

COMPARAÇÃO DE ESTIMATIVAS DO VENTO NA SUPERFÍCIE DO MAR OBTIDAS PELO ESCATEROMETRO HY-2B COM BÓIAS METEOCEANOGRÁFICAS DO PROJETO PIRATA

Alana Magda Ribeiro de Sales¹, Milton Kampel², Antonio Geraldo Ferreira³, Vitor Galazzo de Paiva⁴

¹Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas 1758, SJC, SP, 12227-010, alana.sales@inpe.br; ^{2,3}Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas 1758, SJC, SP, 12227-010, milton.kampel@inpe.br; vitor.paiva@inpe.br;

³Universidade Federal do Ceará, Av. da Abolição 3207, Fortaleza, CE, 60165-081, antonio.ferreira@ufc.br

RESUMO

Escaterômetros orbitais fornecem estimativas da velocidade e direção do vento na superfície do mar com resoluções espaciais e temporais adequadas para múltiplas aplicações meteoceanográficas e estudos de interação oceano-atmosfera. Novos escaterômetros devem ser validados regionalmente. Foi realizado um esforço de validação das estimativas de vento obtidas pelo radar escaterômetro HSCAT a bordo do HY-2B em relação a medidas *in situ* obtidas por bóias fundeadas do projeto PIRATA, no Oceano Atlântico Equatorial (4-0N; 23W-0E). As estimativas de vento do HY-2B/HSCAT apresentaram boa concordância com as medidas *in situ*. Para a velocidade as correlações foram $> 0,74$, viés $< -0,65\text{m.s}^{-1}$, desvio padrão (σ) $< 1,93\text{m.s}^{-1}$ e o erro médio quadrático (RMSE) $< 1,63\text{m.s}^{-1}$. Para a direção as correlações foram $> 0,47$, com viés variando entre $-7,21 - 5,42 - 89,46^\circ$, σ entre $27,03$ a $89,46^\circ$ e o RMSE $< 40,92^\circ$.

Palavras-chave — Escaterômetro, HY-2B, bóias PIRATA, Oceano Atlântico Equatorial.

ABSTRACT

Orbital scatterometers provide estimates of sea surface wind speed and direction with spatial and temporal resolutions suitable for multiple meteoceanographic applications and ocean-atmosphere interaction studies. New scatterometers must be validated regionally. An effort was made to validate the wind estimates obtained by the HSCAT scatterometer radar on board the HY-2B in relation to in situ measurements obtained by moored buoys of the PIRATA project, in the Equatorial Atlantic Ocean (4-0N; 23W-0E). The wind estimates from the HY-2B/HSCAT showed good agreement with the in situ measurements. For velocity, correlations were > 0.74 , bias $< -0.65\text{m.s}^{-1}$, standard deviation (σ) $< 1.93\text{m.s}^{-1}$ and root mean square error (RMSE) $< 1.63\text{m.s}^{-1}$. For the direction the correlations were > 0.47 , with bias varying between $-7.21 - 5.42 - 89.46^\circ$, σ between 27.03 and 89.46° and the RMSE $< 40.92^\circ$.

Key words — Scatterometer, HY-2B, PIRATA buoys, Equatorial Atlantic Ocean.

1. INTRODUÇÃO

O campo de vento é essencial para determinar a circulação oceânica de larga escala que está ligada a processos oceânicos como a ressurgência costeira que fornece nutrientes para o fitoplâncton, aumentando a produtividade primária. É importante para os fluxos de calor na interface ar-mar que são essenciais para o entendimento de diversos processos como o transporte de umidade, ciclo de carbono, acidificação dos oceanos e mudanças climáticas. Informações precisas sobre vento e ondas são úteis para o tráfego marítimo que depende cada vez mais de alertas e previsões meteorológicas precisas [1,2,3].

Sensores a bordo de satélites e bóias meteoceanográficas permitem estimar o campo de vento na superfície do mar (VSM). Dados obtidos por satélites são fornecidos em escala global, podendo cobrir regiões remotas de difícil acesso para a obtenção de medidas *in situ* de forma rotineira. LIU [4] ressalta que os escaterômetros são os únicos instrumentos que, comprovadamente, fornecem medições dos vetores de vento na superfície do oceano em condições de céu claro ou nublado, de dia e de noite. No entanto, medições *in situ* ficam limitadas em sua distribuição espacial, com alto custo de aquisição, impactando na representatividade espacial e temporal dos campos de vento.

