

## **Análise espacial de produtos de sensoriamento remoto na Bacia de Santos**

Gabriel Moiano Cesar

Monografia apresentada a  
Disciplina SER 301 - Análise  
Espacial de Dados Geográficos,  
sob a orientação de Dr. Antônio  
Miguel Vieira Monteiro. e Dr.  
Eduardo G. Camargo.

**São José dos Campos**

**2018**

## Resumo

O fitoplâncton é o conjunto de organismos microscópicos que tem capacidade fotossintética e é a base para a produção orgânica no planeta. O principal pigmento encontrado nas células fitoplanctônicas é a clorofila-a e ela indica a presença desses organismos na água. A concentração de clorofila-a é uma variável primária para estudos da cor da água por sensoriamento remoto. Desde o fim da década de 70, com o lançamento do CZCS, pela agência espacial norte americana a oceanografia conta com uma base robusta de dados de satélite e desde então, algoritmos vem sendo desenvolvidos para auxiliar os estudos dos oceanos. O objetivo desse trabalho foi definir regiões da Bacia de Santos utilizando a técnica de análise espacial SKATER sobre dados de produtos de satélite com um enfoque na presença do fitoplâncton. Para tal foram utilizados os produtos do sensor MODIS concentração de clorofila-a (CHL), fluorescência (FLH), temperatura da superfície marinha (SST), região fotossinteticamente ativa (PAR), carbono orgânico particulado (POC), profundidade e altura do mar (derivados do produto MERRA, também da NASA). O banco de dados CCI-ESA foi utilizado nesse estudo para a realização das análises temporais. O período utilizado nesse estudo foi de janeiro de 2002 a novembro de 2018 para os dados de regionalização e de setembro de 1997 a novembro de 2018 para os dados de análises temporais.

Foram observados os padrões temporais da variável concentração de clorofila-a e com a regionalização obtida com o algoritmo SKATER foi possível verificar a presença de três classes principais, aqui denominadas como região costeira, região oceânica e região intermediária.

**Palavras Chave:** Sensoriamento Remoto, Oceanografia, Atlântico Sul, Bacia de Santos, SKATER, Análise Espacial.

## 1 Introdução

Os trabalhos de campo em ambientes aquáticos são focados especialmente na distribuição espacial da concentração de clorofila-a, que é o principal indicativo da presença de fitoplancton (PATTI et al. 2010, VALENTI et al. 2015, KIØRBOE, 2008). As comunidades fitoplanctônicas representam a base da cadeia alimentar e assim a concentração de clorofila-a é utilizada como proxy na estimativa da produção primária em todos os ambientes aquáticos (VALENTI ET AL. 2015, VELDHUIS et al. 2005).

A classificação definida no trabalho de LONGHURST et al. (1995) também utiliza a clorofila-a para descrever ecorregiões nos oceanos. Ainda hoje esse trabalho é a mais utilizada referência para descrições de regionalizações oceânicas. As técnicas de análise espacial de dados geográficos têm uma gama de possíveis utilidades nos ramos da ciência, dentre elas, o uso das características da vizinhança para a definição de classes, o algoritmo SKATER, usa essas informações para realizar a regionalização de geo-objetos com características semelhantes.

Desde o lançamento do CZCS (*Coastal Zone Color Scanner Experiment*) em 1978, a oceanografia conta com uma base robusta de dados de satélite que são amplamente utilizados. Também pode-se destacar a importância dos dados do SeaWIFS, MERIS, MODIS, VIIRS e Sentinel (na sequência cronológica), as diversas configurações de resoluções facilitam a diversidade da utilização dessas informações. Assim, a qualidade espacial e a frequência temporal fazem dos dados de sensoriamento remoto uma excelente ferramenta para esse tipo de estudo, e para a utilização desses dados é fundamental o uso de técnicas como as de análise espacial de dados, que são utilizadas nas análises de distribuição e caracterização de padrões espaciais e na variabilidade temporal dos ciclos biogeoquímicos (GRODSKY, et al. 2014; SAWAKUCHI, et al. 2014).

