

Variabilidade espaço-temporal da concentração de clorofila-a no Oceano Atlântico Equatorial baseados nos dados do sensor MODIS-AQUA

Pedry Frederico Galvão
Carlos Eduardo Peres Teixeira

Universidade Federal do Ceará – UFC
Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR
Fortaleza, CE, Brasil,

Abstract. This study aims to describe the spatial and temporal variability of chlorophyll of Western Equatorial Atlantic Ocean (WEA) based on the analysis of 11 years (2002-2012) of sea surface color (SSC) data collected by the sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The annual and semi-annual variability of the SSC were estimated based on a harmonic analysis using least squares fit. A low pass filter with 365 days was used to quantify the inter-annual variability of the data. Finally, the annual, semi-annual and inter-annual signals were removed from the data, and the standard deviation of this residue was used to estimate the intra-annual variability. The annual cycle explained most of the variability of chlorophyll-a on the North Brazil Current ($R^2 > 60\%$) and the South Equatorial Current (SEC). The amplitudes of the annual cycle in this region varied from 0.02 to 0.05 mg/m³. The annual phase of maximum values occurred earlier on the oceanic region and later on the region under influence of the South Equatorial Current (SEC). The semi-annual cycle do not significantly explain the temporal variability of the SSC in the WEA region. The amplitude of the intra-annual was greater than the inter-annual variability, but its influence was smaller than the annual cycle.

Palavras-chave: Harmonic analysis, Equatorial Circulation, Remote Sensing, Time series, Análise harmônica, Circulação Equatorial, Sensoriamento Remoto, Séries temporais.

1. Introdução

Considerando que os oceanos cobrem cerca de 71% da superfície terrestre, conhecer a distribuição do fitoplâncton torna-se a chave para compreender os processos relacionados aos ciclos biogeoquímicos do planeta (ANATOINE *et al.*, 1996).

Desse modo, ao longo das últimas décadas, os sensores remotos tornaram-se um método bastante eficaz para medir a biomassa fitoplanctônica em escala global através de algoritmos preparados para quantificar a absorção seletiva da radiação solar refletida pela concentração pigmentos fotossintéticos na superfície do mar, principalmente da clorofila-a. A concentração de clorofila pode ainda ser um traçador de processos oceanográficos relacionados a dinâmica de circulação oceânica. Por exemplo, GARCIA *et al.* (2004) estudou processos de meso-escala associados a região de Confluência entre a Corrente do Brasil e a Corrente das Malvinas (BMC) usando imagens do sensor SeaWiFS. Na região equatorial, a clorofila é largamente utilizada na verificação de processos de ressurgência equatorial na margem leste do Oceano Atlântico, porém não foram encontrados trabalhos quantificando a variabilidade espaço-temporal na porção oeste deste oceano. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal descrever a variabilidade espaço-temporal de clorofila-a e estudar a dinâmica de circulação oceânica no Atlântico Equatorial Sudoeste (AEO).

2. Metodologia:

A área de estudo localiza-se na zona oceânica intertropical do Norte e Nordeste Brasileiro, entre as latitudes 4°N - 6.7°S e longitudes 32.3°W - 52°W, conforme mostra a Figura 1a. Foram utilizados 11 anos de dados com resolução espacial de 4 km² e temporal de 8 dias (médias semanais) da concentração de clorofil-a superficial do mar (CSM), coletados pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) instalado a bordo do satélite AQUA. Num total de 489 imagens foram analisadas, entre Julho de 2002 e Dezembro de 2012.

No trabalho cada pixel das imagens foi tratado como uma série temporal e analisados separadamente. Inicialmente utilizou-se uma análise harmônica do ciclo anual e semi-anual através de um procedimento não linear de mínimos-quadrados (EMERY AND THOMSON, 1997), o qual permite determinar a amplitude e fase de máximo destes ciclos determinísticos. Um resíduo R_1 foi encontrado removendo-se a parte determinística dos dados originais de clorofila.