Apesar da boa resolução espacial e temporal dos dados obtidos por escaterômetros, ainda há a necessidade de se desenvolver esforços de validação regional e local. Uma forma de validação dessas estimativas é a comparação com dados medidos *in situ* por bóias meteoceanográficas.

Este trabalho apresenta uma comparação estatística entre estimativas do campo de VSM obtidas com o escaterômetro HY-2B e medidas *in situ* obtidas em bóias fundeadas do projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) na região do Oceano Atlântico Equatorial em situação de quase simultaneidade no tempo e espaço.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram obtidas séries temporais de velocidade e direção do campo de VSM medido por anemômetros instalados em 6 bóias meteoceanográficas do projeto PIRATA (<http://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/>).

As velocidades medidas a 3,5 m da superfície do mar (https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/help/help_terminology_f.html) foram extrapolados para 10 m de acordo com a metodologia proposta por Smith (1988, [4]).

O HY-2B foi lançado em outubro de 2018 pelo Serviço Nacional de Aplicativos Oceânicos por Satélite da China (NSOAS). Os dados de VSM obtidos pelo sensor HSCAT foram obtidos da EUMETSAT *Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility* (<https://osi-saf.eumetsat.int/>) em períodos concomitante aos dados *in situ* (2019-2021). Os dados HY-2B possuem resolução espacial de 25 km, com cobertura global ($\geq 95\%$) a cada 1-2 dias. Os dados são disponibilizados a 10 m da superfície do mar. Mais informações podem ser encontradas no site da NSOAS (https://osdds.nsoas.org.cn/HY2B_introduce).

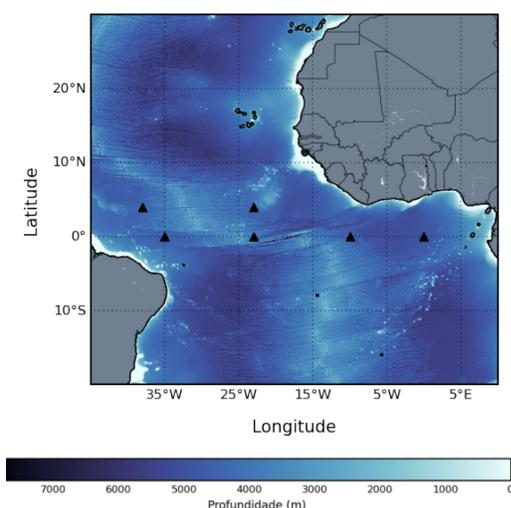


Figura 1. Localização das bóias PIRATA utilizadas no estudo.

Foram extraídos dados concomitantes do campo de VSM (velocidade e direção) obtidos por satélites e bóias. Foi considerada uma janela temporal de ± 1 hora de diferença entre os horários de aquisição de ambos os dados, dentro de um raio de 25 km em torno das posições das bóias.

As comparações estatísticas foram baseadas no coeficiente de correlação de Pierson (R), viés, desvio-padrão (σ) e erro médio quadrático (RMSE).

3. RESULTADOS

As velocidades médias medidas *in situ* variaram entre 5,3 - 6,6 m.s^{-1} nas bóias PIRATA a 4°N e entre 5,1 - 6,3 m.s^{-1} a 0°N. De modo geral, os maiores desvios ($> 2 \text{ m.s}^{-1}$) em relação às médias de velocidade foram observados nas bóias mais ao norte da área de estudo, com direções médias do quadrante NE-E e SE-S para as bóias 4N38W e 4N23W, respectivamente (Tabelas 1, 2, Figura 2). Os valores de desvio-padrão foram $< 2 \text{ ms}^{-1}$ na comparação das velocidades, mas alcançando valores de até 89° para as direções (Tabelas 1 e 2). Similarmente, os valores de RMSE

foram $< 2 \text{ ms}^{-1}$ para as velocidades e de até 41° para as direções (Tabela 3).

Os histogramas polares apresentam a distribuição de frequência do vento. Nota-se uma dominância de ventos do quadrante SE, principalmente nas bóias 0N10W, 0N23W e 0N35W. As bóias a 4N apresentam maior variação da direção do vento entre o quadrante NE-SE. As bóias apresentaram características típicas da região do Oceano Atlântico Tropical que é dominado pela Zona de Convergência dos ventos alísios que apresentam predominantemente ventos soprando de NE e SE, formando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)[5]. Analisando os histogramas polares do HY-2B e das bóias, nota-se uma boa concordância entre os dados.