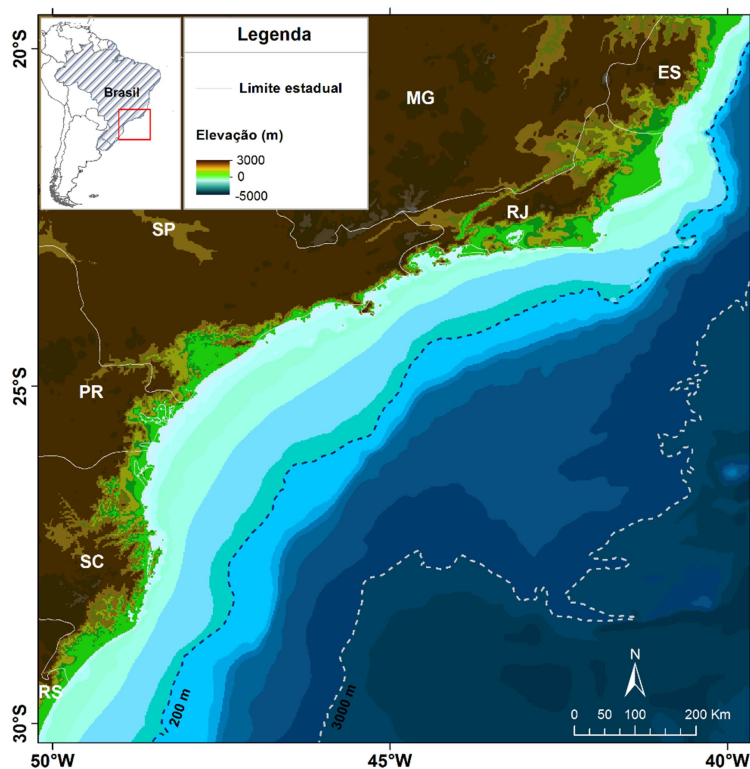
Neste contexto, o objetivo desse estudo foi definir regiões da Bacia de Santos utilizando a técnica de análise espacial SKATER sobre dados de produtos de satélite com um enfoque na presença do fitoplâncton. Para tal, foram utilizados os produtos de satélite concentração de clorofila-a (CHL), fluorescência (FLH), temperatura da superfície marinha (SST), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), carbono orgânico particulado (POC), profundidade e altura do mar (ALT). E, como objetivo secundário, fazer uma descrição espaço-temporal dos valores de concentração de clorofila na região.

## **2 Material e Métodos**

### **2.1 Área de Estudo**

A área de estudo aqui definida insere-se no Oceano Atlântico Sul na região da costa brasileira, especificamente na Bacia de Santos (Figura 1), posicionada entre 50W-40W 30S-20S. É uma área bastante influenciada pela costa continental que recebe a foz dos rios Doce, Paraíba do Sul, da Baía de Guanabara e ainda tem influência do rio da Prata, que escoia toda sub-bacia do Rio Paraná, esta região recebe o aporte de grandes quantidades de material orgânico e inorgânico transportado pelo rio. Também é influenciada pelo fluxo das águas da Corrente do Brasil.

Figura 1 – Área de estudo abrange a Bacia de Santos, posicionada em 50W-40W, 30S -20S. Faz parte do Oceano Atlântico Sul e faz interface com a costa dos estados Espírito Santo (ES), Rio de Janeiro (RJ), São Paulo (SP), Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio grande do Sul (RS). Fonte: GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*).



Além de ser uma região importante para a produção pesqueira, aquicultura e turismo, a Bacia de Santos possui as mais produtivas jazidas de petróleo e gás natural, sendo fundamental para a produção nacional de petróleo.

## 2.2 Banco de Dados

### 2.2.1 Dados batimétricos

Os dados de batimetria, com resolução espacial de 300 metros, foram obtidos do GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*), disponíveis em: <http://www.gebco.net>. No mesmo portal existe um software gratuito de processamento desses dados onde os dados foram recortados no retângulo envolvente da região de estudo e com a utilização do software Q-GIS foram atribuídas as cores para cada profundidade. Estas profundidades são representadas pela sequência de isóbatas que foram utilizadas nesse estudo.