Para explicar a proporção de variação entre os dados originais e os ciclos anuais e semi-anuais, bem como comprovar a veracidade do modelo, calculou-se o coeficiente de determinação (R^2) das séries temporais.

Para observar a contribuição inter-anual da variabilidade de clorofila-a foi aplicado um filtro passa baixa de médias móveis equivalentes a 46 semanas sobre o resíduo (R_1), dando origem a uma série onde os sinais temporais menores do que um ano são excluídos. Para obter a variabilidade intra-anual (R_2) removeu-se a contribuição inter-anual do resíduo R_1 , dando origem a uma série onde só existem sinais não determinísticos menores do que um ano. Com base nos valores de desvio padrão das séries inter e intra anuais quantificamos a amplitude da variabilidade nestes períodos.

3. Resultados e Discussão

3.1 Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Dados Válidos

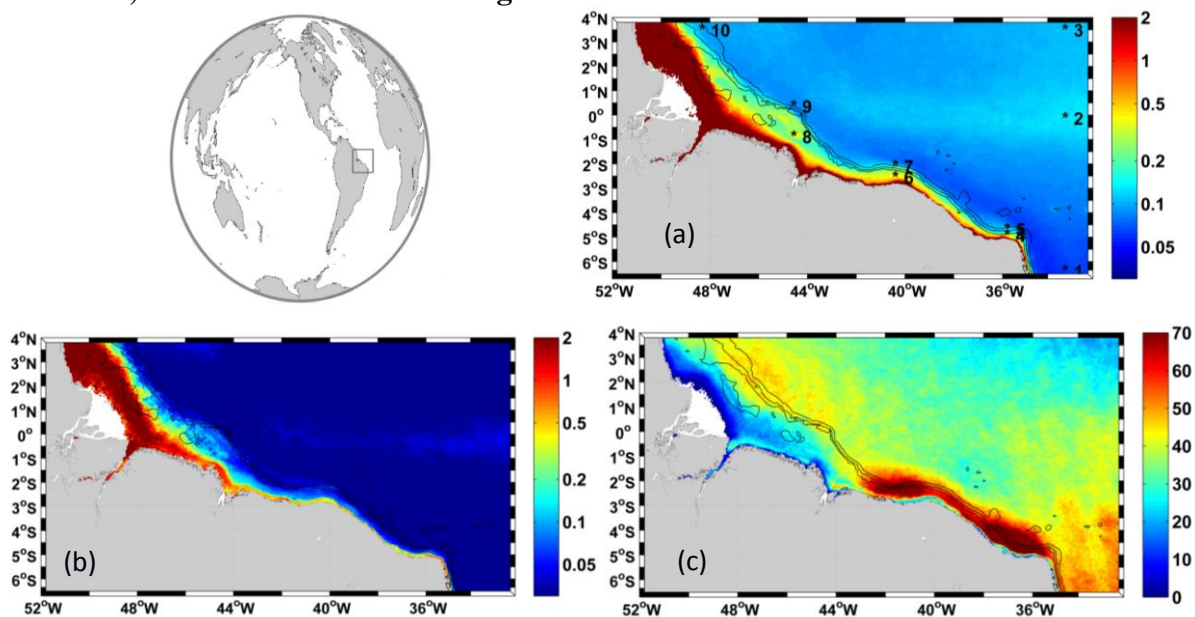


Figura 1. (a) Média (mg/m^3), (b) Desvio Padrão (mg/m^3) e (c) Porcentagem de dados válidos (%) do logaritmo da concentração de clorofila-a entre Julho de 2002 e Dezembro de 2012. Os números na figura c representam pontos usados para criação de séries temporais.

Na Figura 1 podemos identificar que nas áreas da plataforma continental brasileira são encontrados valores de clorofila, em geral, maiores que $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, uma vez que o aporte de nutrientes por parte da drenagem continental e a mistura induzida pela ação das marés e ventos possibilitam um maior desenvolvimento do fitoplâncton (Figura 1b). Constatou-se que o principal contribuidor para elevar a biomassa no regime equatorial é o Rio Amazonas ($>20 \text{ mg}/\text{m}^3$). Aqui deve-se ressaltar que a grande quantidade de material particulado em suspensão desta região pode estar influenciando no sinal de clorofila-a captado pelo sensor.

