

1.08.02 - Oceanografia / Oceanografia Física

MODELAGEM DA ESTRUTURA VERTICAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A NA REGIÃO DA CADEIA VITÓRIA-TRINDADEGiovanna Gimenes de Sena¹, Ilson Carlos Almeida da Silveira²

1. Estudante do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP)

2. Orientador: Professor do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP) - Departamento de Oceanografia Física

Resumo

A partir da "cor do oceano" detectada por sensores acoplados em satélites é possível estimar a concentração de clorofila e associá-la a biomassa fitoplanctônica e produção primária, obtendo dados frequentes e com resolução global. Entretanto, essa estimativa se limita a camadas superiores do oceano, tornando-a insuficiente para estudos que envolvam caracterização da distribuição vertical e análise da produção biológica. Para isto, são realizadas coletas e análises *in situ* que apesar de serem fundamentais, não garantem a amostragem contínua que é obtida por dados remotos. **O presente estudo busca desenvolver um modelo paramétrico a partir do qual seja possível inferir a estrutura vertical da concentração de clorofila-a somente a partir de dados de superfície extraídos remotamente.** Para isso, foram utilizados dados *in situ* do cruzeiro do projeto Ilhas na região da Cadeia Vitória-Trindade em associação aos dados remotos disponibilizados na plataforma *GlobColour*.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Modelo de recurso biológico; Oceanografia físico-biológica

Apoio financeiro: PIBIC/CNPq

Trabalho selecionado para a JNIC: Pró-Reitoria de Pesquisa da USP, IO-USP

Introdução

A "cor do oceano" deriva da reflectância espectral da água do mar. Esta, ao ser detectada por um sensor, permite estimar a concentração de clorofila, que pode ser associada à produção primária e à biomassa fitoplanctônica (Berthelot & Deschamps, 1994). Isto se deve a característica dos pigmentos fotossintéticos presentes no fitoplâncton que absorvem o espectro eletromagnético na faixa do azul e do vermelho, como a clorofila-a (Morel & Prieur, 1977).

Entretanto, técnicas satelitárias são utilizadas apenas na camada superficial do oceano (Gordon & McCluney, 1975), sendo insuficiente para estudos que envolvam a caracterização da distribuição vertical e, conseqüentemente, a produção biológica na zona eufótica. Portanto, dados obtidos remotamente são usualmente utilizados em conjunto com observações *in situ* e empregados em simulações numéricas que agreguem estes dois tipos de análise.

Estender as observações satelitárias verticalmente se tornou importante demanda e área de pesquisa na comunidade oceanográfica. No domínio da Corrente do Brasil, por exemplo, podem ser citados estudos recentes de técnicas de projeção dos dados de altímetro desenvolvidos por Rocha et al. (2013) e Goes et al. (2019), mas, para dados de clorofila, a mesma técnica não pode ser utilizada, visto que esta, deve ser empírica. Não obstante, Lewis et al. (1983) e Platt et al. (1988), motivados pelo conjunto de observações da cor do mar através de dados de satélite, elaboraram aproximações teóricas para perfis de clorofila e estas foram utilizadas para relacionar dados remotos com o observado *in situ* na coluna d'água em diversos outros estudos em diferentes regiões, como por Taguchi et al. (1994) para o Oceano Pacífico Subártico e por Hidalgo-Gonzalez & Álvarez-Borrego (2001) para o interior do Golfo da Califórnia.

Contudo, não existem descrições da estrutura vertical da clorofila-a nos entornos das ilhas que compõem a Cadeia Vitória-Trindade e se existem variações relevantes na região em que a Corrente do Brasil atravessa o extremo da cadeia formado pelas Ilhas Trindade e Martim Vaz. Portanto a presente pesquisa irá contribuir para estudos futuros de caracterização da dinâmica de produção primária no local, bem como os processos de mesoescala relacionados, visto que a obtenção de tais dados será facilitada com a utilização do modelo, pois tornará possível abranger áreas maiores e com maior frequência temporal sem depender exclusivamente das coletas e análise. A saída do modelo também poderá ser utilizada para entrada de modelos Nutrientes-Fitoplâncton-Zooplâncton-Detritos (NPZD).