### **2.2.2 Dados de sensoriamento remoto**

Para as observações temporais e exploração da estatística básica da série foi utilizado o banco de dados combinados de concentração de clorofila-a da CCI-ESA (*Climate Change Initiative - European Space Agency*) que consiste em informações combinadas de múltiplos satélites (MERIS - *Medium Resolution Imaging Spectrometer*, SeaWiFS - *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*, VIIRS - *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* e MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) selecionados de acordo com limiares de qualidade, a resolução espacial dos dados é de 4 km e o período vai de setembro de 1997 a novembro de 2018 (período máximo de informações disponíveis) e validados no trabalho de VALENTE et al. 2016. Para a climatologia os valores médios foram separados por mês e por estações do ano e utilizados para uma caracterização básica temporal da variável para a região.

Para a técnica de regionalização foram utilizados os produtos: concentração de clorofila-a (CHL), fluorescência (FLH), temperatura da superfície marinha (SST), radiação fotossinteticamente ativa (PAR), carbono orgânico particulado (POC) do sensor MODIS que está a bordo do satélite Aqua do programa espacial EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) que possui órbita heliosíncrona, com altitude em torno de 700 km e campo de visada de 2.330 km, obtendo uma cobertura global

diária da superfície terrestre. Com 36 bandas espectrais o sensor MODIS, dentro do espectro do visível e infravermelho-próximo (NIR) tem no nadir as bandas centradas em 645 nm e 859 nm com resolução espacial de 250 m e as demais bandas tem resolução de 500 m, 1 km e 4 km. A qualidade do imageamento junto com grande e ininterrupta série temporal colocam o sensor MODIS como um dos principais instrumentos de estudo do para o monitoramento do planeta.

Também foi utilizado dados de reanálises de profundidade e altura do mar (ALT) derivados do programa MERRA (*Modern Era Retrospective-analysis for Research and Applications*), também da NASA.

### **2.3 Série Histórica**

Com a utilização da linguagem Python e de diversas ferramentas “livres” (especialmente as bibliotecas numpy, os, datetime, netCDF4 e matplotlib) foram realizados os cálculos dos valores médios como operações entre as matrizes. Os mapas foram desenvolvidos no Sistema de Informação Geográfica Q-GIS e no software SeaDAS 7.4 (<https://seadas.gsfc.nasa.gov>). As imagens médias mensais e sazonais foram geradas utilizando matemática de bandas e os valores foram selecionados de acordo as estações do ano, sendo os meses de dezembro janeiro e fevereiro agrupados como verão, março abril e maio agrupados como outono, junho, julho e agosto agrupados como inverno e setembro, outubro e novembro como primavera.

### **2.4 Regionalização**

As variáveis utilizadas no algoritmo de regionalização foram baixadas da plataforma GIOVANNI da NASA. A tabela 1 sumariza as informações sobre cada variável utilizada. (ACKER & LEPTOUKH, 2007).

Tabela 1 – Resumo das variáveis usadas na técnica de regionalização.

Variável	Símbolo	Unidade de medida	Fonte	Resolução Temporal	Resolução Espacial
Clorofila-a	CHL	mg m <sup>-3</sup>	MODIS-Aqua	Mensal	4 km
Linha de Fluorescência Normalizada	FLH	mW cm <sup>-2</sup> um <sup>-1</sup> sr <sup>-1</sup>	MODIS-Aqua	Mensal	4 km
Radiação Fotossinteticamente Ativa	PAR	Einstein m <sup>-2</sup> day <sup>-1</sup>	MODIS-Aqua	Mensal	4 km
Carbono Orgânico Particulado	POC	mg m <sup>-3</sup>	MODIS-Aqua	Mensal	4 km
Temperatura da Superfície do Mar	SST	°C	MODIS-Aqua	Mensal	4k m
Batimetria	BAT	m	GEBCO	-	300 m
Altura da camada superficial	ALT	m	MERRA-2 Model	Mensal	0.5°

