

EVOLUÇÃO TEMPORAL DA INTERAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*a* NA SUPERFÍCIE DO MAR E A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE BRASILEIRA

Paulo Victor Marchetto Silva¹, Milton Kampel¹, Vitor Galazzo de Paiva¹, Fabio Dall Cortivo¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Av. dos Astronautas, 1.758 - Jardim da Granja, São José dos Campos - SP, 12227-010, paulovictor_msilva@hotmail.com, milton.kampel@inpe.br, vitorgalazzo@gmail.com, fabio.cortivo@inpe.br

RESUMO

A relação temporal entre a concentração de clorofila-*a* e temperatura da superfície do mar estimados por satélite foi analisada na região da plataforma continental sudeste brasileira (PCSE). Foram utilizados os métodos de correlação cruzada de Person (ρ), Detrended Cross-Correlation Analysis (ρ_{DCCA}) e Temporal-evolution Detrended Cross-Correlation Analysis (ρ_{TDCCA}). O coeficiente ρ indicou uma correlação relativamente forte e negativa entre as variáveis (-0,61). Os métodos DCCA e TDCCA indicaram a ocorrência dessas correlações fortes e negativas em escalas entre 1-4 anos ($-0,75 < \rho_{DCCA} < -0,50$; $-0,85 < \rho_{TDCCA} < -0,50$). De acordo com o método TDCCA foi possível observar um enfraquecimento das correlações em 2006-2008 e 2015-2017 ($-0,25 < \rho_{TDCCA} < 0$). Futuros estudos devem explorar os processos associados a essas escalas e períodos.

Palavras-chave – temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a* na superfície do mar, interações biofísicas, correlação, Baía de Santos.

ABSTRACT

The temporal relation between sea surface chlorophyll-*a* concentration and temperature estimated by remote sensing was analysed in the southeast Brazilian bight region. It was used the Pearson cross-correlation method (ρ), Detrended Cross-Correlation Analysis (ρ_{DCCA}) and Temporal evolution of Detrended Cross-Correlation Analysis (ρ_{TDCCA}). The ρ coefficient has indicated a relatively strong and negative correlation between the variables (-0,61). The DCCA and TDCCA methods showed us the occurrence of this strong and negative correlations in time scales from 1 to 4 years ($-0,75 < \rho_{DCCA} < -0,50$; $-0,85 < \rho_{TDCCA} < -0,50$). With the TDCCA method was possible to observe an weakening for correlations in 2006-2008 and 2015-2017 period ($-0,25 < \rho_{TDCCA} < 0$). Future works will explore more deeply the natural process associated to the different timescales and periods.

Key words – sea surface temperature, sea surface chlorophyll-*a* concentration, biophysical interactions, Santos Basin.

1. INTRODUÇÃO

A Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE) (Figura 1) é uma plataforma extensa com a presença de uma corrente de contorno oeste na borda da plataforma, com aporte de água doce local a partir de rios e estuários [1].

Os principais processos oceanográficos da PCSE podem ser caracterizados por eventos de ressurgência costeira como em Cabo Frio e Ubatuba na primavera-verão [2] [3], intrusões de águas frias vindas de sul no inverno [4] e que podem ser relacionadas à frequência de eventos do ENSO [5], meandramentos e vórtices da Corrente do Brasil [6], ondas de plataforma continental [7] e ondas internas [8]. Esses processos podem aportar nutrientes à zona eufótica, aumentando a produção primária e, conseqüentemente, a biomassa fitoplanctônica. Esta por sua vez, é muitas vezes indexada pela concentração de clorofila-*a*. Da mesma forma, muitos desses processos promovem a ressurgência ou mistura de águas subsuperficiais, diminuindo a temperatura da superfície do mar.

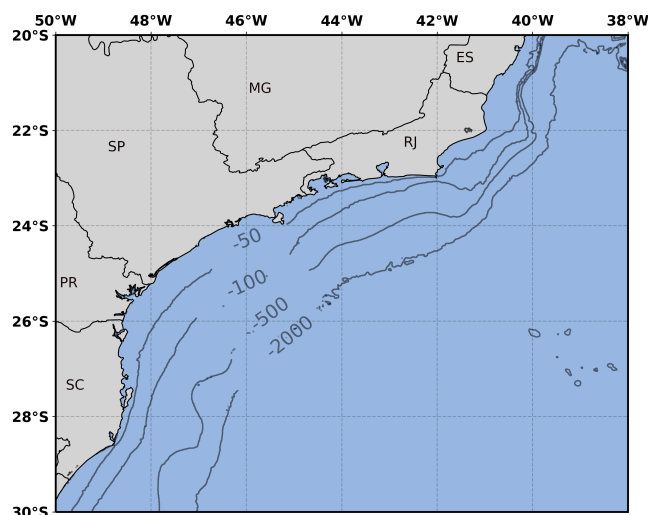


Figura 1: Plataforma Continental Sudeste do Brasil no Oceano Atlântico Sudoeste.

