 apresenta os valores de amplitude e fase dos principais componentes harmônicos do ponto A3.

Tabela 17: Componentes harmônicos extraídos dos dados de corrente do ponto A3. Os valores em negrito indicam os melhores entre as 4 simulações com base na comparação pela terceira casa decimal

	ADCP				NO_WD				WD-CSFR-HY			
tide	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha
M2	0,41	-0,02	85,03	264,81	0,49	-0,04	83,49	277,36	0,42	-0,03	84,16	269,69
S2	0,17	-0,02	82,34	68,29	0,17	-0,01	83,11	86,15	0,15	-0,01	83,88	76,97
N2	0,07	-0,01	82,16	94,81	0,09	-0,01	83,32	109,84	0,08	-0,01	83,20	99,08
M4	0,04	0,00	75,07	155,25	0,01	0,00	9,25	87,49	0,02	0,00	95,66	196,55
O1	0,02	0,01	85,20	164,62	0,02	0,00	82,63	152,59	0,01	0,00	83,93	146,17
K1	0,03	0,00	71,08	56,94	0,01	0,00	84,02	72,47	0,01	0,00	83,99	68,64
	WD-WRF-HY				WD-WRF-MR				major = amplitude (m) do eixo maior			
tide	major	minor	inc	pha	major	minor	inc	pha	minor = amplitude (m) do eixo menor			
M2	0,41	-0,02	85,01	268,13	0,42	-0,02	85,05	268,59	inc = inclinação (°) da elipse			
S2	0,15	-0,01	85,35	75,95	0,15	-0,01	85,01	76,16	pha = fase (°) do componente harmônico			
N2	0,08	0,00	85,14	101,12	0,08	0,00	85,26	100,32				
M4	0,02	0,00	82,70	192,73	0,01	0,00	85,20	197,32				
O1	0,02	0,00	90,84	158,79	0,01	0,00	89,77	156,37				
K1	0,02	0,00	92,98	72,84	0,02	0,00	91,44	70,74				

Xx? No ponto A3, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY foram as que melhor representaram os componentes harmônicos. A exemplo do ponto A2, a simulação NO_WD obteve bons resultados nos componentes menores, mas também apresentou erro de ~8 cm no eixo maior da componente M2. De forma geral, as simulações WD-CFSR-HY e WD-WRF-HY foram as que melhor representaram os componentes harmônicos dos 3 pontos de amostragem, enquanto que a simulação WD-WRF-MR não alcançou boa performance sobre os componentes extraídos dos dados de correntes, apesar de atingir bons resultados nos componentes dos dados de nível. Por sua vez, a simulação NO_WD representou bem os componentes menores, mas nos pontos A2 e A3, apresentou erros altos no componente M2, que corresponde a mais de 48% da elevação harmônica desses pontos.

6. Discussões

De forma geral, as simulações com o sistema *wet and dry* representaram melhor os parâmetros hidrodinâmicos da BTS em relação a simulação sem esse sistema, o que permite afirmar que o elevado esforço computacional necessário para implementar o sistema *wet and dry* em uma simulação (Kresning et al., 2019) é compensado na performance das simulações com esse sistema, também usado por Cook et al., (2019) em

um estuário e por Marchesiellio et al., (2015). Estes autores consideraram essencial a aplicação do sistema *wet-and-dry* na modelagem de uma região estuarina com meso e macro-marés. O impacto positivo da utilização do sistema *wet and dry* sobre os dados do campo termo-halino pode ser explicado pela capacidade de melhor representar o aquecimento superficial e o fluxo de sal e calor nas regiões mais rasas da baía (Siddke, 2018). Por sua vez, Nagy et al., (2021) observaram que o sistema *wet and dry* melhora a performance das simulações nos dados de correntes em baías e em ambientes rasos com grandes áreas de entre-marés. O que é explicado pelo papel das áreas de inundação na geração de assimetrias de maré e estas áreas não são representadas em modelos que não usam a configuração *wet-and-dry*.

Nos pontos de amostragem de dados do campo termo-halino, a simulação NO_WD teve sua pior performance nos pontos P6 e P7, situados próximo ao Rio Paraguaçu, o que indica que o sistema *wet and dry* deve ser utilizado na representação do campo termo-halino dessa região da BTS. Por sua vez, as simulações WD-CFSR-HY, WD-WRF-HY e WD-WRF-MR não apresentaram diferenças expressivas na representação dos pontos de amostragem.

Sobre o uso do modelo atmosférico local WRF, o mesmo se justificou no lugar do uso do modelo global CFSR, principalmente nos dados de temperatura, correntes e nível, o que se deu pela capacidade do modelo WRF de reproduzir melhor as condições atmosféricas da área de estudo o que também já foi observado em outros locais. (Matsuzaki et al., 2021). Para os dados de salinidade o WRF produziu melhores resultados para os primeiros meses do ano de 2014, enquanto o CFSR produziu melhores resultados para o segundo semestre. Haja vista o forçante fluvial em todas as simulações ser o mesmo, isto significa que o modelo CFSR está produzindo melhores resultados para o fluxo de água em superfície para estes meses e o modelo WRF deve ser ajustado.

O uso do modelo local WRF, produziu melhores resultados para o campo de nível do mar tanto em sua variabilidade total como em baixa frequência (após a aplicação do filtro de 53 horas).

