

DETECÇÃO DE FRENTES OCEÂNICAS NA BACIA DE SANTOS A PARTIR DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ESTIMADA POR SATÉLITE

Gabriel Lucas Xavier da Silva¹, Vitor Galazzo de Paiva¹, Milton Kampel¹

¹Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - PGSER, Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas n° 1758
{gabriel.xavier, vitor.paiva, milton.kampel}@inpe.br

RESUMO

As frentes oceânicas são definidas pelo encontro de massas d'água com diferentes propriedades físico-químicas. A temperatura da superfície do mar (TSM) pode ser utilizada para detecção de frentes oceânicas com base na magnitude do seu gradiente em determinado período e local. Neste estudo propomos caracterizar a variabilidade da ocorrência de frentes oceânicas na Baía de Santos. Foram utilizadas imagens da TSM obtidas por satélite durante 2002-2022, as quais foram submetidas a um algoritmo de detecção de bordas para identificação das frentes oceânicas na região. A ocorrência de frentes oceânicas foi avaliada a partir de sua variabilidade sazonal e sua decomposição com base em funções ortogonais empíricas. Os resultados indicam a ocorrência de frentes oceânicas principalmente associadas a presença da Corrente do Brasil, também estando possivelmente relacionadas a fenômenos de ressurgência e intrusão de águas frias vindas de sul durante o inverno.

Palavras-chave – Frentes oceânicas, temperatura da superfície do mar, GHRSSST MUR L4, Baía de Santos, Atlântico Sul.

ABSTRACT

Oceanic fronts are defined by the encounter of water masses with different physicochemical properties. Sea surface temperature (SST) can be used to detect oceanic fronts based on the magnitude of their gradient at a given time and location. In this study we propose to characterize the variability of the occurrence of oceanic fronts in the Santos Basin. Satellite-derived SST images obtained during 2002-2022 were submitted to an edge detection algorithm to identify oceanic fronts in the region. The occurrence of oceanic fronts was assessed based on their seasonal variability and their signal decomposition based on empirical orthogonal functions. The results indicate the occurrence of oceanic fronts mainly associated with the presence of the Brazil Current, also possibly related to upwelling phenomena and intrusion of cold waters masses coming from the south during the winter.

Key words – Oceanic fronts, sea surface temperature, GHRSSST MUR L4, Santos Basin, South Atlantic.

1. INTRODUÇÃO

As frentes oceânicas são definidas como zonas de transição entre massas d'água com diferentes características, como

por exemplo suas condições de temperatura, salinidade e densidade [1]. Estas frentes caracterizam-se como locais onde há intensa troca de propriedades entre massas d'água, influenciando diretamente o ecossistema marinho através da variação na concentração de nutrientes, fitoplâncton e produção pesqueira [2]. As frentes oceânicas também estão relacionadas a determinados fenômenos oceanográficos, como a ocorrência de vórtices e meandros, e na interação oceano-atmosfera [3]. A ocorrência de frentes oceânicas está associada a diversos fatores capazes de estabelecer ou intensificar o encontro entre massas d'água, como por exemplo a dinâmica de ventos, a ressurgência costeira, as correntes de contorno e o aporte fluvial. Nas camadas superficiais do oceano, a ocorrência de frentes está intimamente ligada a variações na temperatura da superfície do mar (TSM), sendo geralmente detectadas com base na magnitude do gradiente de temperatura em determinado período e local [4]. A TSM pode ser estimada a partir de técnicas de sensoriamento remoto de forma rápida e eficaz. Atualmente, a alta resolução de determinados produtos de TSM permitem a análise da variação espaço-temporal da temperatura em escalas cada vez menores [5]. Analisar a variabilidade da ocorrência de frentes oceânicas a partir da TSM em alta resolução é fundamental para compreender processos meteoceanográficos e seus impactos a nível regional e local. O presente trabalho tem como objetivo detectar a ocorrência de frentes oceânicas na Baía de Santos, buscando avaliar sua variabilidade sazonal e sua relação com possíveis fenômenos meteoceanográficos na região. Este estudo é uma contribuição do Projeto Santos – Caracterização Ambiental Regional da Baía de Santos (PCR-BS) - coordenado pela PETROBRAS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A Baía de Santos está localizada na porção sudeste da margem continental brasileira, entre as latitudes 23°S e 28°S, englobando desde o Estado do Rio de Janeiro ao de Santa Catarina. A região apresenta uma das maiores áreas com potencial de exploração do pré-sal brasileiro, sendo de suma importância para o desenvolvimento econômico do país. A região é caracterizada por uma TSM média variando entre 20 °C a 28 °C, atingindo máximos acima de 30 °C durante o verão na plataforma continental, e durante o outono no talude [6]. A dinâmica de ventos é composta principalmente por ventos de nordeste, variando em média de 2 a 5 m/s entre as épocas do ano [7]. A circulação superficial na região é marcada pela presença da Corrente