Os produtos de sensoriamento remoto atualmente disponíveis, nos possibilitam observar os processos oceanográficos de superfície como boa resolução espacial e temporal, e ampla cobertura geográfica. Podem ser geradas séries temporais de variáveis meteoceanográficas de interesse, como a concentração de clorofila-*a* (CSM) e temperatura da superfície do mar (TSM) [9].

As correlações entre duas variáveis ambientais muitas vezes apresentam não-linearidade e não-estacionaridade [10], fazendo com que o método clássico da correlação cruzada de Pearson possa não ser apropriado em certos casos. Esta limitação pode levar a interpretações dúbias, demandando o uso de outros métodos de correlação, como o *Detrended Cross-Correlation Analysis* (DCCA) e o *Temporal evolution of Detrended Cross-Correlation Analysis* (TDCCA) [11]. Esses métodos permitem identificar correlações entre as variáveis de interesse em diferentes escalas de tempo, assim como a evolução temporal das correlações.

O objetivo deste trabalho é analisar a correlação entre as variáveis CSM e TSM estimadas por satélite na PCSE, no período entre 1997 e 2022, utilizando diferentes métodos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Base de dados

As variáveis CSM e TSM analisadas provêm de bases de dados de produtos mistos, ou seja, que integram observações de sensoriamento remoto, modelos numéricos e dados in situ. Na Tabela 1 são mostradas as variáveis, respectivas fontes, períodos e resoluções temporais e espaciais.

2.1.1. Clorofila-a

Os dados de clorofila-a utilizados neste trabalho foram desenvolvidos, validados e distribuídos pelo projeto *GlobColour* da *ACRI-ST*, França. Os dados de clorofila-a do *GlobColour* são produtos de cor do oceano compostos por dados dos sensores: *SeaWiFS*, *MERIS*, *MODIS AQUA*, *VIIRS NPP*, *OLCI-A*, *VIIRS JPSS-1* e *OLCI-B* [12].

2.1.2. Temperatura

Os dados de temperatura utilizados neste trabalho são produzidos pela *NOAA's National Centers for Environmental Information (NCEI)* e derivados a partir de seu algoritmo de interpolação ótima (*NOAA-OISST v2.1*). Os produtos gerados são o resultado da interpolação ótima e extrapolação de observações da temperatura na superfície do mar do sensor *AVHRR* a bordo dos satélites *METOP-A* e *METOP-B* e medidas in-situ de embarcações, bóias e flutuadores *Argo* até 5 m de profundidade [13].

2.2. Médias temporais e espaciais

Para as análises de correlação foram calculadas as médias mensais para a região delimitada por 20°-30°S e 50°-39°O.

2.3. Correlações

Foram utilizados os métodos de correlação de Pearson, DCCA e TDCCA.

O método DCCA consiste em comparar duas séries temporais em diferentes escalas de tempo, quebrando as séries em pedaços iguais e conhecidos (escalas de tempo) para obtermos os coeficientes de DCCA (ρ_{dcca}) que representam os níveis de correlação entre as variáveis em escalas de tempo distintas e variam de -1 a 1, com o $\rho_{dcca} = -1$ representando

duas séries temporais inversamente correlacionadas, $\rho_{dcca} = 1$, diretamente correlacionadas e $\rho_{dcca} = 0$, sem correlação.

O método TDCCA é uma generalização da DCCA. São obtidos os coeficientes de correlação em diferentes escalas temporais e também é possível observar a evolução temporal dessas correlações, evidenciando ou não a não-estacionaridade dos sistemas complexos, como pode ser o caso dos sistemas naturais [11]. Os coeficientes ρ_{tdcca} variam de -1 a 1, com o $\rho_{tdcca} = -1$ representando duas séries temporais inversamente correlacionadas, $\rho_{tdcca} = 1$, diretamente correlacionadas e $\rho_{tdcca} = 0$, sem correlação.

Para o DCCA foram determinados os limites de 95% de significância a partir do método de Monte-Carlos, com 5000 amostragens aleatórias das séries mensais para cada escala de tempo.

Para o TDCCA a significância estatística do método consiste no fato de que apesar de existirem fortes correlações calculadas a partir de ruídos aleatórios, estes sinais se alteram de positivo (negativo) para negativo (positivo) com alta frequência e abruptamente, enquanto que nos casos onde há significado físico, as correlações reais costumam se manter inalteradas por um período pelo menos maior que a escala de tempo correspondente [11].

