

## Influência das feições de mesoescala oceânica do Atlântico Sudoeste na baixa atmosfera

Luciano P. Pezzi<sup>1</sup>, Marcelo F. Santini<sup>1</sup>, Ronald B. Souza<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Estudos do Oceano e da Atmosfera (LOA), Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), [luciano.pezzi@inpe.br](mailto:luciano.pezzi@inpe.br); [marcelo.santini@inpe.br](mailto:marcelo.santini@inpe.br); <sup>2</sup> Divisão de Modelagem Numérica do Sistema Terrestre (DIMNT), Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), [ronald.buss@inpe.br](mailto:ronald.buss@inpe.br)

### RESUMO

Neste estudo, o papel das feições de mesoescala oceânica foi investigado sob o ponto de vista de sua influência direta, na escala meteorológica sinótica, sobre a baixa atmosfera no Oceano Atlântico Sudoeste. Um vórtice oceânico, anticiclônico e de núcleo quente (VNQ), que se despreendeu da Corrente do Brasil (CB), foi amostrado no mar a partir de navio. Esse VNQ desestabiliza as camadas mais baixas da atmosfera sobrejacente e os fluxos de calor, momentum e CO<sub>2</sub> trocados na interface oceano-atmosfera foram estreitamente correlacionados com a temperatura da superfície do mar (TSM). O aumento da TSM no núcleo do VNQ claramente resultou em maiores magnitudes de todos os fluxos investigados. A presença de águas quentes e tropicais trazidas pelo VNQ em uma região oceânica de latitudes médias que é tipicamente sumidouro de CO<sub>2</sub>, faz com que a região se torne uma fonte desse importante gás de efeito estufa, com consequências climáticas ainda pouco compreendidas.

**Palavras-chave:** vórtice oceânico, interação oceano-atmosfera, fluxos de calor, fluxos de momentum, fluxos de CO<sub>2</sub>.

### ABSTRACT

In this study, the role of oceanic mesoscale features was investigated from the point of view of their direct influence, on the synoptic meteorological scale, on the lower atmosphere in the Southwest Atlantic Ocean. A warm core eddy (WCE), which broke off from the Brazil Current (CB), was sampled at sea from a ship. This WCE destabilizes the lower layers of the overlying atmosphere and the fluxes of heat, momentum and CO<sub>2</sub> exchanged at the ocean-atmosphere interface were closely correlated with the sea surface temperature (SST). The increase in SST in the WCE core clearly resulted in higher magnitudes of all investigated fluxes. The presence of warm and tropical waters brought by the WCE in an oceanic region of mid-latitudes that is typically a CO<sub>2</sub> sink, makes the region a source of this important greenhouse gas, with climatic consequences still poorly understood.