Foi utilizada a linguagem R (principalmente as bibliotecas `spdep`, `ncdf4`, `magrittr`, `httr`, `rgdal`, `raster`, `chron`, `sp`, `gstat`, `purrr`, `xml2`, `rvest`, `janitor`, `dismo`, `deldir`, `rgeos`, `ClustGeo`, `dplyr`, `dbscan` e `maptools`). O primeiro procedimento realizado no banco de dados foi o recorte dos dados para o retângulo envolvente do projeto. Os arquivos em formato raster, agrupados sazonalmente, foram reamostrados na resolução espacial dos dados de altura da camada superficial (0.5°). As matrizes foram transformadas em dataframe e cada pixel das imagens sazonais foi transformado em polígono. Foi utilizada a rotina implementada do SKATER (Spatial 'K'luster Analysis by Tree Edge Removal) que é uma técnica de classificação aplicada a geo-objetos com representações poligonais. A principal condição para a aplicação dessa técnica é a contiguidade entre os polígonos, as séries de dados também devem ter valores normalizados para os cálculos (ASSUNÇÃO et al. 2006). A função `poly2nb` cria os arquivos com as regras de vizinhança. O algoritmo calcula a árvore geradora mínima, para cada estação do ano foi feito o processamento



do algoritmo separadamente. Assim foram calculadas as árvores geradoras mínimas como no exemplo da figura 2.

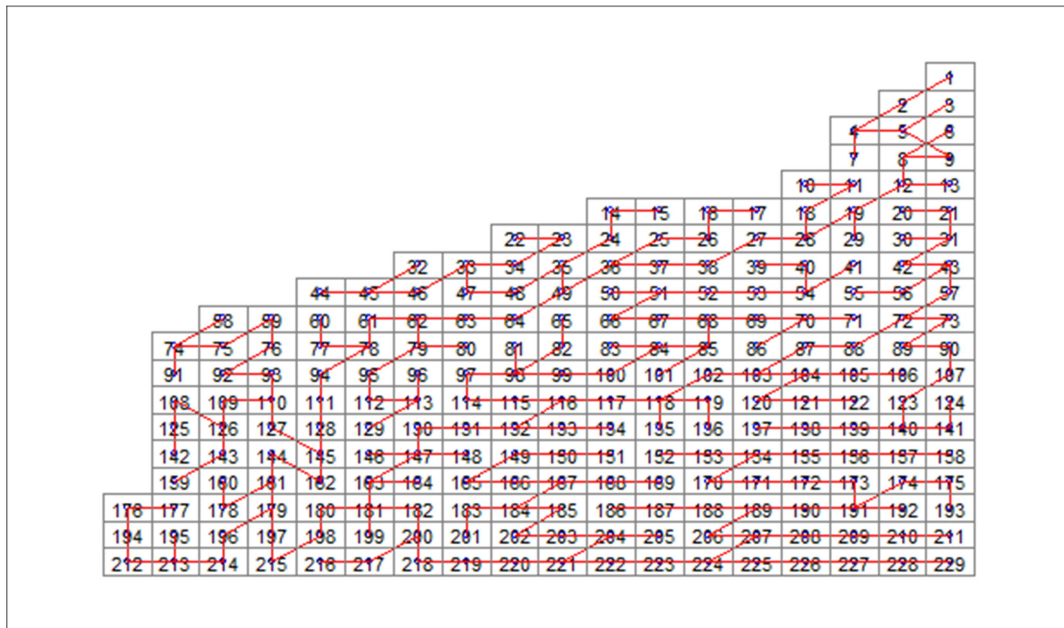


Figura 2 – Exemplo de árvore geradora mínima (média do verão).

O Algoritmo então agrupa geo-objetos com características semelhantes de acordo com a distância entre os centroides, como mostrado na figura 3.