Este trabalho é uma contribuição do Projeto Santos – Caracterização Ambiental Regional da Bacia de Santos (PCR-BS) - coordenado pela PETROBRAS.

3. RESULTADOS

O resultado da correlação cruzada de Pearson para as médias mensais de CSM e TSM foi de -0,6088 com p-valor de $1,3037 \times 10^{-31}$.

A análise de DCCA (Figura 2) nos mostra que as maiores correlações se encontram nas escalas entre 1 ano e 4 anos entre a CSM e TSM na PCSE com o ρ_{dcca} entre -0,75 e -0,50. A análise de correlação se mostrou significativa para todas as escalas de tempo. Os coeficientes de correlação ρ_{tdcca} (Figura 3) foram negativos para todos os anos e para todas as escalas de tempo com o sinal mais intenso nas escalas de tempo entre 1 ano e 4 anos.

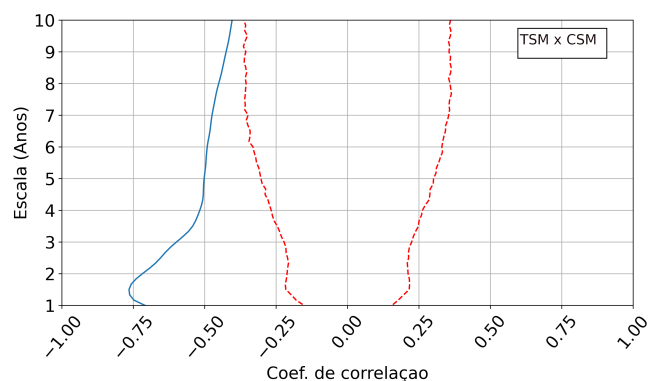


Figura 2: *Detrended Cross-Correlation Analysis* entre as séries temporais com médias mensais de temperatura da superfície do mar (TSM) e concentração de clorofila-a na superfície do mar (CSM), entre 1997 e 2022.

Variável	Fonte de dados	Período	Resolução espacial	Resolução temporal
Clorofila-a	GLOBCOLOUR-ACRI	1997-2022	0,036° x 0,036° (4km)	24h
Temperatura	NOAA-OISST v2.1	1997-2022	0,25° x 0,25° (27,75km)	24h

Tabela 1: Séries temporais das variáveis ambientais e informações sobre as respectivas fontes de dados, períodos, resoluções espacial (km) e temporal (h).

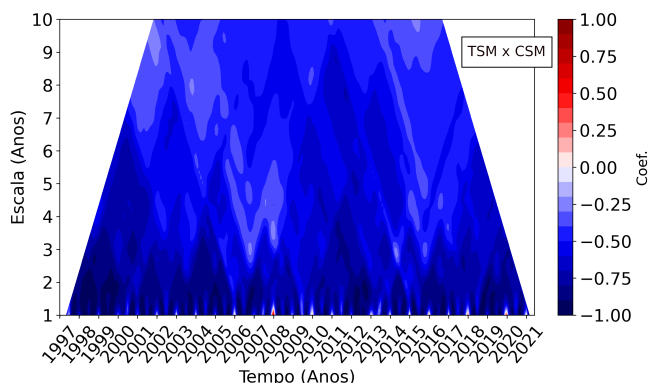


Figura 3: Temporal Evolution of Detrended Cross-Correlation Analysis entre as séries temporais com médias mensais de temperatura da superfície do mar (TSM) e concentração de clorofila-a na superfície do mar (CSM), entre 1997 e 2022.

4. DISCUSSÃO

Em [14], os autores fizeram uma análise dos padrões globais da variação de CSM e TSM e encontraram que diferentes mecanismos naturais podem atuar nas mudanças e variações de CSM e TSM. Em alguns locais eles observaram a TSM aumentando juntamente com a CSM, como também o inverso onde há a diminuição da TSM com o aumento da CSM.

Na PCSE, a análise de correlação cruzada de Pearson mostra que a TSM e CSM são inversamente correlacionadas para as médias mensais tomando a série como um todo. Porém, ao aplicar a DCCA (Figura 2) foi possível observar que as intensidades das correlações podem variar ao longo do tempo, com sinal negativo mais forte para as menores escalas e mais fraco com aumento dessas escalas.

