AFERIÇÃO DE MEDIDAS DE TEMPERATURA DA SUPERFICIE DO MAR E VELOCIDADE DO VENTO MEDIDOS POR SATÉLITES A PARTIR DE DADOS IN SITU NO ESTREITO DE BRANSFIELD, ANTÁRTICA.

Tiffany Laura Januci Teles de Mendonça [1], Marcelo Freitas Santini[1], Luciano Ponzi Pezzi [12]

[1] Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PGSER), Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010 [2] Divisão de Observação da Terra e Geoinformática (DIOTG), Coordenação Geral de Ciências da Terra (CG-CT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
{tiffany.mendonca; marcelo.santini ; luciano.pezzi}@inpe.br

RESUMO

Este estudo avalia os dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e velocidade do vento coletados a partir de medições *in situ* e dados de satélites no Estreito de Bransfield, Antártica. A análise revela uma correlação positiva entre os dados *in situ* e os dados de satélite AQUA/MODIS, para a TSM. Para os dados de vento, foram analisadas as relações entre dados *in situ* e dados do scaterômetro ASCAT a bordo dos satélites METOP-A e METOP-B, os resultados indicam baixas correlações, consideráveis diferenças nos valores médios, sugerindo discrepâncias nas medições dos satélites. A validação desses conjuntos de dados é crucial para compreender e adequadamente representar os processos de interação oceano-atmosfera.

Palavras-chave **—** Sensoriamento remoto, Validação de dados, Interação oceano-atmosfera, Antártica.

ABSTRACT

This study evaluates Sea Surface Temperature (SST) and wind speed data collected from in situ measurements and satellite data near Penguin Island, Antarctica. The analysis reveals a positive correlation between the in situ data and the AQUA/MODIS satellite data for SST. For wind data, the relationships between in situ measurements and data from the ASCAT scatterometer aboard the METOP-A and METOP-B satellites were analyzed. The results indicate low correlations and considerable differences in the mean values, suggesting discrepancies in the satellite measurements. Validating these datasets is crucial for understanding and adequately representing ocean-atmosphere interactions processes.

Key words **—** *Remote Sensing, Data Validation, Sea-Air interaction, Antarctica.*

1. INTRODUÇÃO

O Oceano Austral desempenha um papel fundamental na regulação do clima global. Este oceano atua como um reservatório de calor e CO_2, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas [7]. No entanto, sua localização remota e condições inóspitas dificultam a coleta de dados, resultando em lacunas significativas no monitoramento climático. A ampliação do conhecimento sobre o Oceano Austral é essencial para respondermos a questões críticas sobre o sistema climático global [12].

A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) tem um papel central na regulação do conteúdo de calor do oceano, influenciando diretamente as trocas de calor, umidade e gases (como o CO_2) entre o oceano e a atmosfera [1]. Como indicador de mudanças climáticas, variações na TSM refletem alterações no balanço energético do oceano, essencial para o clima em escala regional e global [9]. No Oceano Austral, a TSM impacta significativamente o regime de gelo marinho, além das trocas de energia entre a superfície e a atmosfera. Estudos anteriores, como os de [4] e [11], apontaram uma tendência de ligeira diminuição na TSM e uma leve expansão na extensão do gelo marinho no Oceano Austral. No entanto, nos últimos anos, essa tendência vem mudando, com a Antártica registrando novos recordes de mínima cobertura de gelo, sendo o mais recente em 2023 [8].

O regime de ventos na região do Oceano Austral é outro fator crucial para o clima e as interações oceano-atmosfera. Essa região é caracterizada por fortes ventos, que geram intensas correntes oceânicas, como a Corrente Circumpolar Antártica. Esses ventos agem no transporte calor e umidade.

A validação de dados no Oceano Austral é crucial para assegurar a precisão das observações. Esta região, devido às suas condições extremas e isolamento, possui cobertura de dados limitada, o que frequentemente exige o uso de dados de satélite para monitoramento climático e ambiental [12].