BOIA	Vel. média (ms^{-1})		Vel. máx. (ms^{-1})		Vel. mín. (ms^{-1})		Desvio padrão (ms^{-1})	
	HY 2B	<i>In situ</i>	HY 2B	<i>In situ</i>	HY 2B	<i>In situ</i>	HY 2B	<i>In situ</i>
0N0E	4,93	5,09	8,94	7,9	0,46	1,5	1,51	1,36
0N10W	5,07	5,41	8,80	8,9	0,86	1,1	1,27	1,31
0N23W	5,29	5,93	9,89	10,9	0,18	0,7	1,61	1,80
0N35W	6,02	6,35	9,86	11,0	1,08	1,3	1,77	2,14
4N38W	6,37	6,63	10,67	11,3	0,88	1,5	1,93	2,10
4N23W	4,65	5,29	10,46	12,8	0,54	0,6	1,86	2,19

Tabela 1. Valores médios, máximos, mínimos e desvio-padrão das velocidades do vento.

BOIA	Direção média (°)		Desvio Padrão (°)	
	HY-2B	<i>in situ</i>	HY-2B	<i>in situ</i>
0N0E	175,52	176,95	29,28	29,52
0N10W	158,97	166,07	22,47	27,03
0N23W	131,68	130,13	30,83	33,50
0N35W	106,82	109,49	35,71	40,53
4N38W	96,74	98,95	51,96	63,17
4N23W	125,89	130,26	73,00	89,46

Tabela 2. Valores médios e desvio padrão da direção do vento.

De modo geral, as velocidades e direções do vento derivadas do HY-2B obtiveram uma boa correlação com os dados *in situ* (Tabela 3) variando entre 0,47 - 0,93 para a direção e 0,66 - 0,83 para a velocidade. Para a velocidade, o resultado do viés encontrado para todo o conjunto de bóias foi negativo ($-0,16$ a $-0,65 \text{ m.s}^{-1}$). O viés negativo é um indicativo do quanto a amostra subestima o dado de referência, ou seja, o quanto o HY-2B está subestimando em relação aos dados *in situ*.

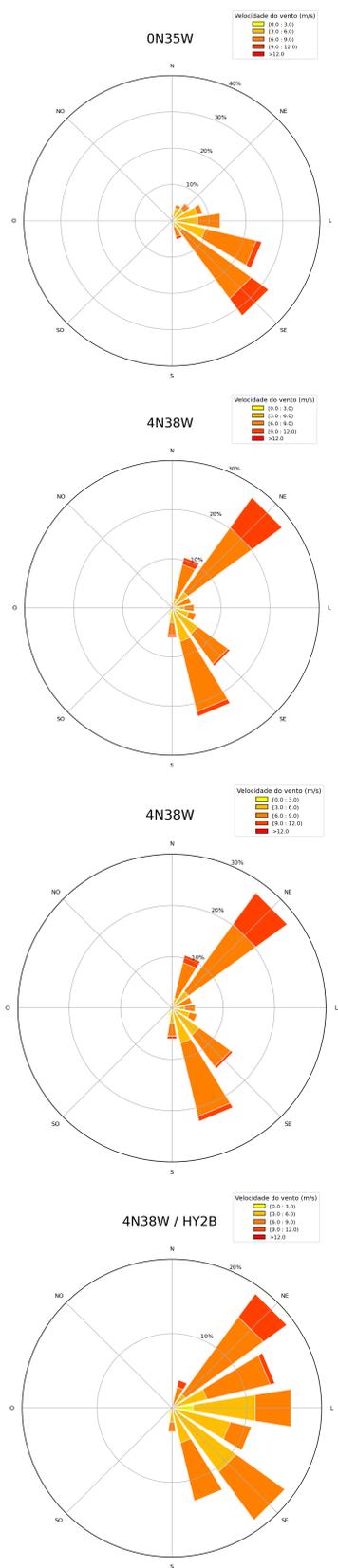


Figura 2. Histograma polar do HY-2B e bóias (0N35W e 4N38W).

