

ANÁLISE DE VIÉS E CORREÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE VENTO EM SUPERFÍCIE DO MODELO WRF A PARTIR DE DADOS DE ESCATERÔMETROS NA REGIÃO OCIDENTAL DO OCEANO ATLÂNTICO TROPICAL E SUL

Bruna Larissa R. dos Reis¹, Natalia Rudorff^{1,2}, Rogério Batista²

¹Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PGMET), ²Divisão de Satélites e Sensores Meteorológicos (DISSM), Coordenação Geral de Ciências da Terra (CGCT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

bruna.rabelo@inpe.br; natalia.rudorff@inpe.br; rogerio.batista@inpe.br

RESUMO

O vento em superfície a 10 m é essencial para entender as interações oceano-atmosfera. As saídas de vento na modelagem numérica carecem de boa representação de processos de menores escalas, e os escaterômetros, que são sensores orbitais projetados para estimar o vento *offshore*, são úteis como ferramentas de ajuste dos modelos com a observação. Portanto, esta pesquisa estimou e corrigiu o viés do modelo WRF usando o método de correção com escaterômetro na região ocidental do Atlântico Tropical e Sul, com dados dos escaterômetros ASCAT e HSCAT. Os resultados encontrados através de análises quantitativas e qualitativas mostraram que o WRF corrigido teve desempenho superior ao modelo sem correção, com melhor representação de processos de mesoescala como a formação de frentes e convecção, sendo útil para compor as condições iniciais e de contorno em experimentos numéricos em estudos de interação oceano-atmosfera.

Palavras-chave — Correção de viés; vento na superfície do mar; WRF; ASCAT; HSCAT.

ABSTRACT

The surface wind at 10 meters is essential for understanding ocean-atmosphere interactions. Wind outputs in numerical modeling lack good representation of smaller-scale processes, and scatterometers, which are orbital sensors designed to estimate offshore winds, are useful as tools to adjust models with observations. Therefore, this research estimated and corrected the bias of the WRF model using the scatterometer correction method in the western Tropical and South Atlantic region, with data from the ASCAT and HSCAT scatterometers. The results obtained through quantitative and qualitative analyses showed that the corrected WRF performed better than the uncorrected model, with improved representation of mesoscale processes such as front formation and convection, proving useful for composing the initial and boundary conditions in numerical experiments for ocean-atmosphere interaction studies.

Key words — Bias correction; sea surface wind; WRF; ASCAT; HSCAT.

1. INTRODUÇÃO

O campo de vento a 10 m na superfície do mar (U_{10}) desempenha um papel fundamental nos fluxos atmosféricos, sendo um dos principais agentes do transporte de calor e umidade, influenciando o clima global e gerando fenômenos como ciclones e vórtices. As aplicações do U_{10} são direcionadas principalmente para a modelagem numérica de previsão do tempo, ondas, circulação oceânica, dispersão de poluentes e de organismos, e para os estudos de interação oceano-atmosfera e climatologia, bem como para o setor de energia eólica *offshore*.

Os modelos numéricos têm evoluído com a aplicação de técnicas de assimilação de dados e inteligência artificial, mas ainda enfrentam desafios na representação precisa dos campos de U_{10} , principalmente em regiões costeiras e altamente dinâmicas. Dados de vento observacionais são obtidos de forma orbital por escaterômetros que fornecem médias relacionadas ao stress do vento que efetivamente contribui com os fluxos de momentum, gases e calor na interface oceano-atmosfera com maior precisão em relação aos modelos numéricos [1,2,3].

Estudos recentes utilizaram dados de escaterômetros para corrigir dados de vento dos produtos de reanálise do ECMWF (*European Centre for Medium-range Weather Forecasts*), resultando em melhora na representação de processos atmosféricos de menores escalas [4,5].

Esta pesquisa apresenta uma análise de viés das componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}) do U_{10} do modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) na região ocidental do Atlântico Tropical e Sul, usando dados de escaterômetros (ASCAT e HY-2), para identificar as regiões e processos com maiores incertezas e que precisam de melhora na parametrização do WRF, e um produto de correção para aplicações a posteriori.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo desta pesquisa abrange o oceano Atlântico Tropical e Sul, adjacente à costa brasileira, entre as coordenadas 10°N-40°S e 65°W-20°W (Figura 1), dentro da METAREA V, uma região marítima de responsabilidade do Brasil para previsões meteorológicas. Foram utilizadas seis bases de dados das componentes u_{10} e v_{10} do U_{10} ,

incluindo dados de satélite (escaterômetros ASCAT-B, ASCAT-C, HSCAT-B e HSCAT-C), observações *in situ* de quatro boias do programa PIRATA (*Prediction and Researched Moored Array in the Atlantic*) e simulações do modelo WRF. A análise foi realizada na janela temporal entre 01/04/2022 a 31/03/2023.

