

Uso do Sensoriamento Remoto na Identificação de Províncias Biogeoquímicas Marinhas no Atlântico Sul

Jean Farhat de Araújo da Silva¹
Milton Kampel¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{jean.silva,milton.kampel@inpe.br }

Abstract.

The classification of marine biogeochemical provinces (PBGQ) provides a useful framework for understanding the mechanisms of interaction and control of physical, chemical and biological processes that reflect the heterogeneity of the oceanic environment in different locations on the planet. Studies focused on the variability of the Atlantic Ocean in recent years, has been an important issue for the understanding of processes and phenomena that impact directly on society. Thus, the objective of this work consists in partitioning the South Atlantic Ocean in PBGQ through an unsupervised cluster method named Fuzzy C-Means (FCM), using remote sensing, modelling and in situ data in the period from 2006 to 2015. Through the Silhouette criterion, 9 clusters were suggested as input number to FCM algorithm where the elements were better represented in their respective groups. The obtained partition of South Atlantic Ocean is related to the presence of oceanographic features and processes and with the associated variables here used for their delimitation, specially sea surface temperature, mixed layer depth and chlorophyll-*a* concentration.

Keywords: marine biogeochemical provinces, remote sensing, South Atlantic, fuzzy, províncias biogeoquímicas marinhas, sensoriamento remoto, Atlântico Sul, fuzzy.

1. Introdução

As províncias biogeoquímicas marinhas (PBGQ) podem ser definidas como diferentes regiões oceânicas caracterizadas por forçantes físicas coerentes a condições ambientais que eventualmente são representativas de ecossistemas oceânicos em macroescala (Vichi et al., 2011). Estas PBGQ podem ser similarmente definidas como Grandes Ecossistemas Marinhos (Duda e Sherman., 2002) se estendendo desde áreas costeiras até os limites de correntes oceânicas. São caracterizadas por variáveis ambientais como a batimetria, hidrografia, produtividade primária e relações tróficas de dependência entre as populações (Longhurst, 2007).

A classificação em PBGQ é importante para a identificação de relações entre forçantes físicas oceânicas e a distribuição fitoplanctônica (Platt et al. 2005), além de subsidiar estimativas globais da produtividade primária oceânica (Longhurst 2007). Da mesma forma, auxiliam ou suportam esforços de monitoramento ambiental realizados por programas específicos, como por exemplo, o monitoramento contínuo do plâncton marinho (ZHAI et al., 2013). Estas informações contribuem para o gerenciamento de recursos costeiros, a identificação de habitats pelágicos (Hobday 2011) e áreas de prospecção para a pesca (Reygondeau et al. 2012).

Tendo em vista a ideia de que as PBGQ apresentam uma distribuição dinâmica (Platt et al., 2008), a obtenção de dados por sensoriamento remoto orbital torna-se uma alternativa importante pois permite a caracterização da variabilidade espaço-temporal e atualizações ao longo do tempo. Estudos anteriores utilizaram produtos de sensoriamento remoto como a concentração de clorofila-*a* (CSM) indexando a biomassa fitoplanctônica e a temperatura da superfície do mar (TSM) indexando forçantes físicas para classificar PBGQ em diferentes localidades e escalas (Blondeau et al. 2014). Outros estudos também integraram dados *in situ* de nutrientes e salinidade (Reygondeau et al. 2013). Cabe mencionar que atualmente é possível obter estimativas globais da salinidade na superfície do mar por satélite (Tzortzi et al.

2016). Similarmente, dados obtidos por modelagem numérica podem ser úteis na delimitação de PBGQ. Por exemplo, a camada de mistura abriga grande parte da produtividade fotoautotrófica oceânica (Zhai et al. 2013), cujo ciclo sazonal no oceano global pode ser formalizado em modelos conceituais, característicos de varias regiões e respectivos parâmetros ambientais (Sverdrup 1953).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consiste em particionar o oceano Atlântico Sul em PBGQ com uso de um classificador não supervisionado, utilizando dados anuais de sensoriamento remoto, modelagem e *in situ* no período de 2006 a 2015. As classes obtidas são discutidas em termos dos processos físicos, químicos e biológicos atuantes em cada região.