Para o campo de correntes a variabilidade total dos dados é melhor representada na simulação forçada pelo modelo WRF, porém para os campos filtrados a simulação forçada pelo modelo CFSR produz melhores resultados dentro da BTS (pontos A2 e A3), embora parte das diferenças sejam pequenas.

Marta-Almeida et al. (2019) ao simular a circulação da BTS também gerou bons resultados de circulação residual forçando suas simulações com o modelo CFSR, mostrando que para a forçante de fluxo de água em superfície o CFSR possibilita uma boa representação da região da BTS. Dessa forma, modelos híbridos com base no CFSR como fluxo de água e dados de vento e fluxo de calor fornecidos pelo WRF podem ser úteis no ajuste atmosférico das simulações (Xue et al., 2015).

Considerando todos os parâmetros observados podemos concluir que a opção pelo uso do modelo WRF produziu melhores resultados. Porém atenção deve ser tomada quanto a representação da circulação baroclínica estuarina (não analisada neste trabalho) haja vista a mesma depender de gradientes de densidade, que, devido a pior representação do campo de salinidade no segundo semestre nas simulações forçadas pelo modelo WRF, podem estar pior representadas nesta simulação. Isto pode explicar a pior performance das simulações forçadas pelo WRF para as correntes filtradas no ponto A2 e A3, quando comparado ao modelo CFSR. Ainda assim, a simulação WD-WRF-HY foi o destaque positivo da validação dos dados de densidade, atingindo seus melhores resultados entre março e maio. Por outro lado, a simulação NO_WD foi a de pior performance sobre os dados de densidade, principalmente nos pontos P6 e P7 ainda que tenha atingido $RMSE=0,06 \text{ Kg/m}^3$ em P6, o que provavelmente se deve ao efeito de compensação entre salinidade e temperatura no cálculo da densidade, que faz com que simulações com performances ruins em salinidade e temperatura possam ter boa performance em densidade.

A validação do campo termo-halino evidenciou a superioridade do modelo HYCOM como condição de contorno em relação ao modelo GLORYS/Mercator, principalmente sobre os dados de salinidade e densidade. Isso vai ao encontro do que foi observado por Wilkin & Hunter (2013) que testaram 8 modelos além do GLORYS/Mercator em três baías da costa Atlântica dos EUA e descobriram que esse modelo se notabiliza mais pela representação das correntes do que pela representação do campo termo-halino. O uso do modelo GLORYS/Mercator como condição de contorno por outro lado produziu melhores resultados de correntes e nível quando comparado ao modelo Hycom, o que o torna uma melhor fonte de dados de condição de contorno. Aqui deve-se observar que o uso do modelo GLORYS/Mercator superestima a salinidade dentro da BTS quando comparada ao modelo Hycom.

Todas as simulações apresentaram excelentes resultados na representação da variabilidade total e mareal dos dados de nível, ficando com $\rho > 0,99$ em todos os pontos, a exceção da simulação NO_WD, que apresentou $\rho = 0,988$ no ponto A3. Tanto os resultados para variabilidade total do nível quanto os dados filtrados se encontram dentro dos intervalos encontrados por Marta-Almeida et al., (2019) na modelagem da mesma região.

Como as marés são responsáveis por cerca de 97,5% da variação de nível (Cirano & Lessa, 2007) e são as principais agentes de circulação residual forçada pelas marés (Santana et al., 2018) na BTS é possível então afirmar que o componente M2 está intensamente associado a esses parâmetros, logo, a pior representação desse componente pela simulação NO_WD se notabiliza como uma das responsáveis pelo pior desempenho dessa simulação em relação as demais sobre os dados de nível, corrente. . Além disso, a assimetria de maré na BTS, dominada por vazante, é melhor representada em simulações com o sistema *wet and dry* em relação as simulações sem esse sistema, o que se deve a representação das áreas intermareais (Teixeira et al., 2019) impossibilitado nas simulações NO-WD. A boa representação da assimetria de maré é importante na simulação de ambientes de meso ou macro-marés, visto que nestes a assimetria de maré é capaz de gerar mistura e correntes residuais (Cheng et al., 2011).

7. Conclusões

O trabalho em questão é um ponto de partida para trabalhos futuros de simulação das condições hidrodinâmicas da BTS e em outros sistemas estuarinos do Brasil e do mundo. A mesma analisou os ganhos no uso de configurações *wet-and-dry*, no uso de modelos locais de circulação atmosférica versus modelos globais e a comparação do uso de dois modelos globais oceânicos como condição de contorno laterais.

Os resultados permitem concluir que o uso do sistema *wet and dry* é necessário em uma modelagem de precisa da circulação na BTS, visto que o uso desse sistema proporcionou melhora ou estabilidade na performance das simulações em todos os parâmetros avaliados, especialmente na região mais interior da BTS próxima a desembocadura do Rio Paraguaçu.

Os modelos CFSR e WRF apresentaram pontos fortes distintos, com o primeiro apresentando bons resultados para as correntes filtradas e o campo termo-halino do segundo semestre e o último representando bem a temperatura da coluna d'água. De forma geral, os resultados satisfatórios na representação da salinidade e densidade e a

melhor representação dos demais parâmetros de circulação da BTS justificam o esforço necessário para implementar o modelo WRF para a BTS. É importante ressaltar que o modelo WRF possui melhor resolução espacial e temporal o que talvez resolva melhor processos de circulação (e.g.: devido a brisas marinhas) não analisados neste estudo.