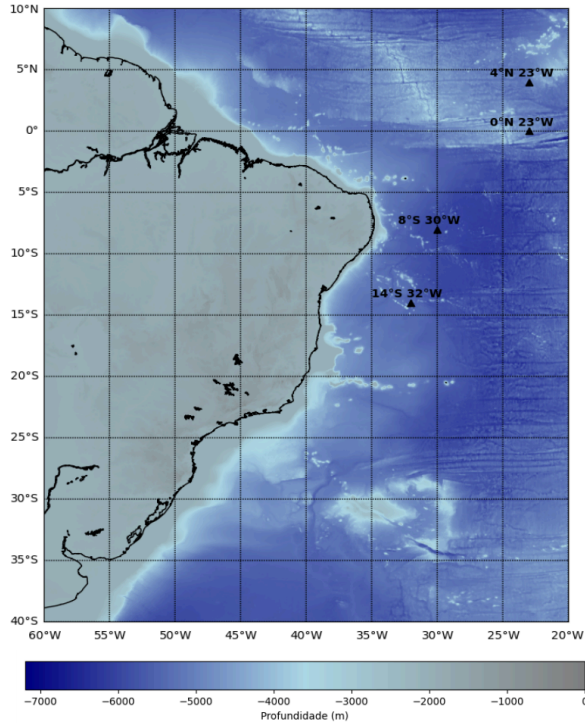


Figura 1. Área de estudo e localização das bóias PIRATA utilizadas.

Para determinar o viés do campo de U_{10} do WRF é necessário fazer o pareamento entre o modelo e a observação (i.e. os escaterômetros).

O modelo foi reamostrado da resolução de 7 km para a resolução de 12,5 km, enquanto que os dados dos sensores ASCAT e HSCAT foram integrados em um mosaico (denominado de SCAT) gerado para a área de estudo, onde foi mantida a resolução original do ASCAT (12,5 km), enquanto que o HSCAT foi reamostrado de 25 km para 12,5 km. Além disso, os dados dos sensores foram centrados nos horários das saídas do modelo (0, 1, 2 UTC, etc.) utilizando uma janela temporal de +/- 30 min.

O SCAT foi utilizado para estimar o viés instantâneo e o viés médio (SC) do modelo, que serviram para corrigir o modelo em cada horário e em cada ponto de grade. O SC foi estimado para as componentes u_{10} (Equação 1) e v_{10} (Equação 2) utilizando uma janela temporal de 3 dias centrada em torno de 12:00 UTC para suavizar erros de amostragem.

$$SC^1(i, j, t_f) = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \left(u_{10}^{SCAT_k}(i, j, t) - u_{10}^{WRFi}(i, j, t) \right) \quad (1)$$

$$SC^2(i, j, t_f) = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M \left(v_{10}^{SCAT_k}(i, j, t) - v_{10}^{WRFi}(i, j, t) \right) \quad (2)$$

As correções calculadas (SC^1 e SC^2) foram somadas às previsões do modelo (WRFi), gerando as saídas do modelo corrigidas (WRF*), conforme as equações:

$$u_{10}^{WRF*}(i, j, t_f) = u_{10}^{WRFi}(i, j, t_f) + SC^1(i, j, t_f) \quad (3)$$

$$v_{10}^{WRF*}(i, j, t_f) = v_{10}^{WRFi}(i, j, t_f) + SC^2(i, j, t_f) \quad (4)$$

Foi realizada também uma validação pontual, onde os dados de vento do SCAT, do WRFi e do WRF* foram comparados estatisticamente através das métricas de correlação de Pearson (r), viés e RMSE (*Root Mean Square Error*), com os dados *in situ* das boias PIRATA. As boias fazem as medições de vento a 3,5 m de altura, e foram ajustadas para a altura de 10 m com base na rugosidade aerodinâmica da superfície e no gradiente de densidade do ar [6]. Os dados das boias foram filtrados para remover discrepâncias de medição e considerados como referência na comparação.

Dentro da janela temporal de análise foi selecionado um estudo de caso referente ao dia 16/04/2022 às 12 UTC, quando houve a formação de uma frente fria intensa no sul da Bahia, causando chuvas fortes (114,2 mm em Cruz das Almas) [7].