2. Metodologia de Trabalho

A área de estudo compreende o oceano Atlântico Sul aqui limitado entre as latitudes 10°N-60°S e longitudes 70°W-30°E. Foi gerada uma base de dados referente a produtos médias mensais de sensoriamento remoto incluindo as seguintes variáveis ambientais de interesse: (i) temperatura da superfície do mar (TSM), (ii) concentração de clorofila-*a* (CSM), (iii) radiação fotossintética disponível (PAR), (iv) profundidade da camada de mistura (PCM), e (v) batimetria. A Tabela 1 apresenta as fontes e principais características dos dados utilizados. Foram calculadas as médias anuais de cada variável de interesse, com exceção da batimetria. As variáveis PCM e batimetria foram reamostradas para 9 km de modo que toda a base de dados fosse representada em uma mesma resolução espacial.

A Tabela 1 abaixo indica a fonte dos dados utilizados no trabalho em que as variáveis CSM, TSM e PAR são derivadas de dados do sensor MODIS/Aqua com resolução espacial de 9 km, disponíveis em <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/13>. Os dados de PCM utilizados neste trabalho são gerados pelo *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC) com resolução espacial de 27 km, disponíveis em <http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.monthly.hdf.mld.fnmoc.php>.

Tabela 1. Variáveis utilizadas para a partição do oceano Atlântico Sul em Províncias Biogeoquímicas. CSM=concentração de clorofila-*a*; TSM=temperatura da superfície do mar; PAR=radiação fotossintética disponível; PCM=profundidade da camada de mistura. (ver texto para fonte dos dados).

Variáveis	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Fonte	Período de disponibilidade
CSM	Mensal	9km	MODIS/Aqua - NASA	2002/07 – 2015/05
TSM	Mensal	9km	MODIS/Aqua - NASA	2002/07 – 2015/12
PAR	Mensal	9km	MODIS/Aqua - NASA	07/2002 - 12/2015
PCM	Mensal	27km	TOPS/FNMOC	2005/07 – 2015/12
Batimetria	Atemporal	1km	ETOPO1 - NOAA	A partir de 2009

Os dados foram normalizados entre 0 a 1 utilizando os valores mínimos e máximos (Equação 1):

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \quad (1)$$

Onde: x_{ij} é o valor para cada pixel; $\max_j(x_{ij})$ é o valor máximo para determinado mês e $\min_j(x_{ij})$ é o valor mínimo.

Na etapa seguinte, aplicou-se o algoritmo de agrupamento *Fuzzy c Means* (FCM) sobre os dados reamostrados e normalizados. Agrupamentos descontínuos ou discretos representam

uma classe específica em que cada membro possui uma adesão plena a esta. Por outro lado, as classes em que cada membro apresenta diferentes graus de pertinência são chamadas classes contínuas (Mcbratney e Gruijter, 1992). Frequentemente usada em reconhecimento de padrões, a lógica *fuzzy* é um método de agrupamento que permite que um determinado objeto pertença a dois ou mais grupos (Bezdek, 1984).

O algoritmo de agrupamento não-supervisionado FCM proposto por Bezdek (1984) permite encontrar graus de pertinência de conjunto de dados às determinadas classes ou grupos gerados. Esses graus de pertinência são uma generalização da teoria dos conjuntos *fuzzy* e podem ter valores de adesão que variam entre 0 e 1, onde 1 representa a total pertinência do objeto ao centro de determinada classe e 0 representa dissociação completa (Olimpia et al., 2016). A formulação do FCM pode ser entendida de acordo com a Equação 2.

$$J_m = \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_c} \mu_{ij}^m d^2 (X_j V_i) \quad (2)$$

Onde N_s é o número total de observações j no conjunto de dados, N_c é o número de grupos separados i , d é a distância euclidiana entre um vetor de observação X_j e o centro de agrupamento V_i , μ_{ij} é o grau de pertinência dos membros da observação j ao i grupo (um valor entre 0 e 1), e m é o expoente de ponderação.