O uso dos modelos HYCOM e GLORYS/Mercator como condição de contorno resultou, de forma geral, em boas performances, com o primeiro representando melhor o campo de salinidade e densidade o segundo representando melhor as correntes e o nível. Todavia, os erros da simulação com o modelo GLORYS/Mercator, apresentados nos dados de salinidade e, conseqüentemente, densidade, podem ser resolvidos ou atenuados por meio de calibração, enquanto a calibração para resolver os maiores erros no campo de corrente e nível advindos do uso das condições de contorno do modelo HYCOM seria mais trabalhosa visto que a computação desses processos é mais complexa. Assim, considera-se o uso do modelo GLORYS/Mercator como melhor solução para condição de contorno de simulações da BTS, porém com necessidade de melhorias do campo de salinidade.

Dessa forma, considerando todos os parâmetros analisados conclui-se que a melhor simulação da BTS foi conseguida na simulação WD-WRF-MR. Aqui é importante ressaltar que não foram analisados a performance da representação das correntes ao longo da coluna de água, então a afirmação acima é válida considerando apenas o campo de correntes barotrópico.

Referências

- AGUIAR, A. L. et al. Upwelling processes along the South Equatorial Current bifurcation region and the Salvador Canyon (13° S), Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 171, p. 77-96, 2018.
- AGUIAR, A. L. et al. Ocean-estuary exchange variability in a large tropical estuary. **Continental Shelf Research**, v. 172, p. 33-49, 2019.
- AMANTE, Christopher; EAKINS, Barry W. ETOPO1 arc-minute global relief model: procedures, **data sources and analysis**. 2009.
- CERRALBO PEÑARROYA, Pablo et al. Subtidal circulation in a microtidal Mediterranean bay. **Scientia marina**, v. 82, n. 4, p. 231-243, 2018.
- CHENG, Peng; et al. A numerical study of residual circulation induced by asymmetric tidal mixing in tidally dominated estuaries. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 116, n. C1, 2011.
- CIRANO, M.; LESSA, G. C. Oceanographic characteristics of Baía de Todos os Santos, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 4, p. 363-387, 2007.
- COOK, Salme E. et, al. Modeling nonlinear tidal evolution in an energetic estuary. **Ocean Modelling**, v. 136, p. 13-27, 2019.
- CRA. **Saneamento ambiental da Baía de Todos os Santos. Modelamento e avaliação ambiental**. Desenvolvimento de modelos computacionais de circulação hidrodinâmica, de transporte de contaminantes e de qualidade da água da BTS. Prognóstico dos efeitos do Programa Bahia Azul com relação à balneabilidade das praias. Technical Report RT-257-05- MA-003-RF, 262 p., Centro de Recursos Ambientais, Salvador, Bahia, Brazil, 2001.
- DA ROCHA, Gisele O. et al. Contaminação na baía de Todos os Santos. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 5, p. 583-610, 2012.
- DAGESTAD, Knut-Frode et al. OpenDrift v1. 0: a generic framework for trajectory modelling. 2018.
- DRÉVILLON, M. et al. The GODAE/GLORYS/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects. **Journal of Operational Oceanography**, v. 1, n. 1, p. 51-57, 2008.
- EGBERT, Gary D.; EROFEEVA, Svetlana Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic technology**, v. 19, n. 2, p. 183-204, 2002.

- GENZ, Fernando; LESSA, Guilherme C.; CIRANO, Mauro. Vazão mínima para estuários: um estudo de caso no rio Paraguaçu (BA). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 3, p. 73-82, 2008.
- HATJE, Vanessa; ANDRADE, Jailson B. de. **Baía de todos os santos: aspectos oceanográficos**. EDUFBA, pag. 85, 2009.
- HEDSTRÖM, Katherine S. **Technical manual for a coupled sea-ice/ocean circulation model (version 1)**. Minerals Management Service, Alaska OCS Region, 1994.
- KRESNING, Boma et al. The impacts of tidal energy development and sea-level rise in the Gulf of Maine. **Energy**, v. 187, p. 115942, 2019.
- LESSA Guilherme C. et al. Oceanografia física. In: Hatje V, de Andrade JB (eds) **Baía de Todos os Santos: aspectos oceanográficos**, EDUFBA, Salvador, pp 68–119. 2009.
- LESSA, Guilherme C. et al. Brazilian estuaries: A geomorphologic and oceanographic perspective. In: **Brazilian Estuaries**. Springer, Cham, 2018. p. 1-37.
- LIMA, Policarpo. Economia do Nordeste: tendências recentes das áreas dinâmicas. **Análise Econômica**, v. 12, n. 21 e 22, 1994.
- LIMA, Geraldo M. P.; LESSA, Guilherme C. The fresh-water discharge in Todos os Santos Bay (BA) an its significance to the general water circulation. **Pesquisas em Geociências**, v. 28, n. 2, p. 85-97, 2001.
- MARCHESIELLO, Patrick et al. On tridimensional rip current modeling. **Ocean Modelling**, v. 96, p. 36-48, 2015.
- MARTA-ALMEIDA, Martinho et al. Realistic modelling of shelf-estuary regions. **Ocean Dynamics**, v. 69, n. 11-12, p. 1311-1331, 2019.
- MATSUZAKI, Yoshitaka et al. Application of the WRF model to the coastal area at Ise Bay, Japan: evaluation of model output sensitivity to input data. **Coastal Engineering Journal**, v. 63, n. 1, p. 17-31, 2021.
- MCDUGALL, Trevor J.; BARKER, Paul M. Getting started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) oceanographic toolbox. **SCOR/IAPSO WG**, v. 127, p. 1-28, 2011.
- MONTENEGRO NETO, A. **Estudo da circulação forçada por ventos e marés na Baía de Todos os Santos e Plataforma Continental Adjacente. Simulações com o modelo oceânico da Universidade de Princeton (POM)**. 1998. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico-Universidade de São Paulo.