O objetivo principal deste trabalho é, portanto, **desenvolver um modelo paramétrico da estrutura vertical de clorofila-a na região da Cadeia Vitória-Trindade**, adicionalmente ao entendimento da estrutura vertical de clorofila-a, que permitirá o mapeamento tridimensional da concentração de clorofila-a ao longo da coluna d'água a partir de valores de superfície obtidos por satélite.

Metodologia

O modelo paramétrico foi desenvolvido com base nas formas analíticas dos modelos genéricos de recursos com base na salinidade/temperatura aplicada por Gangopadhyay & Robinson (2002). A equação

desenvolvida pelos autores foi adaptada para a quantificação de concentração de clorofila ao longo da coluna d'água.

Sabe-se que a clorofila tende a zero na profundidade máxima de coleta, portanto a função resultante depende do perfil médio adimensional $G(z)$ e do valor de concentração de clorofila-a na superfície da estação na qual se pretende estimar a distribuição vertical ($A(x_i, y_i)$) de acordo com:

$$Chl - a(x_i, y_i, z) = A(x_i, y_i)G(z). \quad (1)$$

O cálculo do perfil médio ($G(z)$) foi realizado utilizando apenas os perfis obtidos nas estações do cruzeiro oceanográfico Ilhas II, realizado em agosto de 2017, em que houve coleta com o perfilador CTD (Figura 1). Estas, são divididas em duas regiões para que sejam determinados perfis médios característicos para o ambiente ao redor da Ilha da Trindade e ao largo dos Bancos Besnard, Vitória e Congress.

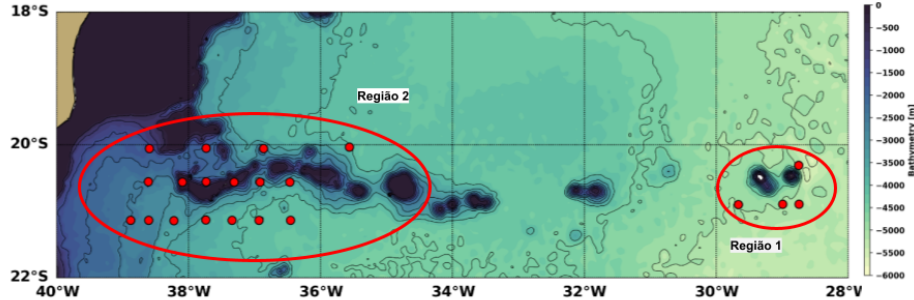


Figura 1: Mapa da região da cadeia Vitória-Trindade com a marcação das estações onde houve amostragem com o perfilador CTD durante o cruzeiro oceanográfico Ilhas II, realizado em agosto de 2017, e demarcação das regiões 1 e 2.

Nestes perfis a parte superior ao máximo subsuperficial de clorofila-a decai mais lentamente que a da parte inferior. Portanto, foi realizada uma parametrização, de modo a ajustar a curva $G(z)$, considerando as diferenças de decaimento a partir de uma gaussiana dupla. Assim,

$$G(z) = G_0 * \exp\left[\frac{-(z-z_m)^2}{L^2}\right] \quad (2)$$

onde z_m é a profundidade do máximo superficial é imposta com aquele lido do perfil de clorofila observado. A largura L difere para a porção acima do z_m e abaixo do z_m . Na Figura 2 é possível notar a diferença de decaimento entre a parte superior e inferior da curva.