do Brasil (CB), que flui em direção ao Sul transportando águas quentes e salinas [8]. A CB transporta duas massas d'água principais, uma em superfície e outra na profundidade da piconclina, sendo respectivamente: Água Tropical (AT), caracterizada por águas quentes acima de 20 °C; Água Central do Atlântico Sul (ACAS), com temperaturas em torno de 6 °C a 20 °C. A região também é marcada por diversos processos oceanográficos característicos, como os vórtices originados nos meandramentos da CB [7], a ressurgência costeira adjacente ao município de Cabo Frio [9], e a intrusão das águas originadas no Rio da Prata durante o inverno [10].

2.2. Detecção de frentes oceânicas

A detecção das frentes oceânicas na Bacia de Santos foi realizada utilizando os dados diários da temperatura da superfície do mar do produto GHRSSST MUR durante Junho/2002 a Junho/2022. O produto MUR possui uma resolução espacial equivalente a 1 km x 1 km (0,01° x 0,01°), sendo um dos principais produtos de TSM em alta resolução disponíveis atualmente [11]. As imagens diárias de TSM foram submetidas a um algoritmo de detecção de bordas utilizado para identificação de frentes no ambiente oceânico [12]. Este algoritmo calcula o gradiente de TSM em cada pixel da imagem e identifica os máximos locais superiores a um limiar $T1$ pré-determinado. Desta forma, os pixels com valores superiores a este limiar são sinalizados como pixels frontais. Para evitar a quebra da frente em vários fragmentos, o algoritmo também verifica o valor do próximo pixel na direção perpendicular ao gradiente de TSM. Caso este pixel possua uma magnitude superior a um segundo limiar $T2$, este também é classificado como um pixel frontal e assim em diante. Foram adotados valores de limiar $T1 = 0,028^{\circ}\text{C}/\text{km}$ e $T2 = 0,014^{\circ}\text{C}/\text{km}$ com base em estudos anteriores para detecção de frentes em outras regiões do oceano [4, 13], devido à similaridade da magnitude dos campos de gradiente de temperatura encontrados.

A partir do algoritmo de detecção de bordas foram geradas imagens diárias da ocorrência de frentes oceânicas de TSM. Estas imagens foram reamostradas mês a mês, com base na média mensal da ocorrência de frentes oceânicas entre 2002 – 2022. Foram calculadas as climatologias sazonais da probabilidade percentual da ocorrência de frentes na região (PF), sendo a probabilidade de ocorrência de frentes obtida pela soma do número de vezes em que uma frente foi identificada em cada pixel (F) e dividida pelo número de dias que este pixel esteve visível no período temporal (C):

$$PF(\%) = \frac{F}{C} * 100 \quad (1)$$

As probabilidades de ocorrência de frentes oceânicas também foram reamostrados em uma grade de 3 x 3 pixels para remoção de sinais ruidosos [13]. A série temporal da PF na Bacia de Santos foi decomposta com base em funções ortogonais empíricas (EOFs) ao longo do domínio temporal, a partir do pacote em linguagem Python *xeofs*. A série temporal foi normalizada removendo-se previamente o valor médio de PF em cada pixel e dividindo por seu valor de desvio padrão. Foram avaliados os dois primeiros modos das EOFs obtidas,

correspondentes as duas maiores variâncias explicadas pela decomposição.