- NAGY, Hazem et al. Recent Progress in Downscaled Local Ocean Forecast Models for Irish Maritime Users. In: **9th EuroGOOS International conference**. 2021.
- PAWLOWICZ, Rich; et al. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 8, p. 929-937, 2002.
- SANTANA, Rafael; TEIXEIRA, Carlos; LESSA, Guilherme. The impact of different forcing agents on the residual circulation in a tropical estuary (Baía de Todos os Santos, Brazil). **Journal of Coastal Research**, v. 34, n. 3, p. 544-558, 2018.
- SANTOS, Cid B.; CARVALHO, Rafael C.; LESSA, Guilherme. Distribuição dos manguezais na Baía de Todos os Santos e seu impacto no balanço hídrico. In: **IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, Recife-Pe, Anais. 2003. p. 178-201.
- SIDDKE, Abu Bakar. **Salinity Simulation in Florida Bay with the Regional Oceanic Modeling System (ROMS)**. 2018. Tese de Doutorado. Florida Atlantic University.
- SIKIRIĆ, Mathieu D.; JANEKOVIĆ, Ivica; KUZMIĆ, Milivoj. A new approach to bathymetry smoothing in sigma-coordinate ocean models. **Ocean Modelling**, v. 29, n. 2, p. 128-136, 2009.
- SOUZA QUEIROZ, Antônio F.; CELINO, Joil J.. Impacto ambiental da indústria petrolífera em manguezais da Região Norte da Baía de Todos os Santos (Bahia, Brasil). **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 62, 2008.
- TEIXEIRA, Carlos EP et al. The inner shelf circulation on the Abrolhos Bank, 18 S, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 13-26, 2013.
- TEIXEIRA, Carlos EP et al. A modelling configuration for the Baía de Todos os Santos for long term simulations. **Latin America Physics of Estuaries and Coastal Oceans**, 2019.
- WARNER, John C. et al. A wetting and drying scheme for ROMS. **Computers & geosciences**, v. 58, p. 54-61, 2013.
- WILKIN, John L.; HUNTER, Elias J. An assessment of the skill of real-time models of Mid-Atlantic Bight continental shelf circulation. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 6, p. 2919-2933, 2013.
- WOLGEMUTH, Ken M. et al. Oceanography and suspended material in Todos os Santos Bay. **Revista Brasileira de Geociências**, v.11, p. 172-178. 1981.
- XAVIER, A. G. Análise hidrodinâmica da Baía de Todos os Santos. **Doctorate at Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2002.

XUE, Pengfei; et al. An investigation of the thermal response to meteorological forcing in a hydrodynamic model of Lake Superior. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 120, n. 7, p. 5233-5253, 2015.

APÊNDICE A – Figuras dos resultados dos dados do campo termo-halino nas campanhas restantes