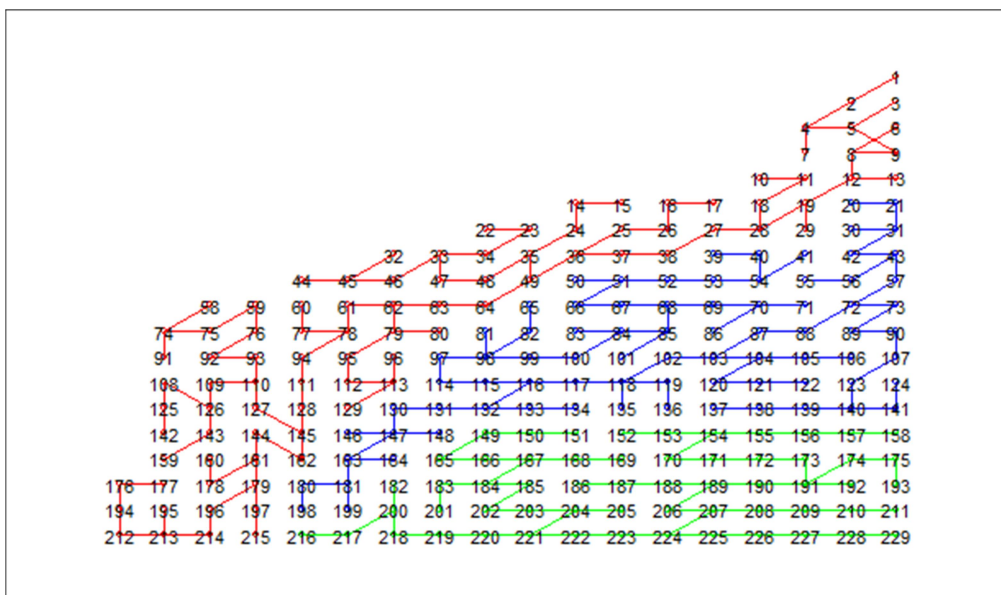


Figura 3. Exemplo de agrupamento de geo-objetos com características semelhantes (média do verão).

### 3 Resultados

#### 3.1 Climatologia

Com o banco de dados organizado em meses foi possível observar a variação média da concentração de clorofila-a. o mês de fevereiro foi o mês em que os valores médios foram menores e setembro obteve as maiores médias como pode ser visto na figura 4.

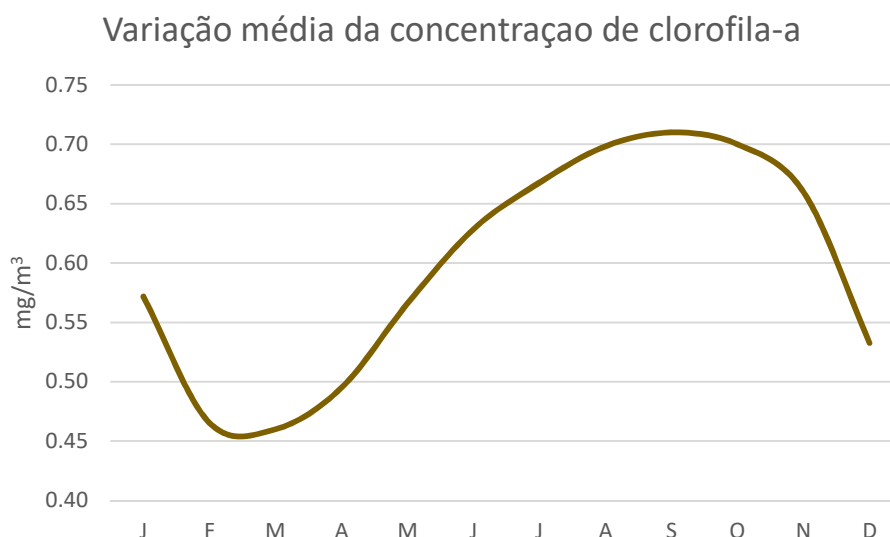


Figura 4 – Valores médios agrupados por mês de concentração de clorofila-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) para o período de setembro de 1997 a novembro de 2018.

Também foi possível observar essa variação na forma de mapas sazonais. A figura 5 apresenta os mapas de concentração da Bacia de Santos por estação: A - verão, B - outono, C - inverno, D - primavera. Nota-se que a influência das águas oceânicas mostradas no fatiamento com a cor branca (com concentração de clorofila-a mais baixa) é mais evidente no verão e no outono, no período de inverno as águas costeiras (cor verde) estão mais presente do que nos outros períodos.