**Key words** – Warm core eddy, air-sea interaction, turbulent fluxes, momentum fluxes, CO<sub>2</sub> fluxes.

### 1. INTRODUÇÃO

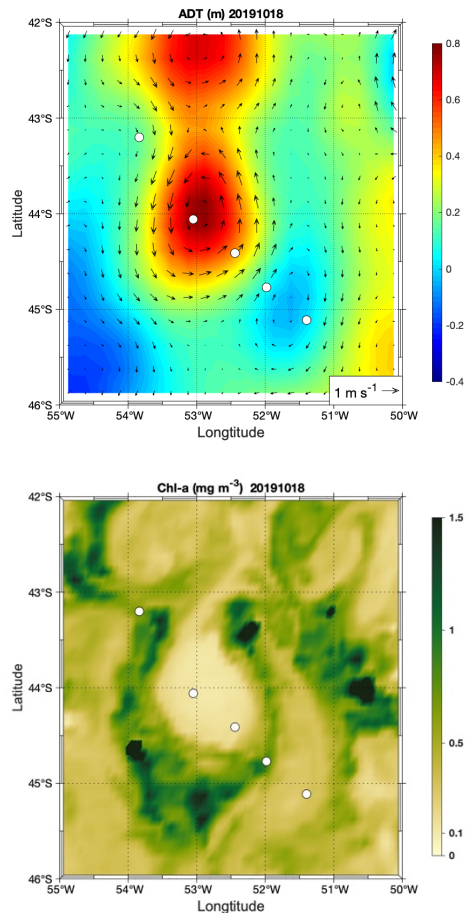
O presente trabalho foi conduzido pelo Laboratório de Estudos do Oceano e da Atmosfera (LOA) do INPE, durante o primeiro cruzeiro oceanográfico do projeto “Sistema de Modelagem e Observação da Antártica - ATMOS” no âmbito do PROANTAR (CNPq/MCTI). O projeto ATMOS, em colaboração com o projeto INCT Criosfera, utiliza dados meteorológicos e oceanográficos coletados *in situ* a partir de navios, dados de satélites e emprega técnicas computacionais modernas através do uso de modelos regionais acoplados oceano-atmosfera-biogeocímica (Pezzi et al. 2016b; Souza et al. 2021; Pezzi et al. 2021). Aqui são apresentados os impactos causados por uma estrutura de mesoescala oceânica - um VNQ - na modulação da baixa atmosfera, mais precisamente na camada limite atmosférica marinha (CLAM) localizado em latitudes médias do Oceano Atlântico Sudoeste. Esse VNQ teve a capacidade de modificar a estrutura dinâmica e termodinâmica da CLAM na baixa atmosfera sobrejacente, além de modificar as próprias condições oceânicas das águas que o circundavam durante nosso experimento de campo (Figura 1).

### 2. MATERIAL E MÉTODOS

Todos os dados *in situ* foram coletados a bordo do Navio Polar (NPo) Almirante Maximiano (H-41) da Marinha do Brasil durante o cruzeiro ATMOS-1, entre os dias 18 a 19 de outubro de 2019 no Oceano Atlântico Sudoeste. Além de dados oceanográficos e meteorológicos convencionais de XBT, CTD e radiossondas, o navio também utilizou uma torre micrometeorológica com sensores para realizar medições de alta frequência (20 Hz) dos fluxos de calor, momentum e CO<sub>2</sub> entre o oceano e a atmosfera. Durante o período de estudo, o navio cruzou um VNQ. A torre micrometeorológica foi instalada na proa do navio seguindo metodologia descrita em (Pezzi et al. 2016a; Hackerott et al. 2018; Oliveira et al. 2019; Santini et al. 2020; Souza et al. 2021; Pezzi et al. 2021). Os dados recolhidos são processados utilizando a metodologia da covariância de vórtices (CV) para obter fluxos médios a cada 30 segundos.

Dados de satélite de TSM em alta resolução derivados do sensor Multi-scale Ultra-High Resolution (MUR) também foram utilizados para descrever os campos horizontais e gradientes dessa variável na superfície do mar nos dias da campanha de campo. Dados de satélite também foram

usados para descrever a anomalia da altura do nível do mar (SLA). Estes são dados diários de multimissão de satélites altimétricos e distribuídos em nível 4, na resolução 0,25° latitude/longitude pelo Serviço Europeu de Monitoramento do Ambiente Marinho Copernicus (<http://marine.copernicus.eu>). Os vetores de correntes geostróficas de superfície também são disponíveis nesse mesmo conjunto de dados. Nossa análise de dados *in situ* foi complementada com o conjunto de dados de reanálise ERA5 do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (<http://www.ecmwf.int>).



**Figura 1** - Imagens mostrando o Oceano Atlântico Sudoeste e a área de estudo. (a) Anomalia do Nível do Mar (m) em relação ao geóide medido por Altimetria (cores) e vetores de corrente de velocidade geostrófica absoluta derivados ( $m s^{-1}$ ). (b) Concentração de clorofila-a (Chl-a em  $mg m^{-3}$ ). Todos os dados são de 18 de outubro de 2019. Os círculos brancos denotam a trajetória do Navio Almirante Maximiano ao cruzar o vórtice e as posições de lançamento de XBTs e radiossondas.