A medida que se afastam dos ambientes costeiros as concentrações de Clo-a diminuem a valores mínimos, com uma taxa de variação entre $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ a $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$. Ao longo de 0° , em resposta a ressurgência equatorial observam-se maiores valores médios próximos a 0.2

mg/m³. Esta resposta é mais facilmente observada nos valores médios para os meses de julho a setembro e outubro a dezembro (Figura 2 – painéis da esquerda).

Através do mapa de desvio padrão (Figura 1b) pode-se observar que as regiões sobre a plataforma e junto ao Equador apresentam maiores valores de desvio padrão. Observa-se ainda na região de quebra de plataforma à 40° W um máximo local de desvio, aqui atribuído ao efeito de eventos de meso-escala da Corrente Norte do Brasil (CNB) presentes na região.

Próximos de 3°N encontra-se a região de posicionamento médio da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), o que diminui a quantidade de dados válidos (Figura 1c). Na região de plataforma continental e talude do Nordeste Brasileiro foram observadas as maiores porcentagens de dados válidos (≥ 70%), por encontrar-se sob uma região com baixa presença de nuvens (Figura 1c).

No primeiro trimestre do ano a ZCIT atinge sua posição mais ao sul do equador acarretando em menores percentuais de dados válidos para área de estudo (Figura 2 – painéis da direita). Em abril e a ZCIT começa a migrar em direção norte, aumentando a quantidade de dados válidos. Os maiores percentuais de dados válidos para a área de estudo são observados durante os meses de Agosto e Setembro, quando a ZCIT atinge a posição mais ao norte do equador (Figura 2). De forma geral a quantidade de dados válidos encontrado na região são muito superiores aos valores encontrados por outros autores ao usarem a mesma metodologia proposta na porção Sudoeste do Atlântico Sul (ex. Teixeira et al, 2009, Garcia, et al, 2004).