Para delimitar o número de classes (*clusters*) de entrada no algoritmo FCM, foi aplicado o critério *Silhouette* (Rousseeuw, 1987) utilizado para representar a compactação e separação dos agrupamentos graficamente com base na proximidade entre os objetos de um determinado grupo em relação à distância euclidiana desses objetos ao grupo mais próximo (Fontana, 2009). A *Silhouette* varia entre -1 e 1 onde um valor alto indica que o objeto está mais bem situado em um determinado grupo e valores negativos indicam que o objeto pode ter sido atribuído erroneamente a um grupo. O critério (ou largura) *Silhouette* é calculado de acordo com a Equação 3:

$$silhouette (x_i) = \frac{b(x_i) - a(x_i)}{\max \{a(x_i), b(x_i)\}} \quad (3)$$

Onde $a(x_i)$ corresponde à dissimilaridade média do objeto (x_i) em relação a todos os demais objetos do grupo a ; e $b(x_i)$ compreende a menor dissimilaridade média de (x_i) dos objetos de um outro grupo b .

3. Resultados e Discussão

De acordo com Longhurst (2007), o Atlântico Sul pode apresentar 11 classes ou grupos. Com a aplicação do critério *Silhouette* foram sugeridos 9 grupos (Figura 1A) de entrada no algoritmo FCM, que comparado ao gráfico resultante de 11 grupos (Figura 1B) apresentou uma melhor configuração dos elementos em seus respectivos grupos, com menos elementos próximos a -1.

Desta forma, a região de estudo foi particionada em 9 classes com a aplicação do algoritmo FCM. A Figura 2 apresenta as classes geradas pelo FCM, assim como a Figura 3 demonstra os graus de pertinência a cada classe em uma base pixel-a-pixel.

A Figura indica 2 demonstra a configuração espacial das 9 classes produzidas pelo FCM sobre a área de estudo do trabalho. Observa-se uma variação latitudinal entre as classes, sobre regiões de provável influência de feições oceanográficas. A Figura 3 indica separadamente as classes geradas, abordando os graus de pertinência de cada pixel a estas classes. Os graus de

pertinência representam o resultado da lógica *fuzzy* abordada, indicando que cada classe pode estar submetida à influência dinâmica de mais de um processo ou feição oceanográfica.

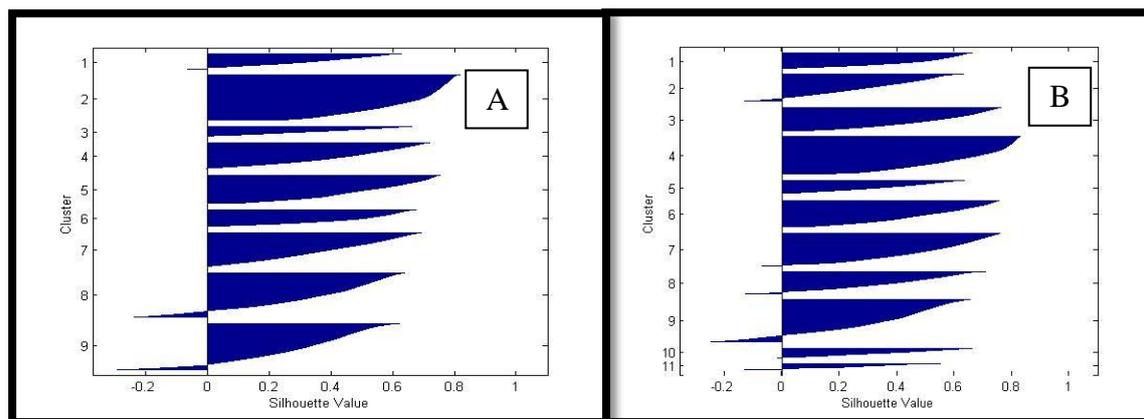


Figura 1. Gráficos dos valores *Silhouette* para a determinação do número de classes a serem inseridas no algoritmo FCM. (A) corresponde ao conjunto de 11 grupos e (B) 9 grupos.