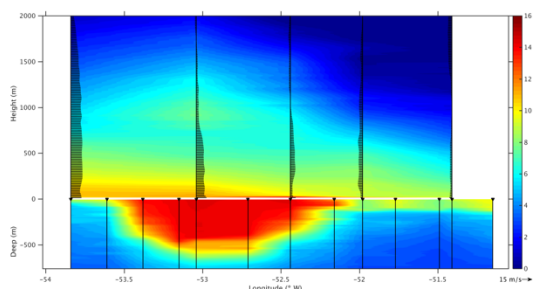
### 3. RESULTADOS

As anomalias da TSM em relação à águas circundantes no Oceano Atlântico Sudoeste causadas pela presença do VNQ exerceram uma influência crucial na modificação da CLAM durante o período de amostragem da campanha ATMOS-1. Os mecanismos físicos de ajuste de pressão e mistura vertical que podem tornar a baixa atmosfera e a CLAM instável, já descritos em Pezzi et al. (2021), foram identificados como responsáveis pelo forçamento da instabilidade da CLAM acima do VNQ. Este vórtice quente também causou um aumento na magnitude dos ventos em superfície acima do mar, assim como os fluxos de calor do oceano para a atmosfera. As regiões oceânicas em latitudes médias e altas, devido às suas águas frias são, em geral, regiões sumidouras de  $CO_2$  atmosférico. A presença deste vórtice quente, porém, fez com que o oceano atuasse localmente como uma fonte de  $CO_2$ , para a atmosfera. A água quente superficial deste vórtice resultou em magnitudes maiores de todos os fluxos oceano-atmosfera estudados aqui. Este estudo adiciona conhecimento à nossa compreensão de como as estruturas de mesoescala oceânicas afetam a baixa atmosfera sobrejacente.

#### 3.1. A modulação da Camada Limite Atmosférica Marinha

- a) Perfis verticais da CLAM e a da camada limite oceânica (CLO) são mostrados na Figura 2. No conhecido mecanismo de mistura vertical, a fluatibilidade do ar e a intensidade da turbulência aumentam acima de águas quentes. Como consequência, o cisalhamento vertical do vento na CLAM é reduzido e ventos mais fortes são gerados na superfície do mar. Este processo aumenta a transferência de momentum da atmosfera para a superfície do oceano, aumentando os processos de mistura oceânica e intensificando os fluxos na interface oceano-atmosfera. Uma situação oposta é esperada em águas frias. A Figura 3 mostra perfis verticais de temperatura ( $^{\circ}C$ ) da CLAM e CLO obtidos ao longo da derrota do NPo. Almirante Maximiano durante o dia 18 de outubro 2019. Os vetores de magnitude do vento, sobrepondo-se aos perfis de temperatura do ar (Tar), mostram claramente que em águas quentes os ventos de superfície e próximos à superfície são mais intensos e apresentam um cisalhamento vertical pequeno ou inexistente. Esta é uma característica clássica de uma CLAM bem misturada e turbulenta, refletida também pela homogeneidade vertical da temperatura do ar, como mostrado pelos dois perfis atmosféricos mais para oeste da área de estudo (metade superior da Figura 2). No entanto, fora do vórtice (além de sua borda leste), o cisalhamento vertical do vento aumenta, indicando um aumento da estabilidade da CLAM e uma diminuição das magnitudes do vento de superfície. Isso é mostrado pelos três perfis atmosféricos mais para leste na metade superior da Figura 2. Este processo faz parte da interação entre a CLO e CLAM,

onde algumas das características oceânicas de superfície são passadas para a baixa atmosfera.



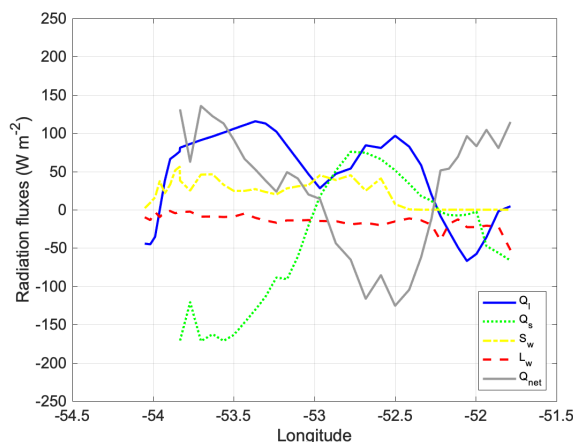
**Figura 2.** Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) da atmosfera e do oceano (cores) obtidos simultaneamente por radiossonda e XBTs ao longo da rota do Navio Almirante Maximiano (H-41) ao cruzar o vórtice oceânico durante o dia 18 outubro de 2019. A parte inferior desta figura exhibe as posições de sondagem oceânica. Magnitude do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em vetores também é exibido, sobreposto à temperatura do ar. O tamanho do vetor reflete a magnitude do vento.