Este estudo visa avaliar dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e de velocidade do vento obtidos por sensoriamento remoto na região do Estreito de Branfield, na Antártida, usando medições *in situ* coletadas pelo projeto *AnTarctic Modelling Observation Systems* (ATMOS). Dado o papel crucial do Oceano Austral no clima global, especialmente nas trocas de calor e CO_2, a validação desses dados é essencial para melhorar a precisão dos modelos climáticos, adequadamente representar os processos de interação oceano-atmosfera e fortalecer o monitoramento ambiental em alta latitude.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O projeto ATMOS é parte do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e tem como objetivo aprimorar a compreensão das interações entre gelo marinho, atmosfera, oceano e ondas, além das trocas de calor, momento e CO_2 na interface oceano-atmosfera no Oceano Austral. Uma de suas principais linhas de ação é a coleta de dados *in situ*, realizada pela instalação de uma torre micrometeorológica no Navio Polar Almirante Maximiano (H41), da Marinha do Brasil. Além disso, outra torre é montada na Ilha Reio George, que faz parte do arquipélago das Shetlands do Sul. Com o objetivo de coletar dados meteoceanográficos, uma boia de ondas foi fundeada nas proximidades da Ilha Pinguim.

As coordenadas do fundeio são em 62º 11.729' S e 058º 07.941' O [5] (Figura 1). A escolha do local para fundeio levou em consideração dois fatores: a proximidade da boia com a torre micrometeorológica em terra, e o levantamento batimétrico em águas com cerca de 80 m de profundidade.



Figura 1. Configuração do sistema de fundeio. Mostra a boia marcadora com os sensores meteo-oceanográficos acoplados (à esquerda), o NPo. Alte. Maximiano ao fundo, flutuador (no centro) e boia de ondas (à direita). Fonte: Cedida pelo laboratório ode Estudos do Oceano e da Atmosfera (LOA)

Foi instalada uma boia de ondas tipo spotter (SOFAR Ocean) com um sensor de temperatura da superfície do mar de alta precisão acoplado à corrente desta. Para garantir medições precisas, o movimento da boia ondulatória precisa ser otimizado. Assim, a boia de ondas é presa a um flutuador que está conectada a uma boia marcadora. Esta outra boia tem sensores para medições atmosféricas (vento, temperatura, umidade e pressão barométrica) e oceanográficas (temperatura e condutividade da água do mar). A boia de medidas de ondas, fornece também dados de velocidade dos ventos derivados a partir de medidas espectrais [6]. Na Figura 2 podemos observar o esquema de fundeio da boia.

Foram utilizados quatro sensores diferentes para as medições de TSM. Para facilitar a comparação com os dados de satélite, foi calculada a média dos dados dos quatro sensores. São eles, um sensor de temperatura na boia de ondas, um sensor RBR localizado abaixo da boia de ondas, em sua corrente, e os sensores Odyssey logger e Hobo pendante instalados no pé metálico abaixo da boia de sinalização.

Os dados de sensoriamento remoto de TSM foram obtidos a partir do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA, em operação desde 2002 [10]. Este sensor oferece uma resolução espacial de 4 km e uma resolução temporal diária, com uma órbita polar. Os dados estão disponíveis para download sob solicitação no site da *Ocean Color* da NASA.

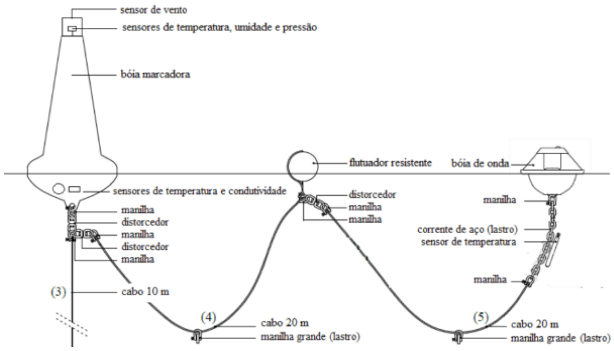


Figura 2. Esquema de fundeio da boia de onda (à direita), flutuador (no centro) e a boia sinalizadora (à esquerda). Fonte: Cedida pelo (LOA)

Os dados de velocidade do vento foram adquiridos por meio do scaterômetro ASCAT a bordo dos satélites METOP-A e METOP-B, ambos com resolução espacial de 0,125° x 0,125° e resolução temporal diária, também em órbita polar [2]. Para minimizar lacunas nos dados, foram utilizados produtos de órbita ascendente e descendente.