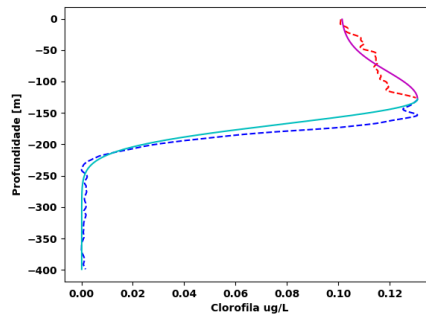


Figura 2: Perfil exemplo da utilização do ajuste pela dupla gaussiana. Linha tracejada: dados brutos, em vermelho a parte selecionada acima de z_m e em azul a parte selecionada abaixo deste valor. Linha contínua: resultado do ajuste realizado. Em rosa a porção superior à z_m e em ciano a porção inferior a z_m .

Para tornar a função de estrutura vertical adimensional, os valores do perfil médio foram divididos pelo valor de superfície:

$$G(z) = G(0)^{-1}G(z). \quad (3)$$

Tal adimensionalização permitiu que o perfil médio da região gerasse uma função de estrutura vertical para qualquer estação oceanográfica nas duas áreas de interesse. A redimensionalização foi feita com os dados obtidos remotamente, inserindo o valor de superfície $A(x_i, y_i)$ na função da Eq. 1. Por fim, os perfis gerados com os dados satelitais foram comparados com os valores das análises por CTD de modo a verificar o quanto correspondem ao que foi observado. Estes resultados foram descritos estatisticamente, para que seja, principalmente, estabelecido o erro na variância associado à saída do modelo.

Resultados e Discussão

O modelo paramétrico foi elaborado a partir do cálculo do perfil médio para as duas regiões selecionadas com base nos perfis de concentração de clorofila-a obtidos durante o cruzeiro Ilhas II com o perfilador CTD. Posteriormente foi realizado o ajuste dos perfis médios pela dupla gaussiana através do

método supracitado (Figura 3).

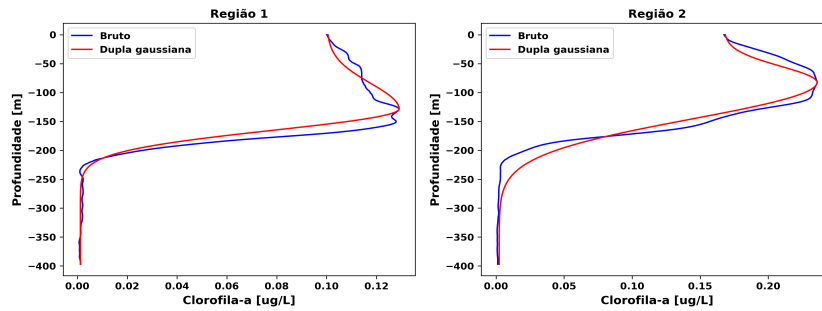


Figura 3: Perfil médio das regiões 1 e 2. A linha contínua azul corresponde ao perfil médio bruto, enquanto a linha vermelha corresponde ao perfil ajustado pela dupla gaussiana.

A Figura 3 referente ao perfil médio da região 1 (à esquerda), possui o máximo de clorofila em uma profundidade maior do que o perfil médio da região 2. É importante realizar tal comparação, pois a estrutura de cada curva obtida garante que as regiões comportam-se de maneiras distintas, justificando a divisão entre as estações. Observa-se também que a região 2, possui valores maiores de concentração e que o decaimento é mais suave que na região 1.

Os gráficos das Figuras 4 e 5 são referentes ao resultado da aplicação do modelo em 4 estações da malha amostral com o valor de superfície aferido pelo satélite, utilizando a Eq. 1 demonstrada anteriormente. Os perfis médios adimensionais são a função $G(z)$: o perfil para a região 1 foi utilizado na modelagem da estrutura vertical de clorofila-a das estações desta mesma região e o mesmo ocorreu para o perfil da região 2. O perfil vertical obtido com o CTD encontra-se no mesmo gráfico de modo a facilitar a comparação.