### 3.1. A modulação dos fluxos turbulentos a superfície

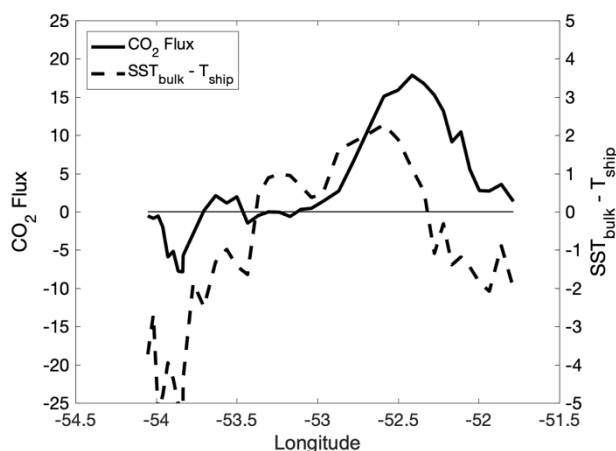
Agora, voltamos nossa atenção para investigar a estabilidade da CLAM usando observações *in situ*, do oceano e da atmosfera, em superfície. Mais detalhes sobre o uso dos instrumentos são mostrados na Tabela 2 de Pezzi et al. (2021). A diferença TSM-Tar é usada aqui como um dos critérios para determinar a estabilidade da CLAM, fornecendo uma indicação da direção vertical dos fluxos de calor. Valores positivos são associados a fluxos na direção do oceano para a atmosfera e valores negativos são associados a fluxos da atmosfera para o oceano. As observações mostram claramente que o VNQ exerce uma influência marcante tanto sobre as águas circundantes quanto sobre a atmosfera, para a qual fornece uma grande quantidade de calor (Figura 3). A TSM no núcleo do vórtice estudado aqui foi de  $14^{\circ}\text{C}$  (não mostrado), que foi  $2^{\circ}\text{C}$  maior que a Tar medida simultaneamente pelo termômetros da torre micrometeorológica a 16 m de altura com respeito à superfície do mar. Essa forte diferença térmica vertical TSM-Tar é também vista na série temporal da Figura 3b. Valores positivos de TSM-Tar definem uma CLAM instável e, quanto maior essa diferença for, mais instável a CLAM é. A forte intensidade do vento de superfície também foi observada (não mostrada) no lado mais a oeste do VNQ, atingindo seu valor máximo exatamente no núcleo do vórtice (Figura 4e).

O papel do VNQ como fonte de calor para a atmosfera também é claramente percebido no balanço de calor apresentado na Figura 3a, analisando o fluxo líquido de calor (Qnet), que foi estimado com base em nossas observações *in situ*. Estas observações incluíram a parte de radiação de onda longa (Lw) e radiação de onda curta (Sw)

medidas por radiômetros na torre. A variabilidade espaço-temporal de Qnet indica a contribuição de calor líquido do VNQ para a atmosfera, onde valores positivos significam a indução de um fluxo de calor direcionado do oceano para a atmosfera. Os fluxos de calor turbulentos são proporcionais às diferenças de temperatura e umidade específica entre o ar e a superfície do mar, bem como à magnitude do vento e o coeficiente de estabilidade. A equação de balanço de calor considera as contribuições individuais dos fluxos de calor sensível (Qs) e latente (Ql) estimados pelo método EC e da radiação Lw e Sw.



a)



b)

**Figura 3 -** Medições *in situ* realizadas junto ao Almirante Maximiano (H41) ao atravessar o vortice. a) Componentes do fluxo de calor líquido (Qnet), radiação de onda curta e radiação de onda longa (Sw e Lw), fluxos de calor latente e sensível (Ql e Qs, ambos medidos por Eddy Covariance), em  $\text{W m}^{-2}$ . b) TSM-Tar bulk ( $^{\circ}\text{C}$ ) e fluxos de  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ).