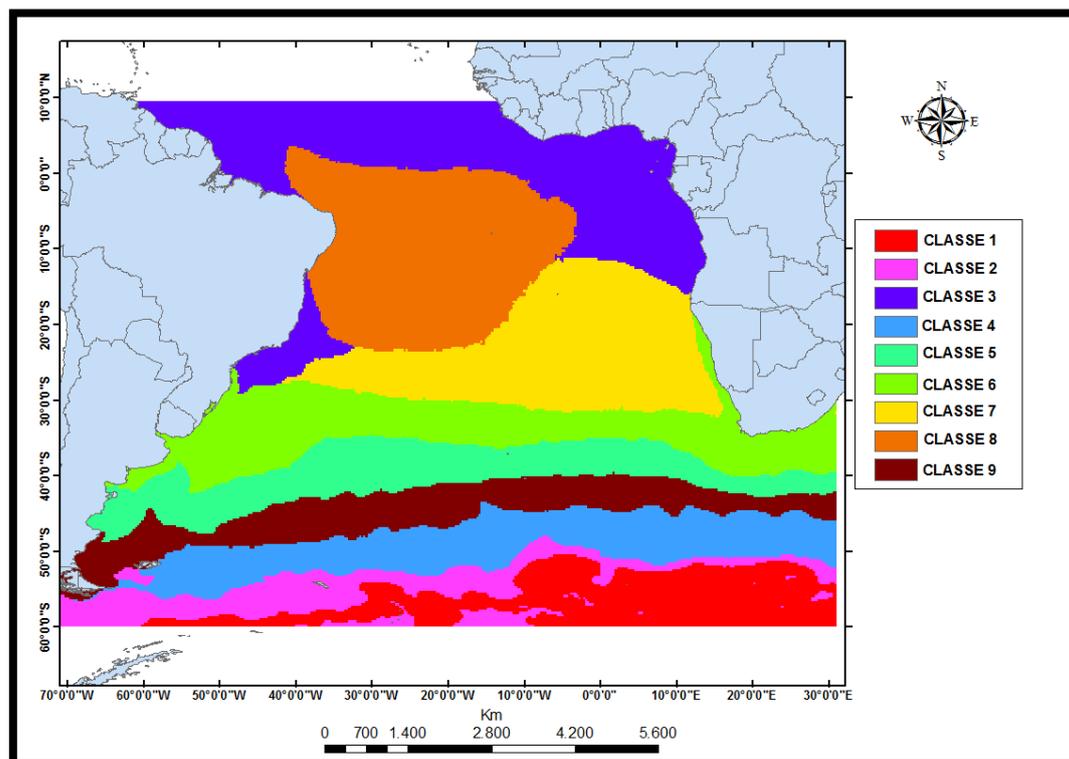


Figura 2. Representação das classes geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada – temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da camada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma classe.