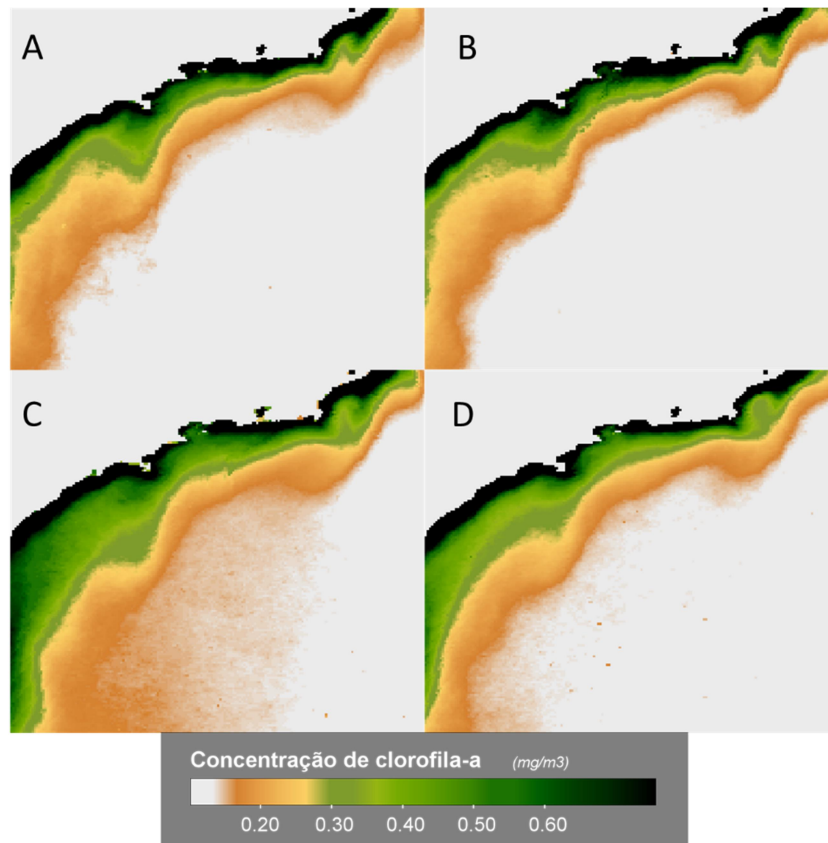


Figura 5 - Concentração de clorofila-a ( $\text{mg/m}^3$ ) na região da Bacia de Santos por média sazonal. A - Verão, B - Outono, C - Inverno, D – Primavera costeira para o período de setembro de 1997 a novembro de 2018.

Com a série de médias da região foi possível observar um padrão cíclico onde os meses mais quentes possuem concentração de clorofila-a menores e os meses mais frios possuem maior concentração de clorofila-a. A figura 6 exibe os valores médios do sensor MODIS plotados em série. É possível observar que linha ajustada no começo da série tem média inferior aos valores observados no fim da série ( $0.33$  e  $0.40 \text{ mg/m}^3$ , respectivamente), outra característica interessante são os picos no inverno dos anos de 2007 e 2017, esses períodos foram marcados pela presença de grandes quantidades de blooms fitoplanctônicos na região.