BOIA	R		viés		RMSE	
	Vel.	Dir.	Vel. (ms ⁻¹)	Dir. (°)	Vel. (ms ⁻¹)	Dir. (°)
0N0E	0,76	0,71	-0,16	5,42	1,02	23,5
0N10W	0,66	0,47	-0,34	-7,21	1,11	27,8
0N23W	0,83	0,72	-0,65	1,64	1,19	24,7
0N35W	0,82	0,75	-0,32	-1,03	1,26	30,3
4N38W	0,78	0,93	-0,25	-0,02	1,35	27,9
4N23W	0,74	0,84	-0,64	1,86	1,63	40,9

Tabela 3. Estatística de correlação entre o HY-2B e dados *in-situ*.

4. DISCUSSÃO

As bóias PIRATA aqui utilizadas encontram-se na ZCIT que é uma região de confluência dos ventos alísios de NE e SE, migrando sazonalmente de sua posição mais ao norte, em torno de ~10°N em agosto-setembro, para sua posição ao sul, em torno de ~2°S em março-abril [6,7]. Este comportamento pode ser observado nos histogramas polares das bóias 4N38W e 0N35W (Figura 2) que apresentam ventos predominantes do quadrante SE-NE e SE, respectivamente. Desta forma, as direções medidas nas bóias e estimadas pelo HY-2B concordam com esse sistema meteorológico atuando nos trópicos. As comparações entre velocidades também foram consideradas satisfatórias, apresentando alta correlação.

Um estudo anterior reportado por Paiva et al. [8] compararam dados de vento obtidos pelo escaterômetro ASCAT na margem continental brasileira com dados de bóias obtendo boa concordância, com valores de RMSE entre 0,77 - 1,59 ms⁻¹, R entre 0,75 - 0,96 e viés entre -0,68 e 0,38 ms⁻¹, para velocidade e RMSE entre 12,7° - 46,8°, para direção.

WANG [9] comparou dados de vento HY-2B com dados *in situ* das bóias do *National Data Buoy Center* e *National Ocean Technology Center* no Atlântico Norte Ocidental e no Pacífico Norte Oriental obtendo bons resultados com RMSE entre 0,95-1,20 ms⁻¹ e 14,7°-25,7° para velocidade e direção do vento, respectivamente, indicando boa concordância entre os dados dentro das especificações de acurácia da missão (< 2 ms⁻¹ e < 20°).

Mais recentemente, Verhoef, Vogelzang e Stoffelen [10] reportaram um esforço de validação dos dados de VSM HY-2B em relação a medidas de bóias ancoradas em diferentes oceanos. O viés obtido foi de 0,11 ms⁻¹, com σ de 1,12 ms⁻¹ e 1,14 ms⁻¹ para as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente.

Conhecendo a limitação dos escaterômetros em representar velocidades do vento muito baixas ou altas [8,11], foram realizadas comparações do viés estatístico em intervalos de 1 ms⁻¹ (Figura 3). Observa-se que o viés

umenta para velocidades $< 3 \text{ ms}^{-1}$ e $> 11-12 \text{ ms}^{-1}$. Resultados similares também foram reportados por Paiva et al. [8] para comparações com o ASCAT na margem brasileira. De acordo com Carvalho et al. [12], ventos mais fracos produzem baixo retroespalhamento radar, dificultando as medidas pelos escaterômetros. Ainda segundo os mesmos autores, ventos mais fortes só podem produzir retroespalhamento proporcional na superfície do mar até um certo limite, após o qual não há mais retroespalhamento, mesmo que a velocidade do vento continue aumentando.

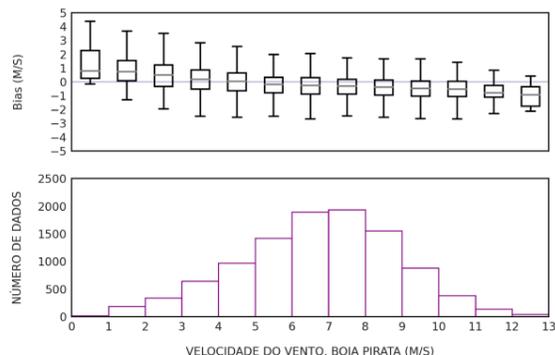


Figura 3. Comparações entre velocidades do vento medidas por bóias PIRATA e estimadas pelo satélite HY-2B. Em cima Box-plots por intervalo de 1 m.s^{-1} ; embaixo histograma de frequência da velocidade do vento.