## 4. CONCLUSÕES

Os mecanismos de ajuste de pressão e mistura vertical que podem tornar a CLAM instável foram identificados durante estes estudo. O VNQ também contribuiu no aumento da intensidade dos ventos de superfície e os fluxos de calor do

oceano para a atmosfera. Espera-se que as regiões oceânicas em latitudes médias e altas absorvam CO<sub>2</sub>, e por isso essas são consideradas sumidouros, devido às suas águas frias. Em vez disso, a presença deste VNQ em latitudes médias, cercado por águas predominantemente frias, fez com que o oceano atuasse localmente como uma fonte de CO<sub>2</sub>. Os fluxos de calor, momentum e CO<sub>2</sub> trocados na interface oceano-atmosfera estiveram estreitamente correlacionados com a TSM. O aumento da TSM no núcleo do VNQ claramente resultou em maiores magnitudes de todos os fluxos oceano-atmosfera estudados aqui. Este estudo acrescenta à nossa compreensão de como as estruturas oceânicas de mesoescala afetam as camadas mais baixas da atmosfera. A presença de águas quentes e tropicais trazidas pelo VNQ transforma uma região oceânica de latitudes médias, tipicamente considerada como sumidouro de CO<sub>2</sub>, em uma fonte desse gás de efeito estufa para a atmosfera. As implicações climáticas dessa troca de papel não são inteiramente compreendidas no presente tempo.

#### AGRADECIMENTOS:

Esta pesquisa foi financiada pelas agências brasileiras CNPq, CAPES, FINEP e FAPERGS através dos seguintes projetos: (i) Sistema de Modelagem e Observação da Antártica (CNPq/PROANTAR 443013/2018-7). (ii) Nacional Instituto de Ciência e Tecnologia da Criosfera (CNPq 704222/2009 + FAPERGS 17/2551-0000518-0); (iii) Laboratório de Meteorologia Marinha Polar (FINEP);

#### 5. REFERÊNCIAS

- Hackerott, J. A., L. P. Pezzi, M. Bakhoday Paskyabi, A. P. Oliveira, J. Reuder, R. B. Souza, and R. Camargo, 2018: The Role of Roughness and Stability on the Momentum Flux in the Marine Atmospheric Surface Layer: A Study on the Southwestern Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, <https://doi.org/10.1002/2017JD027994>.
- Oliveira, R. R., L. P. Pezzi, R. B. Souza, M. F. Santini, L. C. Cunha, and F. S. Pacheco, 2019: First measurements of the ocean-atmosphere CO<sub>2</sub> fluxes at the Cabo Frio upwelling system region, Southwestern Atlantic Ocean. *Cont. Shelf Res.*, **181**, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.05.008>.
- Pezzi, L. P., R. B. Souza, P. C. Farias, O. Acevedo, and A. J. Miller, 2016a: Air-sea interaction at the Southern Brazilian Continental Shelf: In situ observations. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **121**, <https://doi.org/10.1002/2016JC011774>.
- , ———, and M. F. L. Quadro, 2016b: A review on the ocean-atmosphere interaction processes in regions of strong sea surface temperature gradients of the South Atlantic Ocean based on observational data. *Rev. Bras. Meteorol.*, **31**, <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150032>.
- Pezzi, L. P., and Coauthors, 2021: Oceanic eddy-induced modifications to air-sea heat and CO<sub>2</sub> fluxes in the Brazil-Malvinas Confluence. *Sci. Rep.*, **11**, 10648, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89985-9>.
- Santini, M. F., R. B. Souza, L. P. Pezzi, and S. Swart, 2020: Observations of air-sea heat fluxes in the Southwestern Atlantic under high-frequency ocean and atmospheric perturbations. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*,.
- Souza, R., L. Pezzi, S. Swart, F. Oliveira, and M. Santini, 2021: Air-Sea Interactions over Eddies in the Brazil-Malvinas Confluence. *Remote Sens.*, **13**, 1335, <https://doi.org/10.3390/rs13071335>.