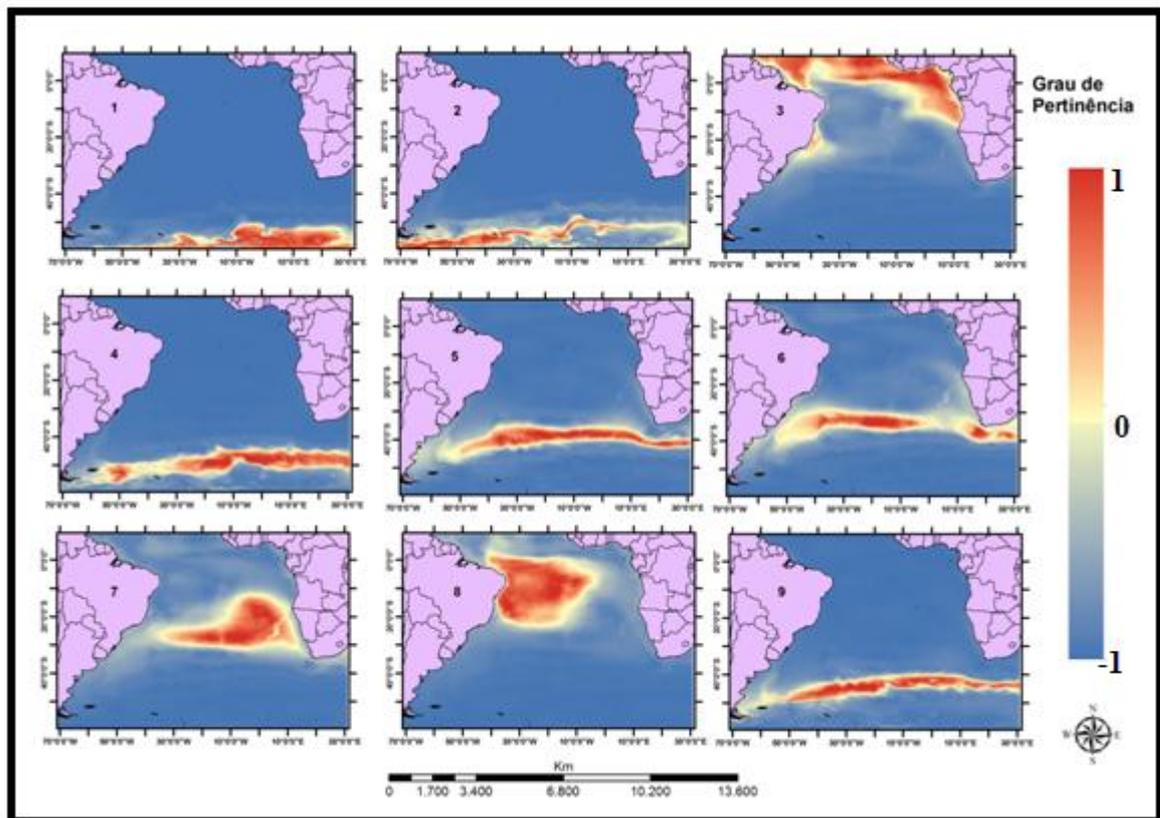


Figura 3. Graus de pertinência (-1 a 1) pixel-a-pixel referentes às 9 classes obtidas com a aplicação do algoritmo FCM. Os números de 1 a 9 representam as classes.

As classes 1 e 2 localizam-se em uma região sob influência da Corrente Circumpolar Antártica (ACC). Esta corrente flui no sentido horário de oeste para leste em torno da Antártica e segundo Deacon (1984) percorre a porção sul de todos os oceanos. Nesta região, entre as latitudes 50°-60°S há a presença de ventos fortes e constantes que sopram de oeste e noroeste (Longhurst, 2007) o que pode estar relacionado a uma maior variabilidade da PCM sobre o conjunto de pixels com elevados graus de pertinência apresentados na classe 1. A classe 2 parece estar associada à variação dos valores de TSM presentes na ACC, que em média variam de -1 a 5°C (Deacon 1984).

Em relação ao que foi encontrado na classe 3, observa-se uma provável influência das variáveis TSM e CSM sobre a região do oeste africano entre aproximadamente 10°S-10°N. Próximo a esta região, percorre a Corrente da Guiné (CG) localizada aproximadamente a 3°N (Henin et al., 1986), sendo abastecida pela Contracorrente Norte Equatorial e a Corrente das Canárias, que ao variarem sazonalmente, afetam a variabilidade da CG (Ingham, 1970). A CG inclusive apresenta alta produtividade primária em decorrência dos processos de ressurgência costeira, que ocorre em certas localidades do oeste africano (Bakun, 1978).

Interessante notar que entre 15°-25°S do continente sul-americano, alguns valores elevados de grau de pertinência podem estar configurando uma feição oceanográfica decorrente da influência da batimetria, CSM e TSM próximo à região de Abrolhos, destacando uma região que pode ser um sinal da ressurgência costeira que se inicia na região do Espírito Santo e se propaga até o Rio de Janeiro. Já na extremidade norte do Brasil, próximo à divisa com as Guianas que inclui a região da Foz do Rio Amazonas, pode-se inferir uma feição semelhante à retroflexão da Corrente Norte do Brasil, que retroflete para leste entre 5°N e 10°N, alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (Flagg et al., 1986), apresentando predominantemente influência da CSM.

A classe 4, assim como as classes 1 e 2, aparenta influência da ACC em sua porção mais ao norte, onde percorre parte da Frente Subantártica (SAF) aproximadamente entre 42°S e 48°S, sendo uma localidade de floração de algas devido a ocorrência de ressurgências (Klinck e Nowlin, 1986). Tem portanto, a CSM como principal variável configuradora desta PBGQ, a qual Longhurst (2007) define como *Subantarctic Water Ring Province* (SANT).