A fim de avaliar a possível relação da ocorrência de frentes oceânicas de TSM com a variação na concentração de clorofila, foram obtidas as climatologias de verão e inverno da concentração de clorofila-*a* a partir do produto CMEMS GlobColour. Para a série temporal das frentes oceânicas, foram selecionados os pixels frontais de maior probabilidade de ocorrência para climatologia de inverno, i.e. aqueles acima do percentil 95. Estes valores foram então sobrepostos e comparados em relação a razão das climatologias de inverno e verão da concentração de clorofila-*a*.

3. RESULTADOS

As climatologias sazonais da probabilidade de ocorrência de frentes oceânicas na Bacia de Santos apresentaram valores médios variando entre 1,20% e 0,88%, atingindo máximos de 12,20% durante o inverno e de 4,40% durante o verão (Figura 1). Durante o verão, destaca-se o maior número de pixels frontais na porção interna da plataforma continental a norte de 24 °S. Já durante o outono e inverno, os pixels frontais concentram-se principalmente ao longo da isóbata de 200 metros. De modo geral, durante a primavera foi observado o menor número de pixels frontais entre as climatologias.

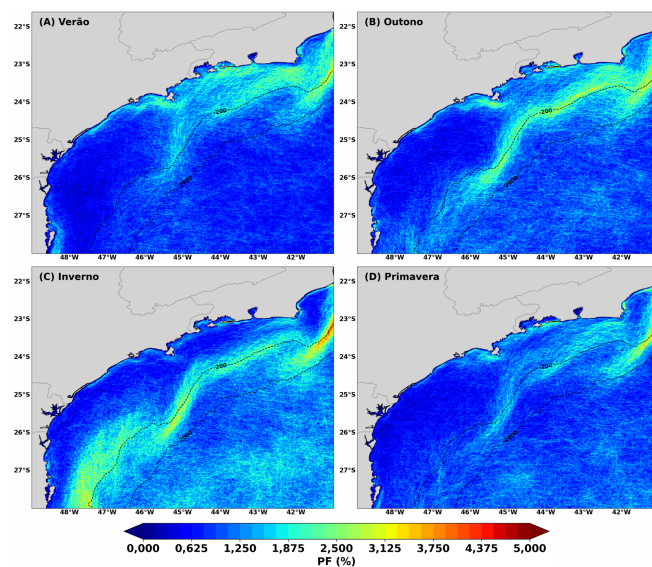


Figura 1: Climatologias sazonais da probabilidade percentual de ocorrência de frentes oceânicas entre 2002 a 2022, sendo: (A) Verão, (B) Outono, (C) Inverno e (D) Primavera.

As climatologias sazonais do gradiente da TSM apresentaram distribuições espaciais semelhantes às da probabilidade de ocorrência de frentes, como esperado (Figura 2). O gradiente de TSM apresentou valores médios variando entre 0,030 °C km⁻¹ e 0,026 °C km⁻¹, atingindo máximos de 0,060 °C km⁻¹ durante o inverno e de 0,048 °C km⁻¹ durante o verão. A decomposição das séries a partir das funções ortogonais empíricas destacam dois modos principais, de maior variância explicada durante o inverno e verão, respectivamente (Figura 3). O primeiro modo resalta a ocorrência de frentes oceânicas na porção sudoeste da Bacia

de Santos (EOF1), enquanto que o segundo a ocorrência na poção interna da plataforma continental (EOF2). A razão inverno/verão das concentrações de clorofila-*a* apresentou um valor médio de 2,10, atingindo máximos equivalentes a 4,65 na porção sudoeste da área de estudo. Estes máximos possuem uma certa congruência com a posição dos maiores valores de probabilidade de ocorrência de frentes oceânicas (acima do percentil 95) durante o inverno (Figura 4).