5. CONCLUSÕES

Este estudo compara estimativas do vento na superfície do mar obtidas pelo escaterômetro orbital HY-2B com medidas *in situ* obtidas por bóias fundeadas no Oceano Atlântico Tropical. Os resultados estatísticos em termos do coeficiente de correlação, viés, desvio-padrão e RMSE indicam uma boa concordância tanto para as velocidades como para as direções do vento. Desta forma, sugere-se que as estimativas por satélite podem servir para preencher eventuais falhas nas séries temporais das bóias. Cabe notar que a cobertura espacial disponibilizada pelos satélites é maior do que se pode obter somente com os dados das bóias. Recomenda-se ainda, considerar ampliar o domínio geográfico das comparações, de modo a cobrir maior parte da Amazônia Azul.

8. REFERÊNCIAS

[1] BOURASSA, Mark A.; MEISSNER, Thomas; CEROVECKI, Ivana; CHANG, Paul S.; DONG, Xiaolong; CHIARA, Giovanna de; DONLON, Craig; DUKHOVSKOY, Dmitry S.; ELYA, Jocelyn; FORE, Alexander. Remotely Sensed Winds and Wind Stresses for Marine Forecasting and Ocean Modeling. *Frontiers In Marine Science*, [S.L.], v. 6, p. 23 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2019.00443>.
[2] Kite-Powell, H. L., and Colgan, C. S. (2001). *The Potential Economic Benefits of Coastal Ocean Observing Systems, the Gulf of Maine*. Washington, DC: US Department of Commerce;

National Oceanic and Atmospheric Administration; Office of Program Planning and Integration.
[3] Kite-Powell, H. L. (2011). The value of ocean surface wind information for maritime commerce. *Mar. Technol. Soc. J.* 45, 75–84. doi: 10.4031/MTSJ.45.1.13.
[4] LIU, W. T. Progress in scatterometer application. *Journal of Oceanography*, Springer, v. 58, n. 1, p. 121–136, 2002.
[5] 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.
[6] AGUIAR, Alessandro L.; MARTA-ALMEIDA, Martinho; CRUZ, Lilian O.; PEREIRA, Janini; CIRANO, Mauro. Forcing mechanisms of the circulation on the Brazilian Equatorial Shelf. *Continental Shelf Research*, [S.L.], v. 247, p. 104811, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2022.104811>.
[7] HASTENRATH, S.; LAMB, P. J. *Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific Oceans*. University of Wisconsin Press, 1977.
[8] CITEAU, J.; BERGÈS, J.-C.; DEMARCO, H.; MAHÉ, G. The watch of ITCZ migrations over the tropical Atlantic ocean as an indicator in drought forecast over the Sahelian area. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter*, n. 45, p. 1–3, 1988.
[8] PAIVA, Vitor; KAMPEL, Milton; CAMAYO, Rosio. Comparison of Multiple Surface Ocean Wind Products with Buoy Data over Blue Amazon (Brazilian Continental Margin). *Advances In Meteorology*, v. 2021, p. 1-19, 14 set. 2021. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2021/6680626>.
[9] WANG, He; ZHU, Jianhua; LIN, Mingsen; ZHANG, Youguang; CHANG, Yiting. Evaluating Chinese HY-2B HSCAT Ocean Wind Products Using Buoys and Other Scatterometers. *Ieee Geoscience And Remote Sensing Letters*, v. 17, n. 6, p. 923-927, jun. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lgrs.2019.294038>.
[10] Verhoef, A.; Vogelzang, J.; Stoffelen, A. Scientific Validation Report (SVR) for the HY-2 winds. 2021. EUMETSAT, OSI SAF, OCEAN AND SEA ICE. (https://scatterometer.knmi.nl/publications/pdf/osisaf_cdop3_ss3_svr_hy-2_winds.pdf).
[11] ANDERSON, C.; BONEKAMP, H.; DUFF, C.; FIGA-SALDANA, J.; WILSON, J. Analysis of ascats ocean backscatter measurement noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 50, n. 7, p. 2449–2457, 2012.
[12] CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. Silva. Comparison of reanalyzed, analyzed, satellite-retrieved and NWP modelled winds with buoy data along the Iberian Peninsula coast. *Remote Sensing Of Environment*, v. 152, p. 480-492, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.017>.