Os campos de U_{10} corrigidos (WRF*) e a versão original (WRFi) para o dia 16/04/2022 às 12 UTC, foram comparados qualitativamente para avaliar a consistência geofísica do produto e identificar as regiões e processos atmosféricos com maiores incertezas na região ocidental Atlântico Tropical e Sul.

A imagem de reflectância no topo da atmosfera do sensor ABI (Advanced Baseline Imager) do satélite GOES 16 (Canal 02: 0,64 μ m) (Figura 2, a), o campo de magnitude (cores) e direção (vetores) do U_{10} , calculado a partir das componentes u_{10} e v_{10} do SCAT na escala Beaufort (Figura 2, b) foram utilizadas como referência para a identificação do posicionamento dos sistemas meteoceanográficos atuantes na região de estudo no dia 16/04/2022 às 12 UTC.

3. RESULTADOS

A análise comparativa entre os produtos de vento e os dados *in situ* das bóias (Tabela 1) mostrou que o SCAT teve o melhor desempenho, com r entre 0,72 e 0,89, RSME entre 0,79 e 1,25 m/s e viés com tendências negativas entre -0,45 e 0,21 m/s, para as componentes u_{10} e v_{10} , respectivamente. O WRFi apresentou o pior desempenho para todas as bóias, com correlações entre 0,45 e 0,81, RSME entre 1,21 e 1,96 m/s e vieses com tendências positivas entre -0,22 e 1,17 m/s. O WRF* teve um desempenho superior ao WRFi, com r entre 0,49 e 0,86, RSME entre 1,11 e 1,72 m/s e diminuição

das tendências de viés positivo com valores entre -0,46 e 0,33 m/s.

	r		RSME (m/s)		viés (m/s)	
	u_{10}	v_{10}	u_{10}	v_{10}	u_{10}	v_{10}
4N23W _{SCAT}	0,72	0,89	1,25	1,21	-0,45	-0,02
0N23W _{SCAT}	0,82	0,84	0,86	0,87	-0,06	0,25
8S30W _{SCAT}	0,73	0,87	0,79	0,89	-0,32	0,21
14S32W _{SCAT}	0,77	0,88	0,88	0,99	-0,44	0,04
4N23W _{WRFi}	0,49	0,81	1,76	1,96	-0,22	0,56
0N23W _{WRFi}	0,73	0,61	1,24	1,61	0,27	0,63
8S30W _{WRFi}	0,45	0,59	1,21	1,83	0,17	1,17
14S32W _{WRFi}	0,55	0,72	1,25	1,75	-0,03	0,89
4N23W _{WRF*}	0,61	0,86	1,55	1,72	-0,46	-0,03
0N23W _{WRF*}	0,77	0,66	1,11	1,33	-0,08	0,33
8S30W _{WRF*}	0,49	0,66	1,15	1,43	-0,26	0,33
14S32W _{WRF*}	0,62	0,78	1,21	1,42	-0,39	0,01

Tabela 1. Valores de correlação, RSME e Viés para u_{10} e v_{10} do U_{10} PIRATA com as demais bases de dados.

A partir das imagens de reflectância do topo da atmosfera (Figura 2, a) e do campo de vento do SCAT na escala Belford (Figura 2, b) foi possível observar a presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) (15-40°S e 24-20°W), Confluência Brasil Malvinas (CBM) (~ 30-36°S e 54-47°W), frente fria (~ 11-30°S e 45-25°W) e um ciclone extratropical (~ 28-45°S e 43-30°W) e a Zona de Convergência Interotropical (ZCIT) com banda dupla de nebulosidade, a primeira localizada entre ~ 7N-1°S e 50-25°W, e a segunda entre ~ 1N-3°S e 42-38°W. O campo de vento do SCAT apresentou magnitudes máximas e mínimas entre 17,86 m/s e 0,01 m/s, respectivamente.

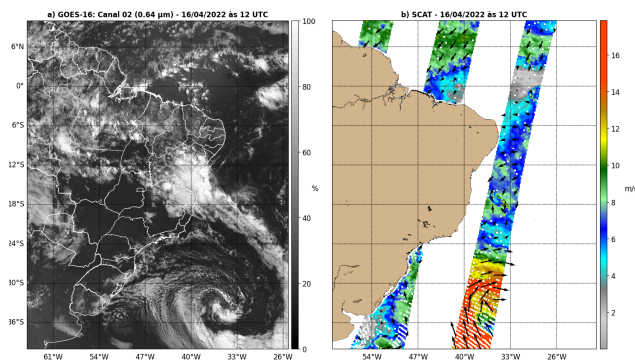


Figura 2. (a) Imagem ABI/GOES-16 e (b) campo do U_{10} SCAT na escala Belford.