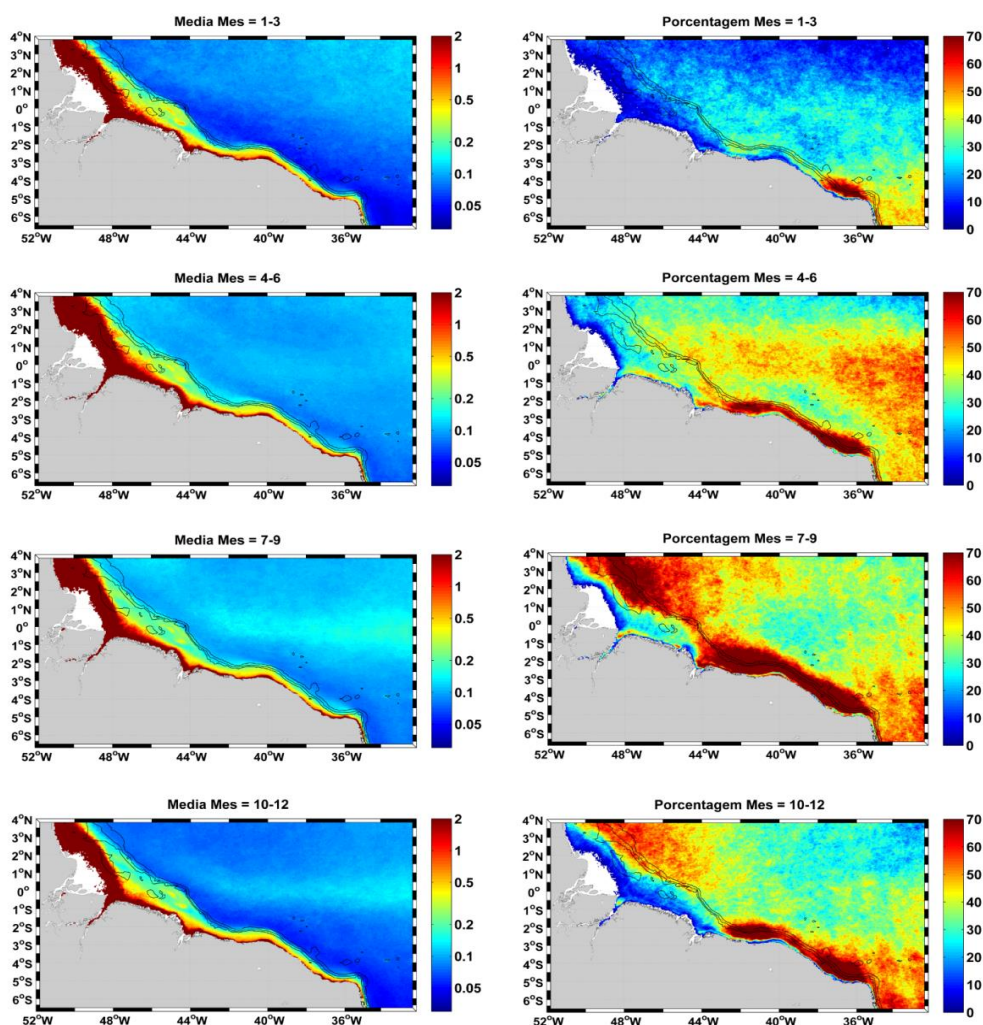


Figura 2. Sequência trimestral da Média (mg/m³) e da Porcentagem de Dados Válidos (%) para todo o período estudado de Julho de 2002 a Dezembro de 2012.

3.2 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-Anual

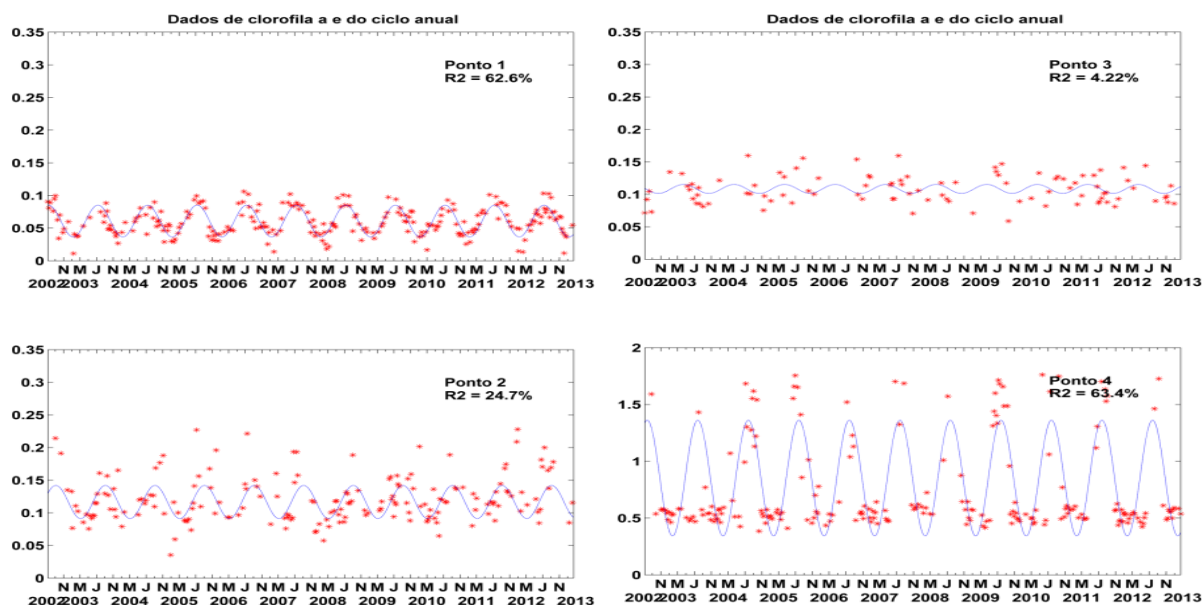


Figura 3. Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 1, 2, 3 e 4 (mg/m³).