Os dados do projeto ATMOS foram coletados durante a Operação Antártica 38, durante o verão austral (de outubro a fevereiro). As séries temporais abrangem o período de 9 de novembro de 2019 (data de instalação da boia) a 5 de março de 2020 (data de recolhimento dos equipamentos).

4.1.1. Análises Estatísticas

Foram realizadas análises estatísticas, a fim de averiguar a relação entre as medições. Essas análises estatísticas são fundamentais para entender e interpretar os dados, permitindo a exploração de relações entre os diferentes sensores. Foram elas, o Desvio Padrão: mede a dispersão em um conjunto de dados, um desvio padrão baixo indica que os dados estão próximos da média, enquanto um desvio padrão alto indica que os dados estão mais espalhados. Variância: corresponde ao o quadrado do desvio padrão e representa a média dos quadrados das diferenças em relação à média. Erro Quadrático Médio (MSE, do *inglês Mean Squared Error*): estima a média dos quadrados dos erros, que são as diferenças entre os valores observados e os valores previstos, quanto menor o MSE, melhor é o ajuste do modelo aos dados.

Correlação de Pearson (r): mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis contínuas. O coeficiente de correlação de Pearson varia de -1 a 1, onde: 1 indica uma correlação positiva perfeita, -1 indica uma correlação negativa perfeita, 0 indica nenhuma correlação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados obtidos foram elaboradas séries temporais da TSM entre novembro de 2019 e março de 2020, durante o verão Austral. Na Figura 3, as linhas coloridas representam a TSM registrada pelos sensores da boia, que variam entre -1°C e 2,5°C. As quatro medições da boia exibem comportamento muito semelhante, então, para facilitar a interpretação, foi calculada a média entre elas (linha vermelha). A linha preta representa os valores de TSM obtidos pelo sensor AQUA/MODIS. Nota-se que os valores de TSM do satélite são mais irregulares, variando aproximadamente entre -1°C e 4°C, com picos máximos superiores aos registrados pelos dados da boia.

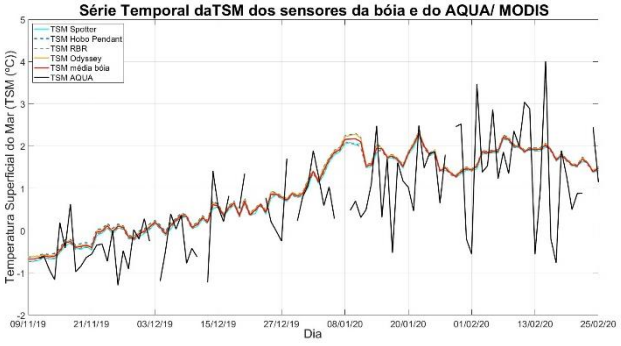


Figura 3. Série Temporal da TSM, as linhas azul clara, azul escura cinza e amarela representam a TSM dos sensores da boia, a linha vermelha a média dos quatro sensores e a linha preta a TSM estimada pelo satélite AQUA/MODIS.

Na Tabela 1, são apresentas resultados dos diferentes produtos avaliados. A média dos dados da boia apresentou desvio padrão e variância de 0,87 e 0,76, respectivamente, enquanto os dados do AQUA/MODIS apresentaram valores de 1,12 e 1,25.

Sensores	Média	Desvio padrão	Variância
TSM - Média boia	0,99	0,87	0,76
TSM - AQUA	0,61	1,12	1,25
Vento - boia	4,62	2,47	6,13
Vento - Metop-A	6,25	3,84	14,76
Vento - Metop-B		3,70	13,75

Tabela 1. Análises estatísticas da Média, Desvio Padrão e Variância para TSM e velocidade do vento.

Esses valores indicam uma maior dispersão dos dados do satélite, possivelmente devido à sua resolução espacial de 4 km, o que pode afetar a precisão ao se tratar de um ponto específico, como no presente estudo. Outro fator que pode influenciar essa diferença é a variabilidade atmosférica, já que a região tem alta frequência de passagem de sistemas meteorológicos, o que pode afetar a medição remota [3].