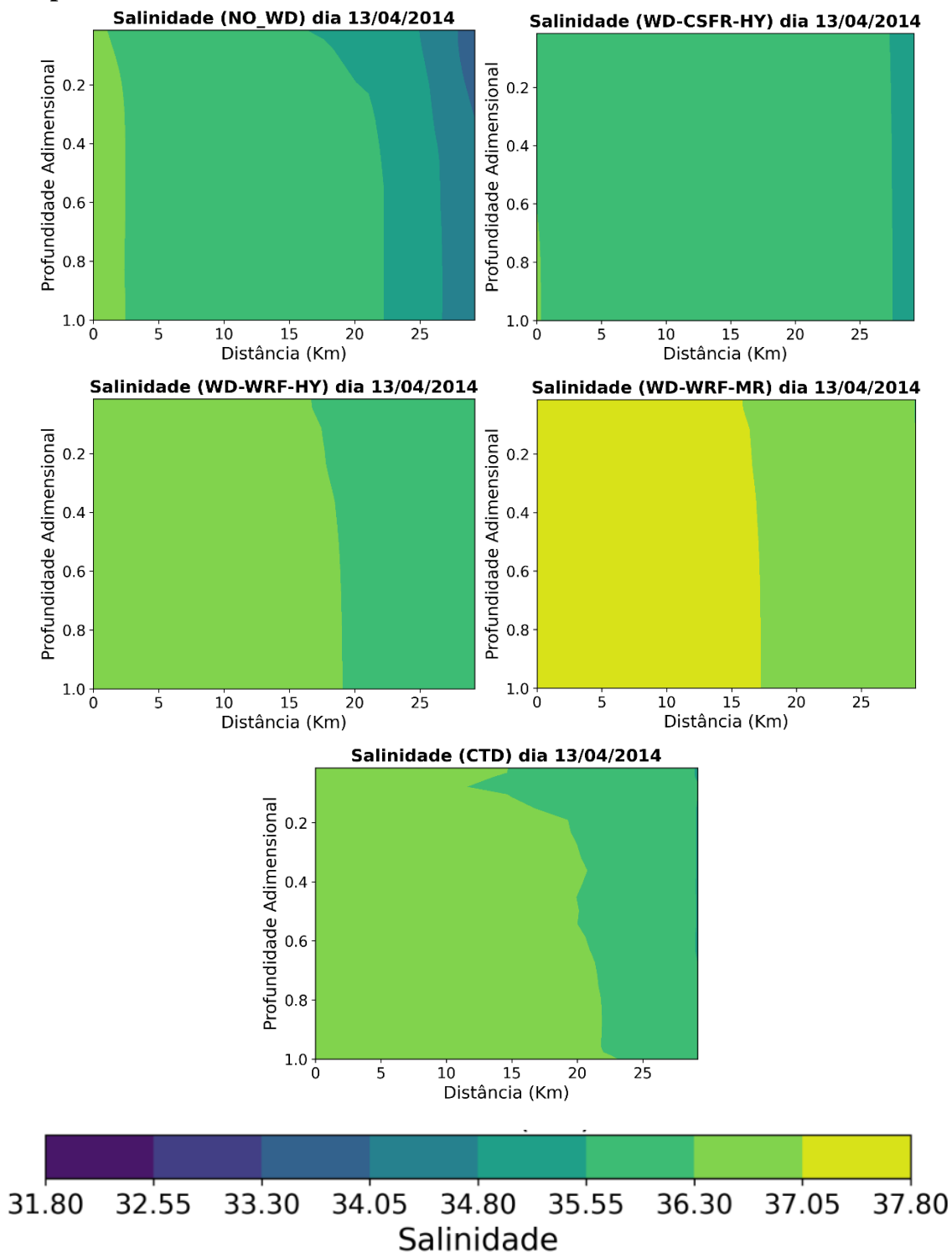


Figura A.1: Perfis de salinidade na campanha do mês de abril de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.

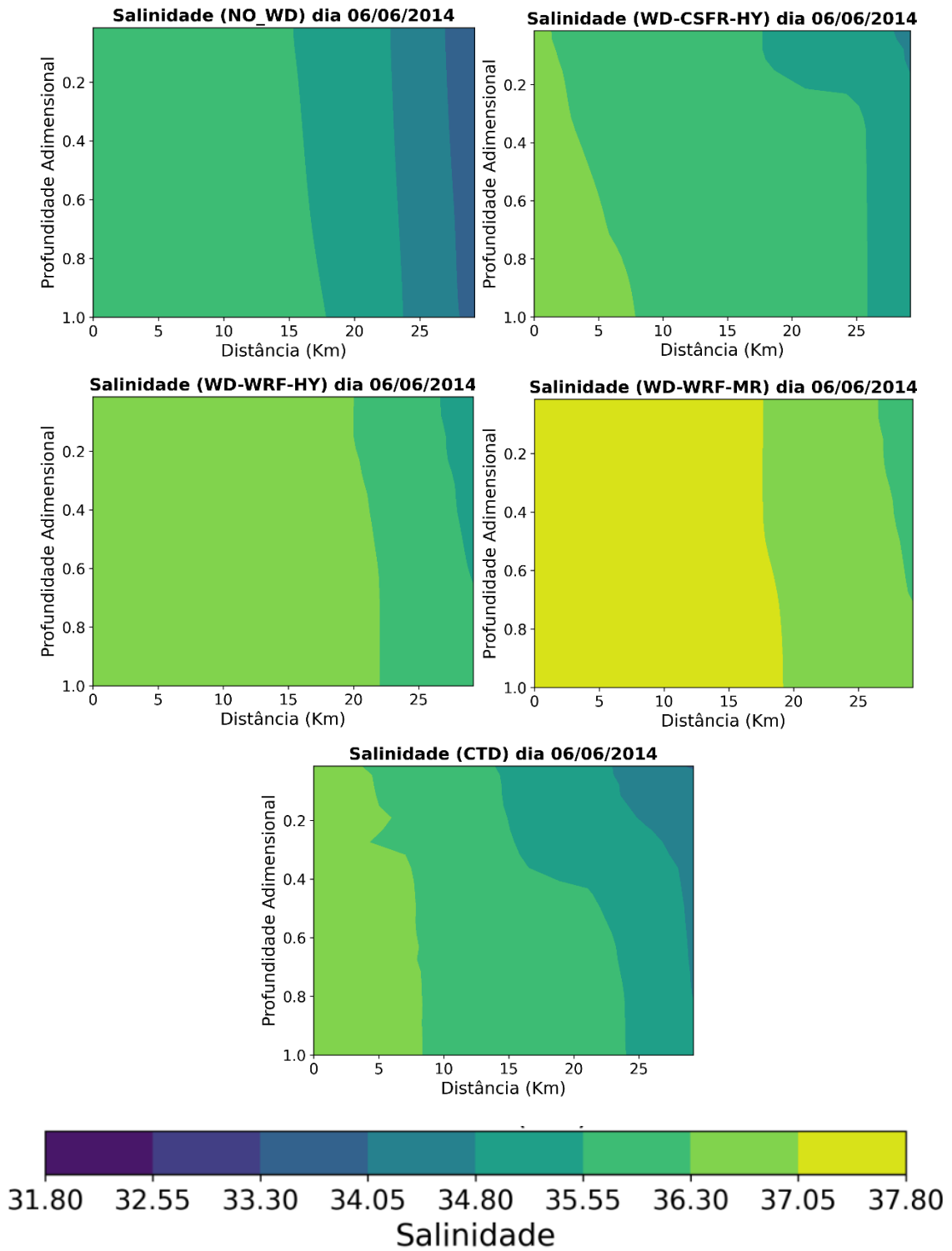


Figura A.2: O mesmo da Figura A.1, mas para a campanha de junho.