O resultado obtido pelo método TDCCA (Figura 3) é similar ao do método DCCA (Figura 2), com maiores correlações negativas nas escalas de tempo menores, e menores correlações nas maiores escalas. É possível observar também que nas escalas entre 3 e 4 anos, ocorreu uma diminuição do valor negativo da correlação entre 2006-2008 e 2015-2017, com ρ_{tdcca} próximo de zero. Esta variação no comportamento da correlação entre a CSM e a TSM pode estar associada a fatores climáticos e meteorológicos, como o bloqueio atmosférico em 2013-2014, que gerou regiões com águas superficiais mais quentes [15]. A variação nos padrões de correlação ainda merece esforço de pesquisa adicional para melhor compreensão dos processos envolvidos.

5. CONCLUSÕES

A aplicação de diferentes métodos de análise de correlação indicou uma relação inversa (negativa) entre a CSM e a TSM na PCSE, entre 1997-2022, nas escalas entre 1 e 10 anos, com maior sinal entre 1-4 anos. As técnicas DCCA e TDCCA agregaram mais informações em relação aos padrões

de correlação das variáveis de interesse. Ao longo do período de estudo foram observados eventos onde a correlação inversa diminuiu, possivelmente devido a forçantes climáticas ou meteorológicas, que demandam estudos mais aprofundados.

Estudos futuros podem considerar outras variáveis meteoceanográficas estimadas com base em dados de satélite, como o vento na superfície do mar, anomalia do nível do mar e profundidade da camada de mistura, precipitação, entre outros.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Projeto Caracterização Regional da Bacia de Santos Santos (PCR-BS) coordenado pela PETROBRAS, à Agência Nacional do Petróleo (ANP) e ao IBAMA.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Belmiro M Castro. Summer/winter stratification variability in the central part of the south brazil bight. *Continental Shelf Research*, 89:15–23, 2014.
- [2] A Da S Mascarenhas Jr, LB de Miranda, and NJ Rock. A study of the oceanographic conditions in the region of cabo frio. *Fertility of the Sea*, 1:285–308, 1971.
- [3] Cecilia Cerda and Belmiro M Castro. Hydrographic climatology of south brazil bight shelf waters between sao sebastiao (24 s) and cabo sao tome (22 s). *Continental Shelf Research*, 89:5–14, 2014.
- [4] Frederico Pereira Brandini, Ariel Scheffer da Silva, Eduardo Teixeira da Silva, and Hedda Kolm. Sources of nutrients and seasonal dynamics of chlorophyll in the inner shelf off parana state—south brazil bight. *Journal of Coastal Research*, 23(5):1131–1140, 2007.
- [5] Edmo JD Campos, Carlos AD Lentini, Jerry L Miller, and Alberto R Piola. Interannual variability of the sea surface temperature in the south brazil bight. *Geophysical Research Letters*, 26(14):2061–2064, 1999.
- [6] Ilson Carlos Almeida da Silveira, Andre Campos Kersten Schmidt, Edmo Jose 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.
- [7] Marcelo Dottori and Belmiro Mendes Castro. The role of remote wind forcing in the subinertial current variability in the central and northern parts of the south brazil bight. *Ocean Dynamics*, 68(6):677–688, 2018.
- [8] AF Pereira, BM Castro, L Calado, and ICA da Silveira. Numerical simulation of m2 internal tides in the south brazil bight and their interaction with the brazil current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C4), 2007.
- [9] Ian Stuart Robinson. *Satellite oceanography; an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. 1985.

- [10] Jose A Rial, Roger A Pielke, Martin Beniston, Martin Claussen, Josep Canadell, Peter Cox, Hermann Held, Nathalie de Noblet-Ducoudre, Ronald Prinn, James F Reynolds, et al. Nonlinearities, feedbacks and critical thresholds within the earth's climate system. *Climatic change*, 65(1):11–38, 2004.
- [11] Naiming Yuan, Elena Xoplaki, Congwen Zhu, and Juerg Luterbacher. A novel way to detect correlations on multi-time scales, with temporal evolution and for multi-variables. *Scientific Reports*, 6(1):1–11, 2016.
- [12] ACRI-ST. <http://globcolour.info>, 2005.
- [13] NOAA National Centers for Environmental Information. Daily 14 optimally interpolated sst (oisst) in situ and avhrr analysis. ver. 2.1. *PO.DAAC, CA, USA*. At <https://doi.org/10.5067/GHAAO-4BC21>, 2020.
- [14] Piers K Dunstan, Scott D Foster, Edward King, James Risbey, Terence J O’Kane, Didier Monselesan, Alistair J Hobday, Jason R Hartog, and Peter A Thompson. Global patterns of change and variation in sea surface temperature and chlorophyll a. *Scientific reports*, 8(1):1–9, 2018.
- [15] Danilo A Silva and Marcelo Dottori. The atmospheric blocking influence over the south brazil bight during the 2013–2014 summer. *Regional Studies in Marine Science*, 45:101815, 2021.