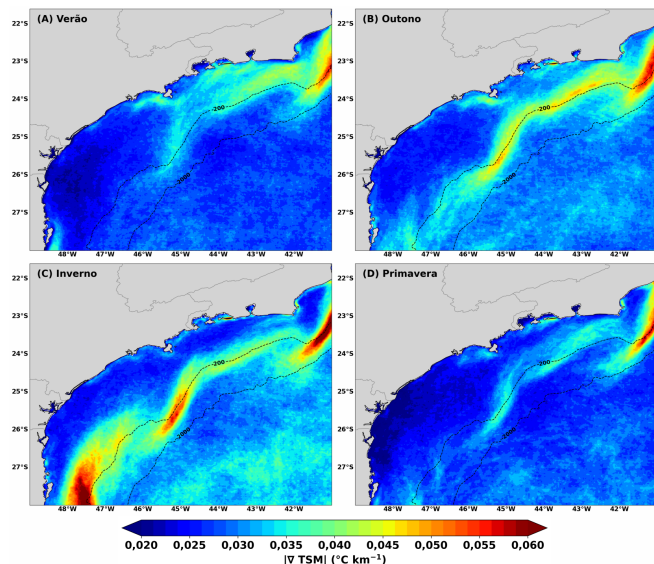


Figura 2: Climatologias sazonais do gradiente da temperatura da superfície do mar entre 2002 a 2022, sendo: (A) Verão, (B) Outono, (C) Inverno e (D) Primavera.

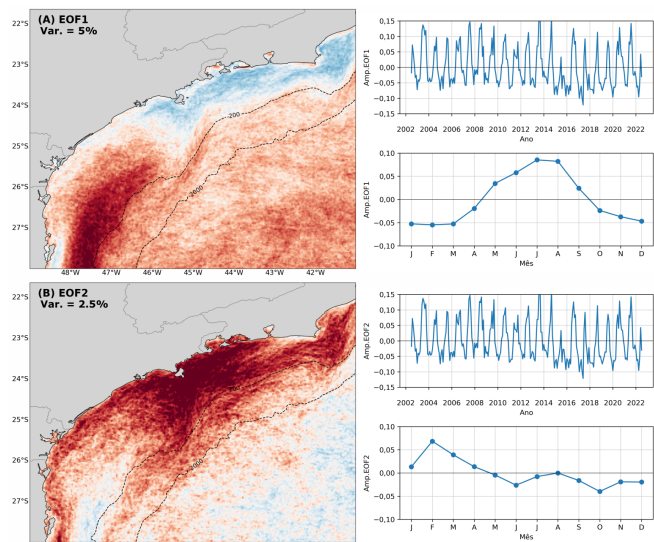


Figura 3: Dois primeiros modos da decomposição a partir de funções ortogonais empíricas (A, B), bem como suas respectivas séries temporais de amplitude e climatologias mensais obtidos com base na probabilidade de ocorrência de frentes oceânicas na região.

4. DISCUSSÃO

A variabilidade sazonal da probabilidade de ocorrência de frentes na Baía de Santos apresentou uma distribuição

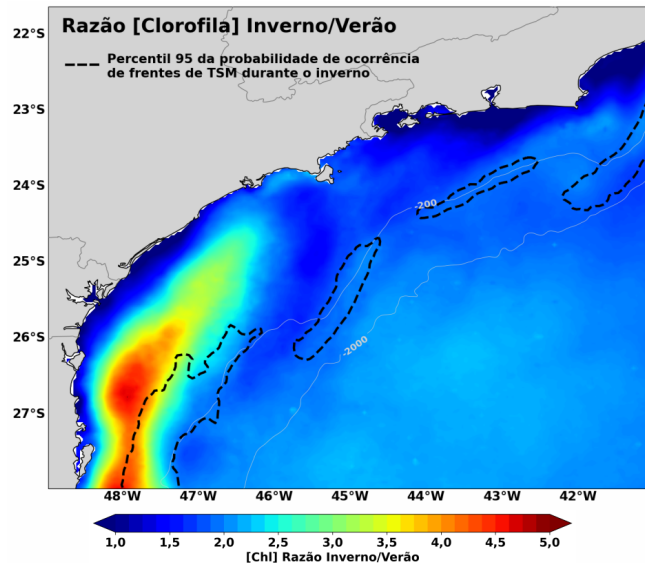


Figura 4: Razão da concentração de clorofila-*a* durante os períodos de inverno e verão. O contorno das probabilidades de ocorrência de frentes oceânicas acima do percentil 95 para climatologia de inverno está destacado em preto.