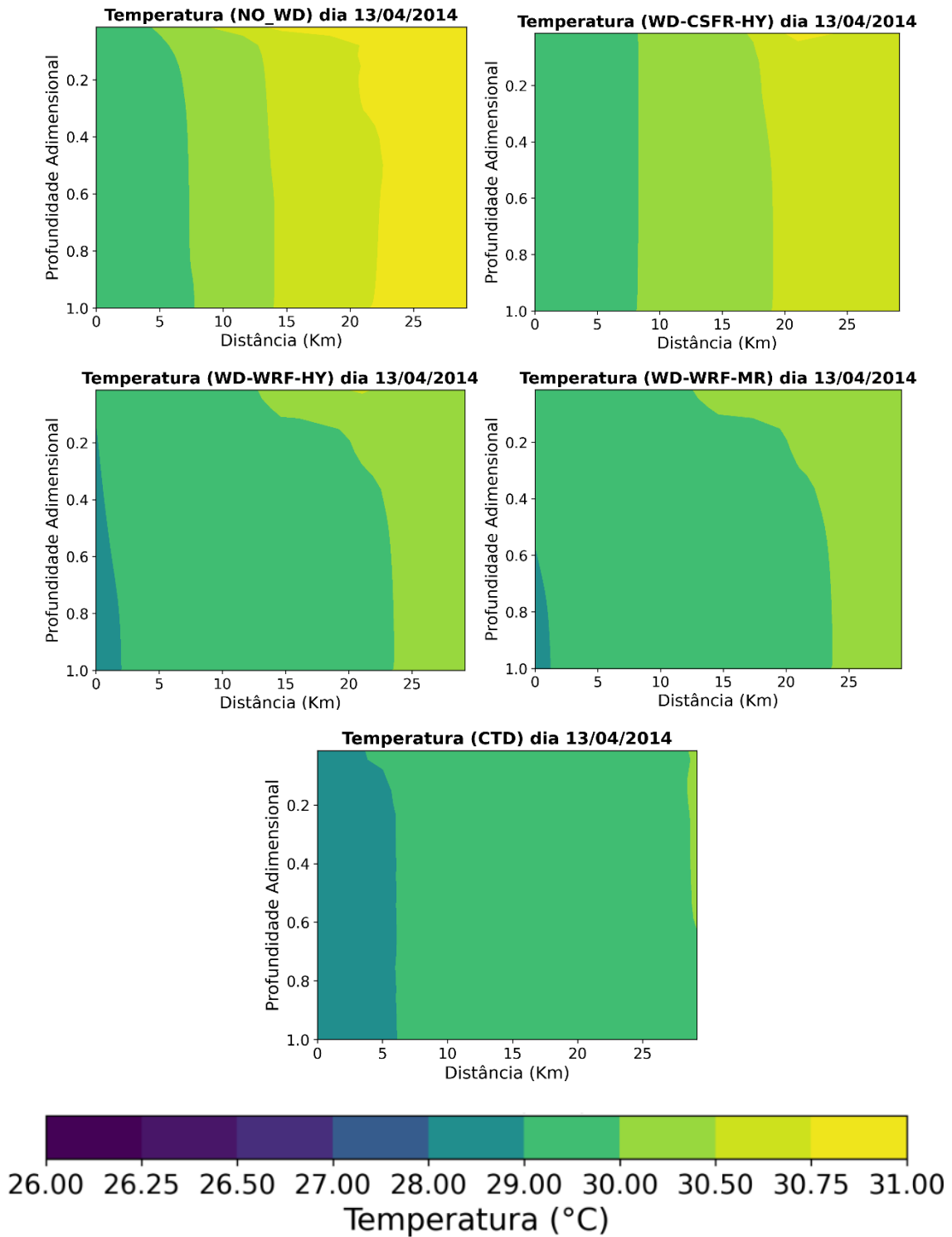


Figura A.3: Perfis de temperatura na campanha do mês de abril de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.