Na figura 3 são apresentadas séries temporais de Clo-a e do ciclo-anual proposto para 4 pontos do domínio (figura 1c para localização) exemplificando o ajuste do modelo aos dados. O ponto 1, localizado próximo ao núcleo superficial da Corrente Norte do Brasil ($R^2=62,63\%$) e o ponto 2, localizado na quebra da plataforma continental do Rio Grande do Norte ($R^2=63,38\%$), apresentam um bom ajuste entre os dados observados e o modelo. Já nos pontos 2 e 3, localizados na região equatorial sobre a influência da ITCZ, o ajuste não é adequado, mostrando que estas regiões não apresentam aspectos periódicos anuais na Clo-a.

Em geral, constataram-se baixas amplitudes do ciclo anual ($<0,04$ mg/m³) de clorofila na maior parte da região oceânica (Figura 4). Próximo a região da plataforma e sobre a pluma dos rios e a 0° , na área sob a influência da Correntes Sul Equatorial (CSE), são observadas as maiores amplitudes, porém é importante notar que os valores de R^2 (figura 4c) sobre a região da plataforma é baixo, indicando que o ciclo anual não é representativo da variabilidade nestas regiões. Nas áreas do talude continental, especialmente ao largo do estado do RN e PI, também apresentam altos valores de amplitude do ciclo anual as quais acreditamos serem atribuídas aos eventos de ressurgência devido ao meandramento da CNB frente à mudança de orientação da costa, estas regiões apresentam altos valores de R^2 . Na extremidade noroeste do mapa, por volta de 4° N 47° W, também há um leve acréscimo na amplitude próximo à zona de retroflexão da CNB (entre 5° e 10° N). Ao comparar os mapas de desvio padrão (Figura 1b), média (Figura 1a) e amplitude anual (Figura 4a) percebe-se uma relação direta entre a taxa de concentração da clorofila com a disposição das áreas mais produtivas. O que reforça a ideia de que o ciclo anual é o principal responsável pela variabilidade da clorofila na região oceânica do AEO.

A fase do ciclo anual (Figura 4b) indica o período de valores máximos de amplitude em relação ao primeiro dia do ano e em geral indica valores menores que 30 dias na região oceânica do domínio. As máximas de clorofila ocorreram mais tarde sobre a plataforma continental e zonas oceânicas acima de 2° N (≥ 80 dias), porém como os valores de R^2 nesta região são pequenos (Figura 4(c)) estes resultados devem ser olhados com cuidado. Sobre a região de influência da Corrente Sul Equatorial (0°), as máximas na concentração de Clo-a ocorreram entre 60 e 90 dias.