Para a região 1 (Figura 4) as estações 383 e 384, por possuírem a tendência de distribuição semelhante a gaussiana, apresentam resultados mais adequados, onde o máximo é representado, mas não na mesma intensidade. Quando os dados observados não possuem esta tendência, o modelo não se comporta de maneira adequada e não consegue reproduzir o que foi gerado *in situ* pelo CTD.

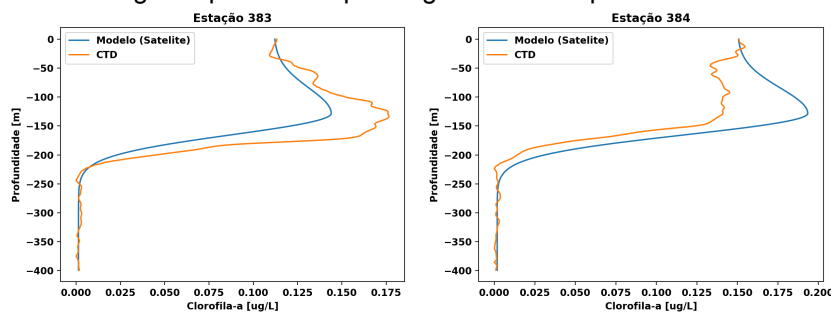


Figura 4: Perfis de concentração de clorofila-a gerados como saída do modelo de duas das quatro estações da região 1. Em laranja o perfil obtido através do perfilador CTD *in situ* e em azul o perfil gerado a partir do valor de superfície obtido remotamente.

Os perfis da região 2, dentre as 13 estações analisadas, possuem maior variedade na estrutura, fazendo com que o modelo não seja representativo em algumas estações, principalmente em relação a profundidade do máximo quando o perfil não apresenta características de curva gaussiana. A Figura 5 corresponde às estações 389 e 397 que possuem resultado similar ao demonstrado nos gráficos da Figura 4. O modelo representa o máximo na mesma profundidade que o coletado *in situ* pelo perfilador CTD porém com intensidade diferente.

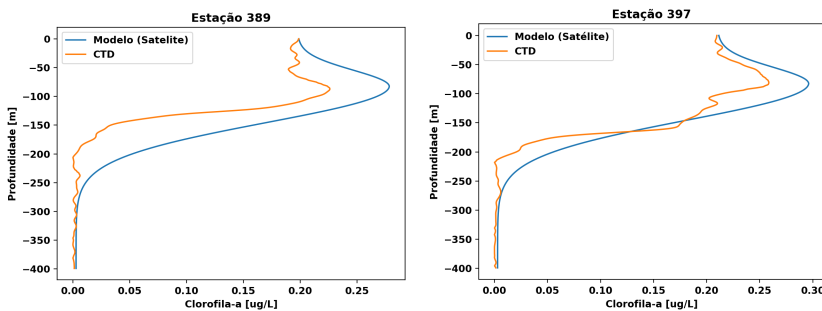


Figura 5: Perfis de concentração de clorofila-a gerados como saída do modelo de duas das treze estações da região 1. Em laranja o perfil obtido através do perfilador CTD *in situ* e em azul o perfil gerado a partir do valor de superfície obtido remotamente.

A definição de perfil médio que demonstrou ser eficiente no estudo realizado por Morel & Berthon (1989) e posteriormente por Uitz et al. (2006), não se mostrou representativa para todas as estações neste trabalho. Deve-se destacar que estes autores utilizaram uma quantidade maior de amostras (cerca de 4000), o

permitindo novos agrupamentos de perfis com diferentes critérios, como, tipo de fitoplâncton e estratificação da coluna d'água. No presente estudo, foram utilizadas cerca de 15 estações, quatro para a primeira região e 13 para a segunda, o que não permitiu que fossem realizadas outras subdivisões para elaborar um perfil médio mais representativo. Um aumento no número amostral se mostrou necessário, considerando que outros estudos também apresentaram um maior número de amostras, como por exemplo Taguchi et al. (1994), que trabalhou com cerca de 37 amostras, obtendo resultados satisfatórios em 30 destas.