Na Tabela 2, análises estatísticas adicionais ilustram a relação entre os dados *in situ* e os de satélite. A correlação de Pearson de 0,60 indica uma correlação positiva entre os dados de TSM, sugerindo uma relação direta entre as medidas.

Sensores	Correlação de Pearson	MSE
Média boia	0,91	1,32
AQUA	0,60	0,97
Vento – Metop-A	-0,91	23,45
Vento – Metop-B	0,11	22,98

Tabela 2. Análises estatísticas de Correlação de Pearson e MSE para TSM e velocidade do vento.

Esse comportamento também pode ser observado na Figura 4, que mostra a dispersão dos dados, indicando que as duas séries seguem tendências semelhantes. O MSE de 0,97 sugere que há uma margem de erro nas estimativas do satélite em relação às medições diretas da boia, ressaltando a importância da validação com dados *in situ*.

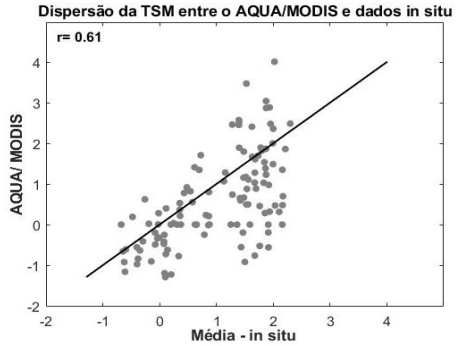


Figura 4. Gráfico de dispersão da TSM entre o satélite AQUA/MODIS e a média da TSM da boia.

Na Figura 5, são apresentadas as séries temporais da velocidade do vento para o período de 29 de dezembro de 2019 a 1º de março de 2020. As linhas azuis e cinza representam os dados dos satélites METOP A e METOP B, respectivamente, enquanto a linha preta mostra os dados da boia. A variação dos valores dos dados da boia vai de aproximadamente 0 a 12 m/s, enquanto os satélites variam entre 1 e 14 m/s. Como esperado, as medições de vento não apresentam um comportamento linear devido à natureza dinâmica da velocidade do vento.

As análises estatísticas (Tabelas 1 e 2) mostram que os dados da boia têm um desvio padrão e variância de 2,47 e 6,1395, respectivamente, enquanto os satélites METOP A e B apresentam valores de desvio padrão de 3,84 e 3,70 e variâncias de 14,76 e 13,75, respectivamente. Isso indica uma maior dispersão dos dados dos satélites, especialmente para o METOP A, sugerindo que os dados dos satélites são mais variáveis e menos consistentes em relação às medições da boia.

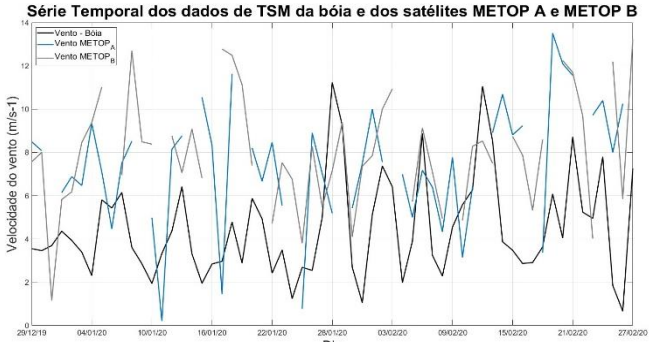


Figura 5. Série Temporal do vento, a linha preta representa os dados de velocidade do vento da boia e as linhas azul e cinza representam os satélites METOP A e METOPB.

A correlação de Pearson entre a boia e o METOP A é praticamente nula, -0,01, indicando ausência de correlação linear significativa entre os dois conjuntos de dados. Para o METOP B, a correlação de Pearson é ligeiramente positiva 0,11, mas ainda muito fraca, quase irrelevante, sugerindo apenas uma leve associação. Esses comportamentos podem ser visualizados nos gráficos de dispersão na Figura 6.