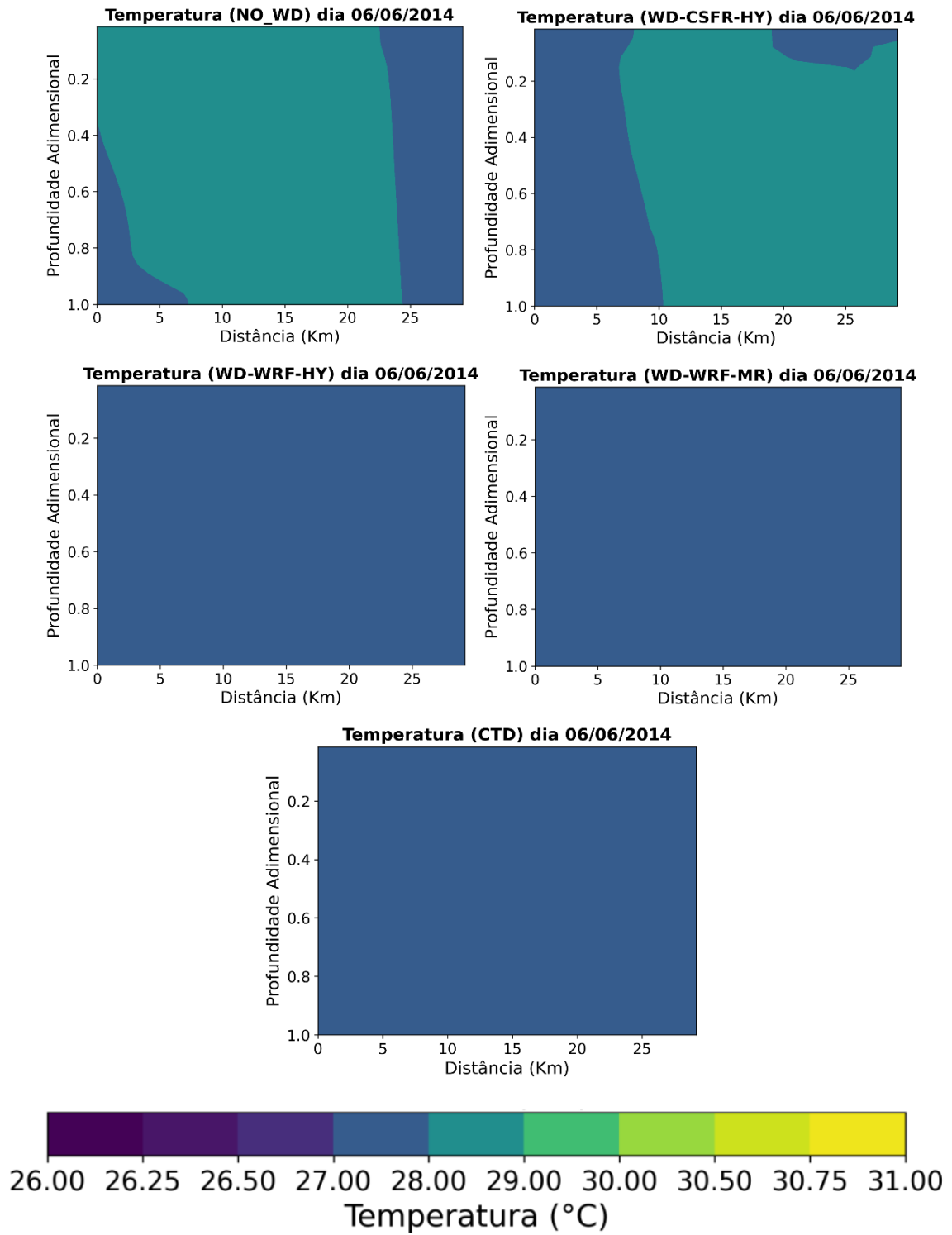


Figura A.4: O mesmo da Figura A.3, mas para a campanha de junho.