espaço-temporal semelhante à posição da frente interna da Corrente do Brasil [14]. Esta frente é principalmente demarcada entre a linha de costa e a isóbata de 200 metros, apresentando seus maiores valores de *PF* ao longo da plataforma interna e quebra da plataforma. Dada as características da CB que transporta águas quentes e salinas [8], a probabilidade de ocorrência de frentes se intensifica durante o outono e inverno, uma vez que o gradiente de temperatura em sua frente tende a se elevar nesta época do ano. Durante o verão, é possível observar uma tendência no maior número de pixels frontais serem encontrados na plataforma interna, enquanto que durante o inverno o maior número de pixels frontais é observado na plataforma externa logo após as isóbatas de 200 m. Estes resultados corroboram com análises anteriores indicando que a frente da CB permanece relativamente mais próxima da costa durante o verão, e mais afastada durante o inverno [14].

Outros fatores que podem estar associados à variabilidade da probabilidade de ocorrências frontais encontradas tratam-se da ocorrência de ressurgências na região de Cabo Frio e intrusão de águas frias vindas de sul. Durante o verão, a ressurgência de Cabo Frio se intensifica, favorecendo o afloramento de águas mais profundas e frias [9], formando assim uma frente oceânica costeira que se desloca para S-SW junto ao fluxo da CB. Já durante o inverno, o aporte fluvial do Rio da Prata e Lagoa dos Patos atinge sua máxima distribuição norte, estendendo-se até as proximidades do Cabo de Santa Marta em torno de 28°S [10]. Este aporte fluvial é responsável por introduzir águas frias na Baía de Santos, originando assim uma frente oceânica que vai de encontro à frente da CB. A alta concentração de pixels frontais entre 27°S e 28°S foi observada somente durante o inverno, indicando este fenômeno característico nesta época do ano. O primeiro modo obtido pela decomposição com base em funções ortogonais empíricas confirma esta hipótese, destacando a particularidade da concentração de pixels

frontais entre 27°S e 28°S durante o inverno, diferenciando-o dos pixels frontais associados à Corrente do Brasil mais ao norte.

A razão entre as concentrações de clorofila-*a* durante o inverno/verão também evidencia a particularidade desta época do ano. É possível observar que as concentrações de clorofila-*a* durante o inverno são maiores na porção sudoeste da Baía de Santos, indicando valores cerca de 4x maiores de clorofila entre 26°S e 28°S. Já na porção norte, ao largo da costa norte de São Paulo e do Rio de Janeiro, essas razões se reduzem a menores do que 1, assim como em regiões mais profundas. Desta forma, as maiores concentrações de clorofila apresentam uma aparente congruência com a maior probabilidade de ocorrência de frentes oceânicas acima do percentil 95 entre 27°S e 28°S. Estes resultados corroboram com a possível relação de frentes oceânicas detectadas, com a intrusão de águas oriundas do Rio da Prata durante o inverno, nesta porção da Baía de Santos.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi aplicado um algoritmo de detecção de bordas sobre imagens da temperatura da superfície do mar de alta resolução a fim de analisar a ocorrência de frentes oceânicas e sua variabilidade sazonal na Baía de Santos. Os resultados encontrados indicam que a ocorrência de frentes oceânicas na região varia conforme as épocas do ano, ressaltando principalmente as diferentes assinaturas da frente da Corrente do Brasil. Durante o verão, as frentes associadas a CB se concentram na plataforma interna ao norte de 24 °S. No inverno e outono, as frentes são observadas majoritariamente ao longo da isóbata de 200 metros até 28 °S. Outros processos como a ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e a intrusão de águas vindas de sul também aparentam estar relacionadas às climatologias de frentes oceânicas obtidas, visto que estas são intensificadas durante as épocas de verão e inverno, respectivamente. Os modos obtidos pela decomposição com base em funções ortogonais também corroboram com esta hipótese. Em última análise, destaca-se a congruência observada entre a razão da concentração de clorofila inverno/verão com os maiores valores de probabilidade de ocorrência de frentes durante o inverno. Novas análises ainda estão sendo conduzidas para melhor compreender a relação da variabilidade de frentes oceânicas observadas com demais variáveis meteoceanográficas (e.g. dinâmica de ventos), assim como comparações entre outros algoritmos de detecção de frentes na região.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto PETROBRAS Santos (PCR-BS), Agência Nacional do Petróleo (ANP) e IBAMA.