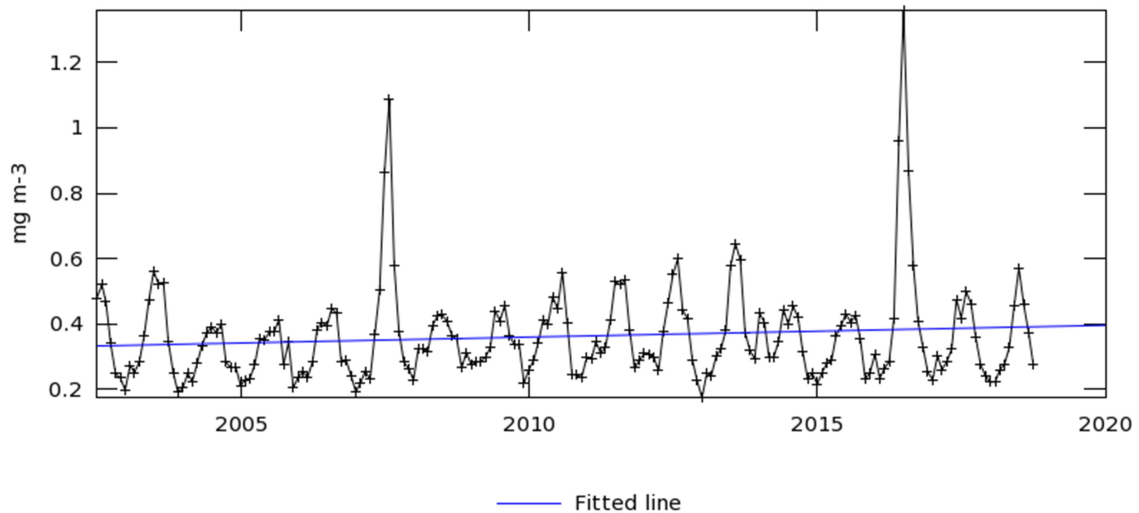


Figura 6 – Média dos valores mensais da concentração de clorofila-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) na região da Bacia de Santos com linha ajustada para o período de janeiro de 2002 a novembro de 2018.

### 3.2 SKATER

A combinação entre as variáveis: concentração de clorofila-a (CHL), fluorescência (FLH), temperatura da superfície marinha (SST), região fotossinteticamente ativa (PAR), carbono orgânico particulado (POC), profundidade e altura do mar foi suficiente para a regionalização da bacia de Santos. O resultado da regionalização para a série de dados de janeiro de 2002 a novembro de 2018 é mostrado na figura 7. Foi possível verificar a presença de três classes principais, aqui denominadas aqui como região costeira (classe vermelha), região oceânica (classe amarela) e região intermediária (classe laranja). A região oceânica mais central possui a maior variação sazonal, no outono ela fica com menos polígonos englobados, a interface entre as três regiões (próximo ao litoral norte de Santa Catarina) é o local onde houve a maior variação entre estações. Houve pouca variação entre os resultados do verão e inverno, o mesmo ocorreu na regionalização do outono e da primavera.

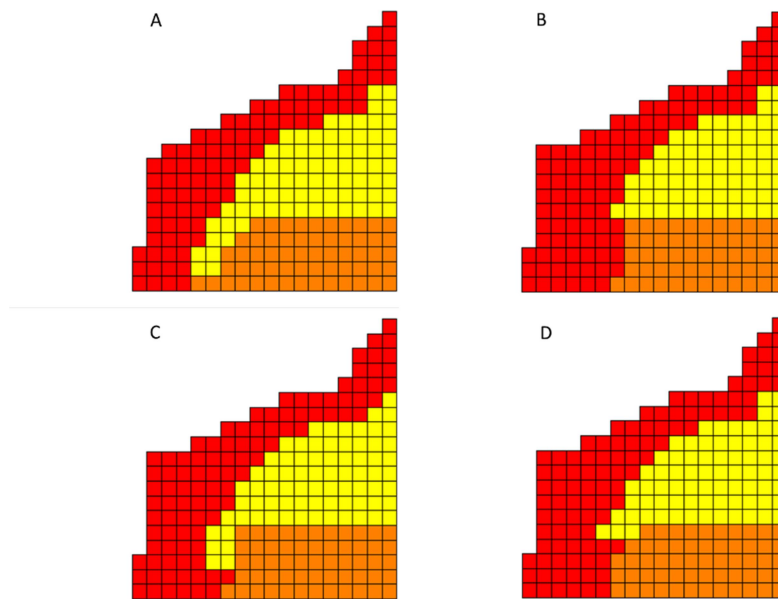


Figura 7 – Regionalização da região da Bacia de Santos utilizando o algoritmo SKATER por média sazonal. A - Verão, B - Outono, C - Inverno, D - Primavera. Para o período de janeiro de 2002 a novembro de 2018.