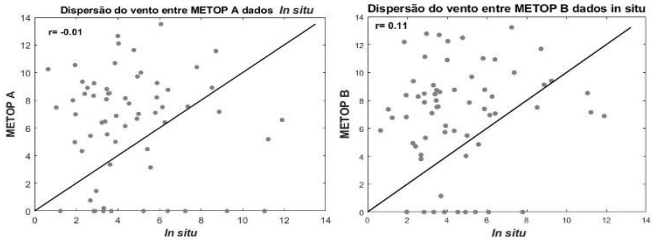


Figura 6. Gráfico de dispersão do vento entre o satélite METOP A (à esquerda) e a boia e METOP B (à direita).

Os valores do MSE para o METOP A e METOP B em relação aos dados obtidos pela boia são, respectivamente, 23,45 e 22,98, ambos indicando uma discrepância considerável entre os dados dos satélites e os da boia. Essa diferença aponta para uma precisão limitada dos satélites em relação às medições da boia, com o METOP B apresentando uma ligeira vantagem sobre o METOP A em termos de proximidade aos valores de referência da boia.

5. CONCLUSÕES

Embora os satélites AQUA/MODIS e METOP forneçam dados importantes para o monitoramento da TSM e do vento em regiões remotas, existem limitações em sua precisão quando comparados a medições *in situ*. Esses resultados ressaltam a importância da validação local com dados *in situ* para garantir a confiabilidade dos dados de sensoriamento remoto. A partir das análises realizadas, observamos que os dados de TSM e velocidade do vento dos satélites apresentam maior variabilidade em relação aos dados da boia, evidenciada pelo maior desvio padrão e variância dos dados de satélite em ambas as variáveis. A validação de dados de satélite com medições *in situ* desempenha um papel crucial na precisão e confiabilidade dos dados de sensoriamento remoto, especialmente quando aplicados ao estudo de interações oceano-atmosfera, como para obtenção de fluxos turbulentos de calor e momentum. Esses fluxos turbulentos são fundamentais para a transferência de calor, umidade e gases entre o oceano e a atmosfera apresentam uma sensibilidade a variações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e na velocidade do vento. Assim, além do presente trabalho apresentar a importância da obtenção da coleta de dados in situ em regiões remotas, é destacado o quão o processo de validação é indispensável para ajustar e melhorar algoritmos de satélites, permitindo uma melhor representação das condições ambientais extremas e dinâmicas do Oceano Austral.

8. REFERÊNCIAS

[1] A. C. P. A. Palmeira, et al. Relação entre a temperatura da superfície do mar e a camada de mistura oceânica sob a passagem de ciclones extratropicais no atlântico sudoeste. *Revista Brasileira De Meteorologia*, v. 30, pp. 89–100, 2015.

[2] Copernicus Marine Service. https://doi.org/10.48670/moi-00183

[3] D. S. Lindemann, F. B. Justino. A influência dos modos de variabilidade climática na temperatura em superfície na Antártica, Ver. Bras. Meteorologia v.3 pp. 214-222, 2015.

[4] J. C. Comiso, Variability and trends in Antarctic surface temperatures from *In Situ* and satellite infrared measurements, *Journal of Climate*. V.**13**, pp. 1674–1696, 2000.

[5] J. J. Voermans, *et. al*. Wave Anomaly Detection in Wave Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol*, v.**38**, pp. 525–536, 2021.

[6] J. N. Beckman and J. W. Long. Quantifying errors in wind and wave measurements from a compact, low-cost wave buoy. *Frontiers in Marine Science*, v. 9, 2022.

[7] J. Turner, *Antarctic climate.* Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Academic Press, pp. 135-142, 2003.

[8] L. A. Roach, W. N. Meier. Sea ice in 2023. *Nat Rev Earth Environ*, v.**5**, pp. 235–237, 2024.

[9] M. Maheshwari, et al., An Investigation of the Southern Ocean Surface Temperature Variability Using Long-Term Optimum Interpolation SST Data. *Intern. Scholarly Res. Notices*, pp. 9 2013.

[10] NASA. Ocean Color. https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/

[11] S. A. Lebedev, Inter-annual trends in the Southern Ocean Sea surface temperature and sea level from remote sensing data, *Russian Journal of Earth Sciences*, v.9, 2007.

[12] S. Swart, et.al . Constraining Southern Ocean Air-Sea-Ice Fluxes Through Enhanced Observations. *Frontiers in Marine Science*, v. 6, pp. 1-9, 2019.