Em relação às classes 5 e 9 considera-se a formação destas PBGQ, respectivamente, sobre a Zona de Convergência Subtropical (STCZ) que segundo Deacon (1984), divide na porção sul, as circulações anticiclônicas dos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico da circulação ciclônica da ACC, percorrendo o globo entre aproximadamente 35°S–45°S. A STCZ ocorre abaixo de uma região com diminuição acentuada dos ventos de oeste no Oceano Antártico, apresentando certa variabilidade da PCM entre 30 e 125 metros, além de gradientes de TSM de 14-18°C no verão e 11-15°C no inverno, respectivamente (Longhurst, 2007). Estas características sugerem uma maior influência de tais variáveis sobre os pixels de maior grau de pertinência na partição de ambas PBGQ.

A classe 6 demonstra estar diretamente associada às variações de TSM, onde ocorre a Confluência Brasil-Malvinas, em torno de 36°S-38°S. Nesta região desenvolvem-se ondas de 300-400 km de comprimento (Olson et al., 1988). Outra feição oceanográfica retratada nesta PBGQ é a Corrente das Agulhas (CA) ao sul da África do Sul, onde formam-se vórtices de núcleo quente decorrentes de estruturas vorticais da CA na região de retroflexão desta corrente, propagando-se para a direção oeste a centenas de quilômetros (Kamenkovich et al., 1996).

Em relação à classe 7, sugere-se uma influência das variáveis TSM, CSM, PCM e PAR sobre a PBGQ configurada por 2 feições oceanográficas sobre as regiões com maior grau de pertinência dos pixels: o Giro Subtropical do Atlântico Sul e a Corrente da Benguela. No Atlântico Sul, o Giro Subtropical sofre grande influência dos ventos alísios, repercutindo em uma variação sazonal significativa na sua profundidade da camada de mistura que é forçada pela variação sazonal na força do vento e fluxo de calor da superfície do mar (Longhurst, 2007). A Corrente da Benguela inicia-se como um fluxo de correntes marítimas em torno da extremidade sul do Giro Subtropical, com sua direção ao norte, onde contorna a costa ocidental da África Equatorial até 24°S-30°S (Peterson e Stramma, 1991). Com os ventos de sudeste soprando da costa sobre a região oceânica, ocorrem afloramentos de águas frias e ricas em nutrientes, o que promove o desenvolvimento do fitoplâncton e da produtividade primária nesta região (Boyer et al., 2000). Em relação a PAR, esta variável parece influenciar a configuração desta classe, uma vez que os maiores graus de pertinência se encontram sobre proximidades do trópico de capricórnio, região onde a radiação solar é mais intensa.

Sobre a classe 8, verifica-se uma provável influência das variáveis TSM e CSM sobre a região de elevado grau de pertinência, uma vez que próximo a tal localidade percorre a Corrente Sul Equatorial (CSE), que se desloca do oeste africano para a porção leste do continente sul-americano, estendendo-se entre 4°N-25°S com temperaturas superficiais médias de 26°C a 28°C (Mayer et al., 1998).

4. Conclusões

A partição do Atlântico Sul em 9 PBGQ pelo algoritmo FCM captou a dinâmica superficial oceânica permitindo identificar os principais processos e feições oceanográficas que ocorrem nestas regiões. As variáveis que se mostraram mais influentes na delimitação das províncias foram a TSM, PCM e CSM, seguidas pela PAR e batimetria. Influência relativamente maior da PAR pode ser notada próximo ao trópico de Capricórnio.

Cabe mencionar que os processos e feições oceanográficas aqui discutidos desempenham papel importante no transporte de propriedades físicas (momento e

vorticidade), termodinâmicas (calor), químicas (sal, nutrientes) e biológicas (clorofila) relevantes no desenvolvimento dos ecossistemas marinhos (Schmidt, 2004).

O exercício aqui realizado com dados médios anuais será aprofundado em escala sazonal de modo a capturar a dinâmica temporal das PBGQ no espaço geográfico.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo projeto CRN3094 do *Inter-American Institute for Global Change Research (IAI)* que é apoiado pela *US National Science Foundation (Grant GEO-1128040)*. Silva, J.F.A. é bolsista de MSc. CAPES.