Na Cadeia Vitória-Trindade, além do formato do perfil variar em distâncias muito curtas, principalmente conforme as estações se aproximam da costa, muitas vezes as distribuições verticais de concentração de clorofila-a demonstraram possuir mais de um pico de máximo de concentração ou uma variação muito brusca, o que não foi reproduzida pelo modelo desenvolvido. Novamente a baixa amostragem, não permitiu que tais perfis fossem filtrados e retirados da malha amostral, o que ocorreu no estudo realizado por Uitz et al. (2006). Entretanto, modelos biogeoquímicos possuem saídas de clorofila aproximadas, e este demonstrou potencial para ser utilizado, visto que é possível identificar uma relação entre a concentração de clorofila-a de superfície e sua estrutura de distribuição ao longo da coluna d'água.

Conclusões

Os resultados deste trabalho mostram que existe uma possível relação entre a concentração de clorofila-a na superfície e sua distribuição ao longo da coluna d'água e, principalmente, que é viável estimar a estrutura vertical de tal parâmetro através da elaboração de uma função adequada para a região estudada, visto que, de 17 estações, 7 apresentaram resultados visualmente satisfatórios, provavelmente por possuírem uma estrutura muito similar à função paramétrica. É importante que em estudos futuros o número de amostras *in situ* seja maior, para que novas subdivisões sejam feitas, outras formas de parametrização e parâmetros também podem ser considerados, para que a saída do modelo se torne mais precisa para a região.

Destaca-se que estudos que relacionam processos físicos com biogeoquímicos são de extrema relevância para a pesquisa em ciências do mar. Portanto, o aperfeiçoamento deste trabalho é principalmente motivado, pela facilidade que a utilização do modelo trará para estudos de produção primária, ciclo do carbono, identificação de feições de mesoescala e aplicação em outros modelos biogeoquímicos, pois tornaria possível abranger áreas maiores e com maior frequência temporal sem depender exclusivamente das coletas e análises *in situ*, colaborando com tal área da ciência oceanográfica.

Referências bibliográfica

- Berthelot B, Deschamps PY. Evaluation of bio-optical algorithms to remotely sense marine primary production from space. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 1994;99(C4):7979–7989.
- Gangopadhyay A, Robinson AR. Feature-oriented regional modeling of oceanic fronts. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 2002;36(1-3):201–232.
- Goes M, Cirano M, Mata M, Majumder S. Long-Term Monitoring of the Brazil Current Transport at 22° S From XBT and Altimetry Data: Seasonal, Interannual, and Extreme Variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2019;124(6):3645–3663.
- Gordon HR, McCluney W. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied optics* 1975;14(2):413–416.
- Hidalgo-Gonzalez RM, Alvarez-Borrego S. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica acta* 2001;24(1):19–28.
- Lewis MR, Cullen JJ, Platt T. Phytoplankton and thermal structure in the upper ocean: consequences of nonuniformity in chlorophyll profile. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 1983;88(C4):2565–2570.
- Morel A, Prieur L. Analysis of variations in ocean color 1. *Limnology and oceanography* 1977;22(4):709–722.
- Morel A, Berthon JF. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnology and oceanography* 1989;34(8):1545–1562.
- Platt T, Sathyendranath S, Caverhill CM, Lewis MR. Ocean primary production and available light: further algorithms for remote sensing. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers* 1988;35(6):855–879.
- Rocha CB, Tandon A, da Silveira IC, Lima JAM. Traditional quasi-geostrophic modes and surface quasi-geostrophic solutions in the Southwestern Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2013;118(5):2734–2745.
- Taguchi S, Kasai H, Saito H. Estimation of vertical distribution of chlorophyll a off east Hokkaido by Gaussian curve fitting. In: *Proc. NIPR Symp. Polar Biol*, vol. 7; 1994. p. 17–31.
- Uitz J, Claustre H, Morel A, Hooker SB. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 2006;111(C8).