É interessante observar que apesar da grande quantidade de dados processada existe uma tendência do SKATER a classificar as regiões dentro dos limites da profundidade, como as variáveis selecionadas estão relacionadas com a dinâmica das comunidades fitoplanctônicas e as regiões mais próximas à costa (mais rasas) sofrem maior influência antrópica, como o aporte de nutrientes de maneira descontrolada por meio da poluição é interessante observar esse gradiente. A região oceânica representa bem (independente da estação) o polígono do pré-sal (nome dado às reservas de hidrocarbonetos em rochas calcárias localizadas abaixo de camadas de sal petrificadas), que nos últimos anos vem sendo local de intensa exploração de jazidas de petróleo. Esse trabalho pode ser utilizado como base para estudos de monitoramento da qualidade da água na Bacia de Santos.

#### 4 Conclusão

Com a série de imagens de satélite foi possível realizar a descrição básica da concentração de clorofila-a. Foi possível observar a variação média dessa variável, o mês de fevereiro foi o que apresentou os menores valores médios e setembro obteve as maiores médias. que a influência das águas oceânicas (com concentração de clorofila-a mais baixa) é mais evidente no verão e no outono, no período de inverno as águas costeiras estão mais presentes do que nos outros períodos.

O SKATER mostrou variação das regiões da bacia de Santos com mapas sazonais. Apesar das variações entre estações serem sutis, houve menor variação entre os resultados do verão e inverno e o mesmo ocorreu na regionalização do outono e da primavera.

### **Referências Bibliográficas**

ACKER, J. G.; LEPTOUKH, G. 2007. Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data, **Eos, Trans. AGU**. 88(2), 14-17.

ASSUNÇÃO, R.M., LAGE J.P., AND REIS, E.A. 2002. Análise de conglomerados espaciais via árvore geradora mínima. **Revista Brasileira de Estatística**, 62, 1-23.

ASSUNÇÃO, R. M, NEVES, M. C., CAMARA, G. AND FREITAS, C. DA C. 2006. Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees. **International Journal of Geographical Information Science** Vol. 20, No. 7, August 2006, 797-811

GRODSKY, S. A.; REVERDIN, G.; CARTON, J. A.; COLES, V. J. Year-to-year salinity changes in the Amazon plume: Contrasting 2011 and 2012

Aquarius/SACD and SMOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, v. 140, p. 14–22, 2014.

KIØRBOE, T. **A mechanistic approach to plankton ecology** (Princeton University Press, 2008).

LONGHURST, A., SATHYENDRANATH, S., PLATT, T., CAVERHILL, C., 1995. An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research* 17, 1245–1271.

PATTI, B. et al. Role of physical forcings and nutrient availability on the control of satellite-based chlorophyll a concentration in the coastal upwelling area of the Sicilian Channel. **Sci. Mar.** 74(3), 577–588 (2010).

SAWAKUCHI, H. O.; BASTVIKEN, D.; SAWAKUCHI, A. O.; KRUSCHE, A. V.; BALLESTER, M. V. R.; RICHEY, J. E.; 2014. Methane emissions from Amazonian Rivers and their contribution to the global methane budget, **Global Change Biology**, v. 20, n. 9, p. 2829-2840.

VALENTE, A et al. 2016. A compilation of global bio-optical in situ data for ocean-colour satellite applications. **Earth System Science Data**, 8(1), 235-252, <https://doi.org/10.5194/essd-8-235-2016>

VALENTI, D., DENARO, G., SPAGNOLO, B., CONVERSANO, F. & BRUNET, C. How diffusivity, thermocline and incident light intensity modulate the dynamics of deep chlorophyll maximum in **Tyrrhenian Sea**. **PLoS ONE** 10(1), e0115468 (2015).

VELDHUIS, M. J. W., TIMMERMANS, K. R., CROOT, P. & VAN DER WAGT, B. Picophytoplankton; a comparative study of their biochemical composition and photosynthetic properties. **J. Sea Res.** 53, 7–24 (2005).