Referências Bibliográficas

- Bakun, A. Guinea Current Upwelling. *Nature*, v. 271, 1978, p. 147-150, 1978.
- Bezdek. J.C., Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms, v. 1. New York: **Plenum**, p. 280, 1981.
- Boyer, D; Cole, J., Bartholome. C. Southwestern Africa: Northern Benguela Current region. *Marine Pollution Bulletin*, v. 41, 2000, p. 123-140, 2000.
- Blondeau. D.; Gower. J.F.R.; Dekker. A.G.; Phinn. S.R.; BRANDOC, V.E. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in Oceanography*. v. 123. p.123-144, 2014.
- Deacon. G. **The Antarctic circumpolar ocean**. Cambridge University Press, 1984, p.180, 1984.
- Duda, A.M; Sherman, K. A new imperative for improving management of large marine ecosystems. *Ocean & Coastal Management*, v. 45, p. 797–833, 2002.
- Flagg. C.N; Gordon, R.L; Mcdowell, S. Hydrographic and Current Observations on the Continental Slope and Shelf of the Western Equatorial Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*. v. 16, p. 1412–1429, 1986.
- Fontana. A; Naldim. **Estudo e Comparação de Métodos para Estimação de Números de Grupos em Problemas de Agrupamento de Dados**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009, 54.p.
- Henin. C; Hisard. P; Piton. B. **Observations hydrologiques dans l'ocean Atlantique Equatorial**, Ed. orstom, focal, v. 1, p. 1-191, 1986.
- Ingham. M.C. Coastal upwelling in the northwestern gulf of Guinea. *Bulletin of Marine Science*, v. 20, p.1-34, 1970.
- Kamenkovich. V.M; Leonov. Y.P; Nechaev, D.A; Byrne. D.A; Gordon. A.L. On the influence of bottom topography on the Agulhas eddy. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 26, n. 6, p. 892.912, 1996.
- Longhurst, A. **Ecological Geography of the Sea**, Academic Press, London. p.575, 2007.
- Mayer. D; Molinari. R; Festa. F. The mean and annual cycle of upper layer temperature fields in relation to Sverdrup dynamics within the gyres of the Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 18545-18566, 1998.
- Mcbratney. A; Gruijter. J. A continuum approach to soil classification by modified FuzzyK-Means with extragrades, *J. Soil Sci.*, v. 43, n. 1, p. 159–175, 1992.
- Nowlin. W.D; Klinck, M. The physics of the Antarctic Circumpolar Current. *Rev. Geophys.*, v. 24, p. 469-491, 1986.
- Olimpia. I, Adrian. I, Banb. A. Importance–Performance Analysis by Fuzzy C-Means Algorithm. *Elsevier*. v.50, p.9-16, 2016.
- Olson. D.B; Podestá, G. P., EVANS, R.H., BROWN, O. B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. *Deep-Sea Research*, v. 35, n. 12, 1990.
- Peterson. R.G; Stramma. L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, v. 26, p. 1-73, 1991.
- Platt. T; Bouman, H., Devred, E., Fuentes. C; Sathyendranath, S. Physical forcing and phytoplankton distributions. *Scientia Marina*, v.69 ,p.55 – 73, 2005.
- Platt, T; Sathyendranath, S. Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean. *Remote Sensing of Environment.*, v.112 ,p. 3426 – 3436. 2008.
- Reygondeau, G. et al. Biogeography of tuna and billfish communities. *Journal of Biogeography*, v. 39, n. 1, p. 114–129, 2012.
- ROUSSEEUW, P.J., 1987. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 20: 53-65. doi:10.1016/0377-0427(87)90125-7
- Schmidt. A. C. K. **Interação Margem Continental, Vórtices e Jatos Geofísicos**. 2004. p.211. Tese (Doutorado em Oceanografia Física) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- Sverdrup. H. U. On Conditions for the Vernal Blooming of Phytoplankton. *Journal du Conseil*, v.18, Norsk Polarinstitut, Oslo, p.287-295, 1953.



Tzortzi. E; Srokosz. M; Gommenginger. C; Josey. S. A. Spatial and temporal scales of variability in Tropical Atlantic sea surface salinity from the SMOS and Aquarius satellite missions. **Remote Sensing of Environment**, p.13. 2016.

Vichi. M; Allen. J; Masina. S; Hardman. N. J. The emergence of ocean biogeochemical provinces: A quantitative assessment and a diagnostic for model evaluation. **Global Biogeochemical Cycles**, VOL 25, p.17, 2011.

ZHAI, L. et al. The response of phytoplankton to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, v. 93, p. 159–168, 2013.