7. REFERÊNCIAS

[1] James A Yoder, Steven G Ackleson, Richard T Barber, Pierre Flament, and William M Balch. A line in the sea. *Nature*,

371(6499):689–692, 1994.

- [2] Igor M Belkin, George L Hunt, Elliott L Hazen, Jeannette E Zamon, Robert S Schick, Rui Prieto, Jon Brodziak, Steven LH Teo, Lesley Thorne, Helen Bailey, et al. Fronts, fish, and predators. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 107:1–2, 2014.
- [3] RJ d Small, Simon P deSzoeko, SP Xie, L O’neill, H Seo, Q Song, P Cornillon, M Spall, and S Minobe. Air–sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3-4):274–319, 2008.
- [4] Renato M Castelao and Yuntao Wang. Wind-driven variability in sea surface temperature front distribution in the California Current System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(3):1861–1875, 2014.
- [5] Toshio Michael Chin, Jorge Vazquez-Cuervo, and Edward M Armstrong. A multi-scale high-resolution analysis of global sea surface temperature. *Remote sensing of environment*, 200:154–169, 2017.
- [6] Milton Kampel, Lucas Barbedo de Freitas, Flavia Tavares Delcourt, Fabio Dall Cortivo, Larissa Valerio, Maria Laura Zoffoli, and Natalia de Moraes Rudorff. Caracterização e análise ambiental da Baía de Santos com base no processamento de campos oceânicos superficiais estimados por satélites. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto–SBSR*, pages 3596–3603.
- [7] Michael Vogel, Ilson Carlos Almeida da Silveira, Belmiro Mendes de Castro Fiho, Jose Antonio Lima, Adriene Pereira, and Paul Williams. Metocean measurements at northern Santos basin-Brazil. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro, 2010.
- [8] Ilson Carlos Almeida da Silveira, André Campos Kersten Schmidt, Edmo José Dias Campos, Sueli Susana de Godoi, and Yoshimine Ikeda. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48:171–183, 2000.
- [9] JL Valentin. The Cabo Frio upwelling system, Brazil. In *Coastal marine ecosystems of Latin America*, pages 97–105. Springer, 2001.
- [10] Alberto R Piola, Ricardo P Matano, Elbio D Palma, Osmar O Möller Jr, and Edmo JD Campos. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. *Geophysical Research Letters*, 32(1), 2005.
- [11] Level GHRSSST. Mur global foundation sea surface temperature analysis (v4. 1). *NASA JPL: Pasadena, CA, USA*, 2015.
- [12] John Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (6):679–698, 1986.
- [13] Huan-Huan Chen, Yiquan Qi, Yuntao Wang, and Fei Chai. Seasonal variability of SST fronts and winds on the southeastern continental shelf of Brazil. *Ocean Dynamics*, 69(11):1387–1399, 2019.
- [14] João A Lorenzetti, Jose L Stech, Wilson L Mello Filho, and Arcilan T Assireu. Satellite observation of Brazil Current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures. *Continental Shelf Research*, 29(17):2061–2068, 2009.