Para o WRFi e WRF* (Figura 3) a componente u_{10} variou espacialmente entre -19,15 m/s e 12,91 m/s e -17,65 a 13,71 m/s, respectivamente. Enquanto que a v_{10} variou

entre -15,66 a 17,93 m/s (WRFi) e -15,92 a 21,72 m/s (WRF*). Nota-se que o WRFi subestimou os valores máximos da escala positiva (i.e. ventos de leste e sul), e superestimou a escala negativa (i.e. ventos de oeste e norte) das componentes u_{10} e v_{10} .

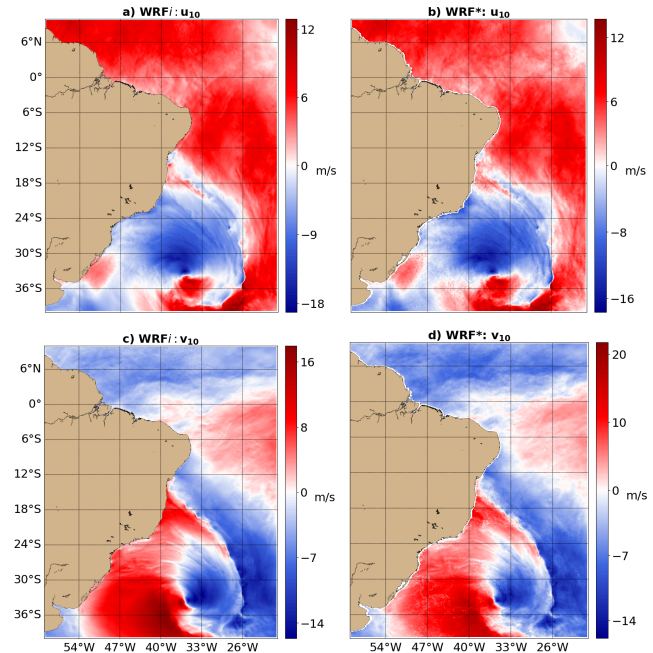


Figura 3. WRFi (a e c) e WRF* (b e d) para u_{10} e v_{10} no dia 16/04/2022 às 12:00 UTC.

O SC (Figura 4) apresentou valores máximos de 8,92 e 12,74 m/s e mínimos de -10,41 e -11,11 m/s, para as componentes u_{10} e v_{10} , respectivamente.

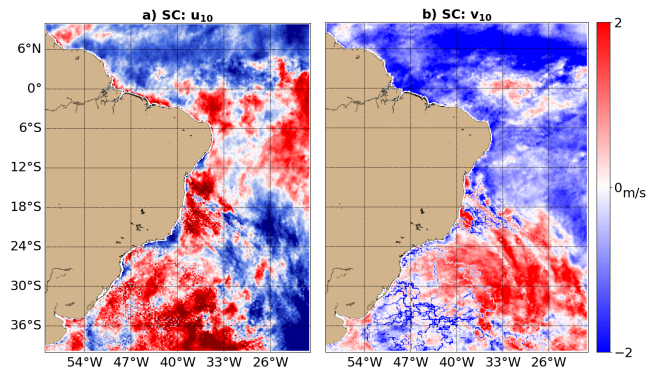


Figura 4. SC para o dia 16/04/2022 às 12:00 UTC: (a) u_{10} e (b) v_{10} .

4. DISCUSSÃO

O WRF* para as componentes u_{10} e v_{10} apresentou algumas melhorias pontuais em relação ao WRFi (Figura 3), incluindo menor suavidade espacial dos campos corrigidos indicando um aumento na variabilidade em pequena escala resultando em uma melhor captura na escala de variação do vento.

A Figura 2 mostra que a ZCIT teve banda dupla, porém, não foi observado isso para os campos WRFi e WRF* devido ao viés do modelo em representar processos convectivos na camada limite marinha. Entretanto, no WRF* a ZCIT encontra-se melhor delimitada em relação ao WRFi.

Melhorias também podem ser vistas na região da CBM, onde a componente u_{10} (Figura 3, a) foi subestimada pelo modelo, bem como na circulação ciclônica que está melhor delimitada, indicando melhorias na direção do vento. A frente fria na costa sul da Bahia, também obteve uma maior distribuição espacial no modelo corrigido, indicando melhora em representar características do vento acopladas às mesoescalas oceânicas (como a turbulência oceânica que tem um ciclo de vida de dias), assim como os fluxos em grande escala [5].