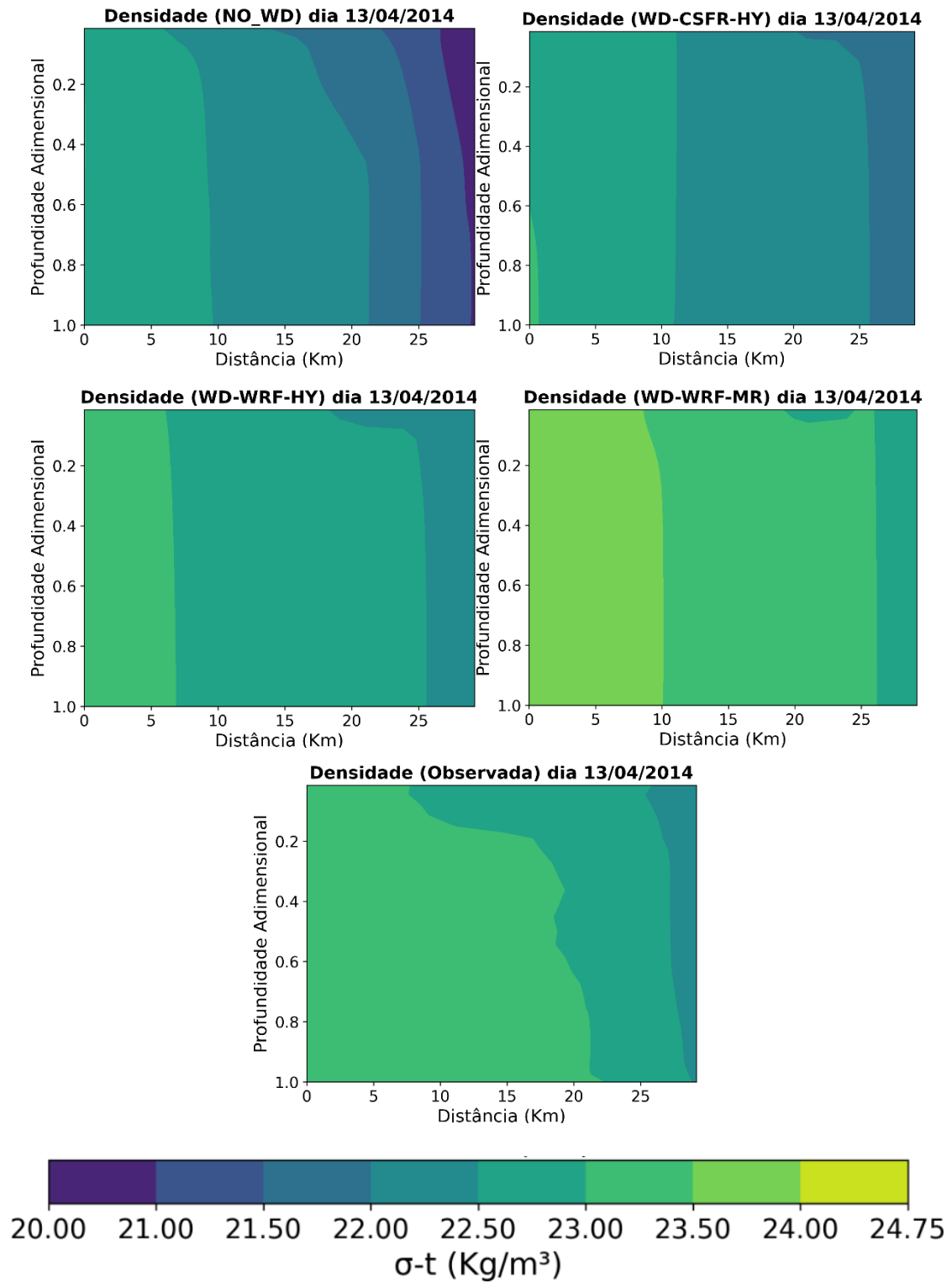


Figura A.5: Perfis de densidade na campanha do mês de abril de 2014 oriundos das quatro simulações e dados observados. O quadro superior esquerdo refere-se à simulação NO_WD, quadro superior direito a simulação WD-CFSR-HY, quadro médio esquerdo a simulação WD-WRF-HY, quadro médio direito a simulação WD-WRF-MR e quadro inferior refere-se aos dados observados com o CTD.

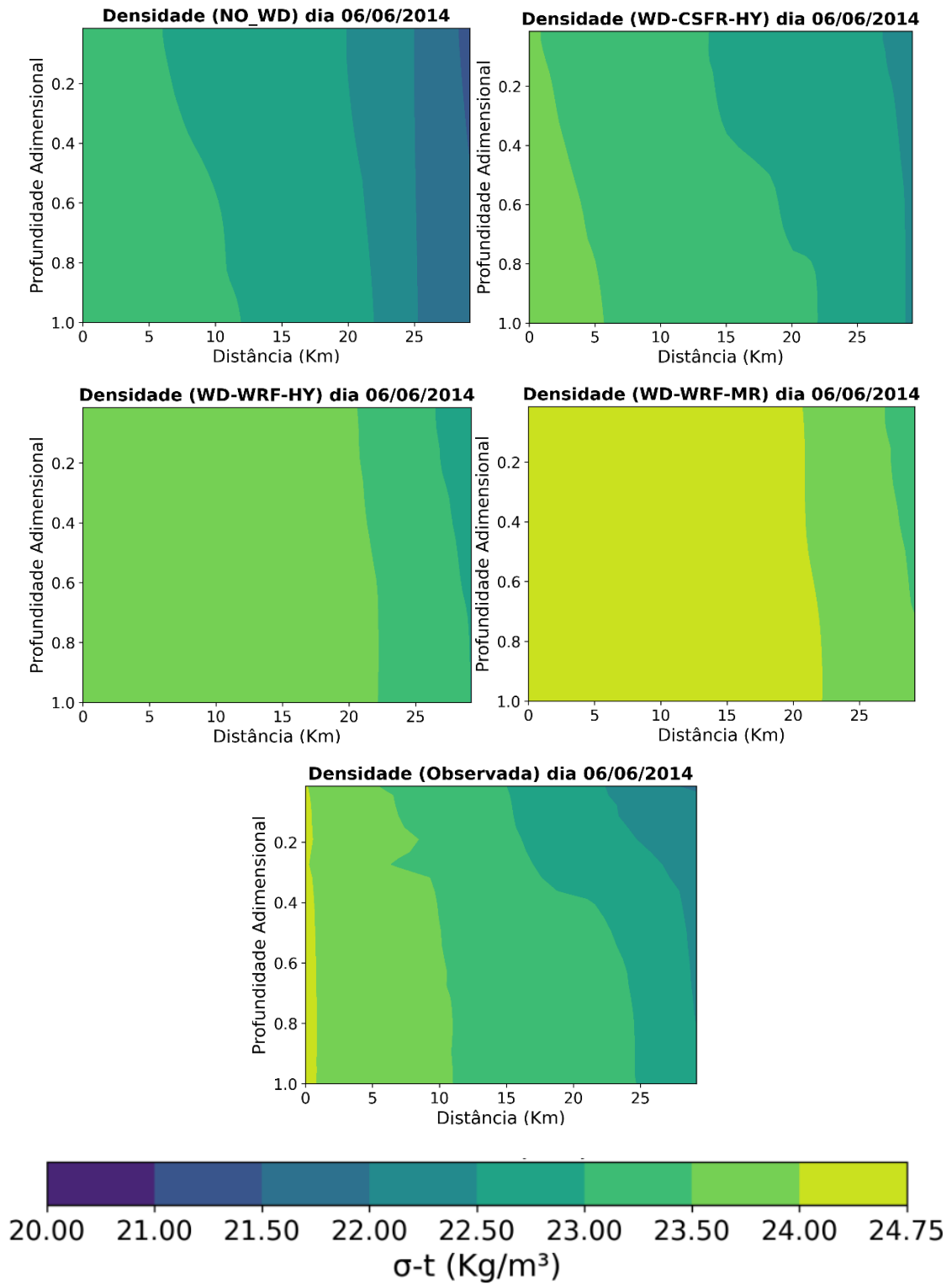


Figura A.6: O mesmo da Figura A.5, mas para a campanha de junho.