A componente v_{10} (Figura 3, b) do WRF* apresentou algumas linhas que são ruídos de correção, indicando neste caso que o WRFi superestimou a componente v_{10} , e mostra que a estimativa de viés médio a partir do SC melhorou a saída inicial do modelo atmosférico, corrigindo as áreas com intensidades de vento superestimadas.

Em relação ao SC (Figura 4) erros (na intensidade e direção) positivos (cores vermelhas) indicam uma subestimativa ou mudança na direção dos ventos na direção leste para a componente u_{10} e sul para a componente v_{10} , enquanto que os erros negativos indicam uma superestimativa ou mudança na direção dos ventos na direção oeste para a componente u_{10} e norte para a componente v_{10} .

Para u_{10} (Figura 4, a), os erros positivos podem ser notados nas latitudes tropicais sul (0° - 23° S) indicando falhas do WRFi em representar os fluxos em direção ao equador. O vento nessa região é bastante afetado por fenômenos como a ZCIT e a Ressurgência Equatorial do Atlântico que geram convecção, brisas marítimas e terrestres, frentes de rajada e ondas de gravidade atmosféricas, causando turbulência devido ao cisalhamento do vento e a um gradiente de temperatura vertical que desestabilizam a parte da atmosfera mais próxima da superfície do oceano (camada limite planetária - CLP) e modificam a dinâmica dos ventos superficiais [8].

Em relação à componente v_{10} (Figura 4, b) observa-se que o SC apresentou artefatos de processamento na região equatorial associados a ZCIT ($\sim 2^{\circ}$ N- 2° S e 33 - 24° W) e em maior quantidade nas regiões costeiras das latitudes abaixo de 14° S, na região da frente fria e da CBM. Isso é indicativo de uma região de intensa atividade mesoescala que foi superestimada pelo WRFi.

5. CONCLUSÕES

Ao avaliar-se a base de dados de escaterômetros (SCAT) foi possível concluir que as estimativas dos sensores se encontram próximas das medições *in situ* das bóias PIRATA, indicando boa calibração e qualidade dos dados. O

modelo corrigido (WRF*) obteve melhores resultados nas comparações estatísticas em relação ao modelo sem a correção (WRFi), indicando que a correção com escaterômetro melhorou as saídas do modelo WRF.

Portanto, os campos corrigidos se mostram úteis para compor as condições iniciais e de contorno em experimentos numéricos para a geração e propagação de ondas, a circulação oceânica, a dispersão de organismos, a dispersão óleo e outros poluentes no oceano, e também para os estudos de interação oceano-atmosfera e climatologia, auxiliando na melhora da representação de processos físicos nos modelos e a sua parametrização em grande escala em experimentos numéricos.

O WRFi apresentou os maiores vieses para a componente v_{10} , indicando um maior viés do WRFi em representar os fluxos meridionais.

Recomenda-se melhorar as parametrizações do modelo para corrigir erros relacionados a variabilidade do vento em superfície na mesoescala, que pode contribuir com os erros nos fluxos meridionais, associados a subestimativa da dinâmica dos ventos na camada limite atmosférica marinha e em maior escala ao enfraquecimento das células de circulação atmosféricas com possíveis implicações para a representação correta do movimento vertical atmosférico.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Kelly, K. A.; et al. Ocean currents evident in satellite wind data. **Geophys. Res. Lett.**, v. 28, n. 12, p. 2469-2472, 2001.
- [2] Chelton, D. B.; Freilich, M. H. Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models. **Amer. Meteorol. Soc.**, v. 133, n. 2, p. 409-429, 2005.
- [3] Bourassa, M. A.; et al. Remotely Sensed Winds and Wind Stresses for Marine Forecasting and Ocean Modeling. **Frontiers in Marine Science**, v. 6, 2019.
- [4] Trindade, A.; et al. ERAstar: A High-Resolution Ocean Forcing Product. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 58, n. 2, p. 1337-1347, 2020.
- [5] Rivas, M. B.; Stoffelen, A. Characterizing ERA-Interim and ERA5 Surface Wind Biases Using ASCAT. **Ocean Science**, v. 15, n. 3, p. 831-852, 2019.
- [6] Smith, S. D. Coefficients for sea surface wind stress, heat-flux, and wind profiles as a function of wind speed and temperature. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. C12, p. 15467-15472, 1988.
- [7] Centro de previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE. **Síntese Sinótica (Abril de 2022)**. Cachoeira Paulista - SP, 2022.
- [8] Skillingstad, E. D.; Vickers, D.; Mahrt, L.; Samelson, R. Effects of mesoscale sea-surface temperature fronts on the marine atmospheric boundary layer. **Bound.-Lay. Meteorol.**, v. 123, p. 219-237, 2007.