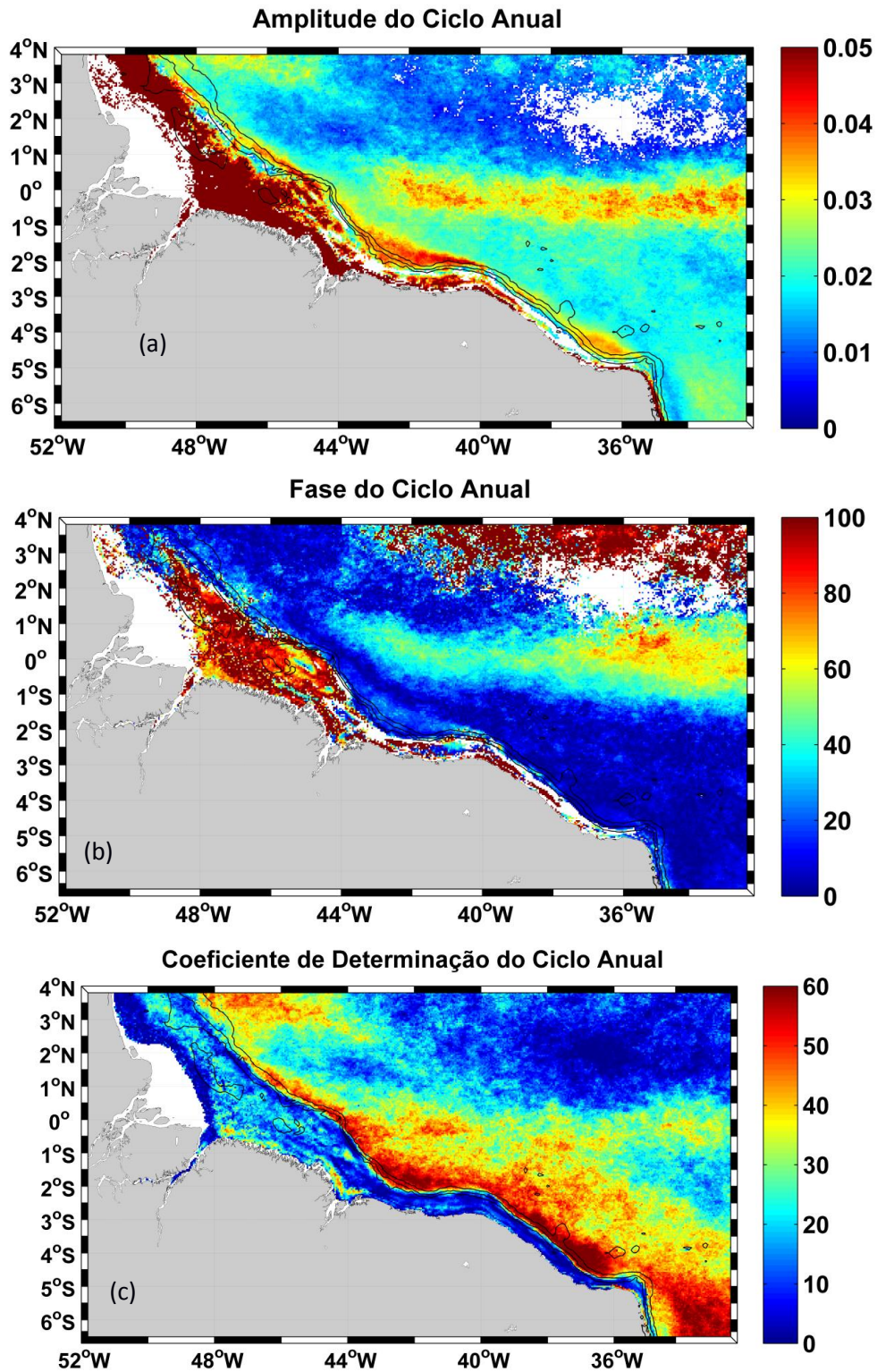


Figura 4. Amplitude (mg/m³), Fase (dias) e Coeficiente de Determinação (%) do Ciclo Anual.

Contrastando com a região de plataforma, altos índices de R^2 ($\geq 60\%$) foram verificados ao longo do talude continental sobre influência da CNB e na região da CSE (30 - 50%) (Figura 4c).

Comparando-se o mapa de R^2 com o percentual de dados válidos (Figura 04c), percebe-se que a escassez de dados não interfere significativamente na validade do modelo anual. Por exemplo, apesar da plataforma continental nordestina apresentar uma porcentagem de dados válidos muito elevada (>60-70%), foram observados os menores valores de R^2 (<10%).

O mapa de R^2 após a adição do harmônico semi-anual apresentou características bastante semelhantes ao harmônico anual, mostrando que o ciclo semi-anual não desempenha um importante papel na variabilidade temporal da Clo-a na região.

3.3 Caracterizações da Variabilidade Inter e Intra-Anual

De forma geral a variabilidade inter-anual é pequena na região oceânica (<0.01 mg/m^3) e relativamente alta sobre a plataforma (>0.04 mg/m^3) (Figura 5a). Valores próximos a 0.02 mg/m^3 também são encontrados próximo a região do Equador como resultado da ressurgência local. A variação inter-anual na região pode estar ligada a respostas remotas dos fenômenos ENSO no Pacífico e Dipolo do Atlântico sobre os ventos e a temperatura no Atlântico (CHRISTIAN *et al.*, 2003).

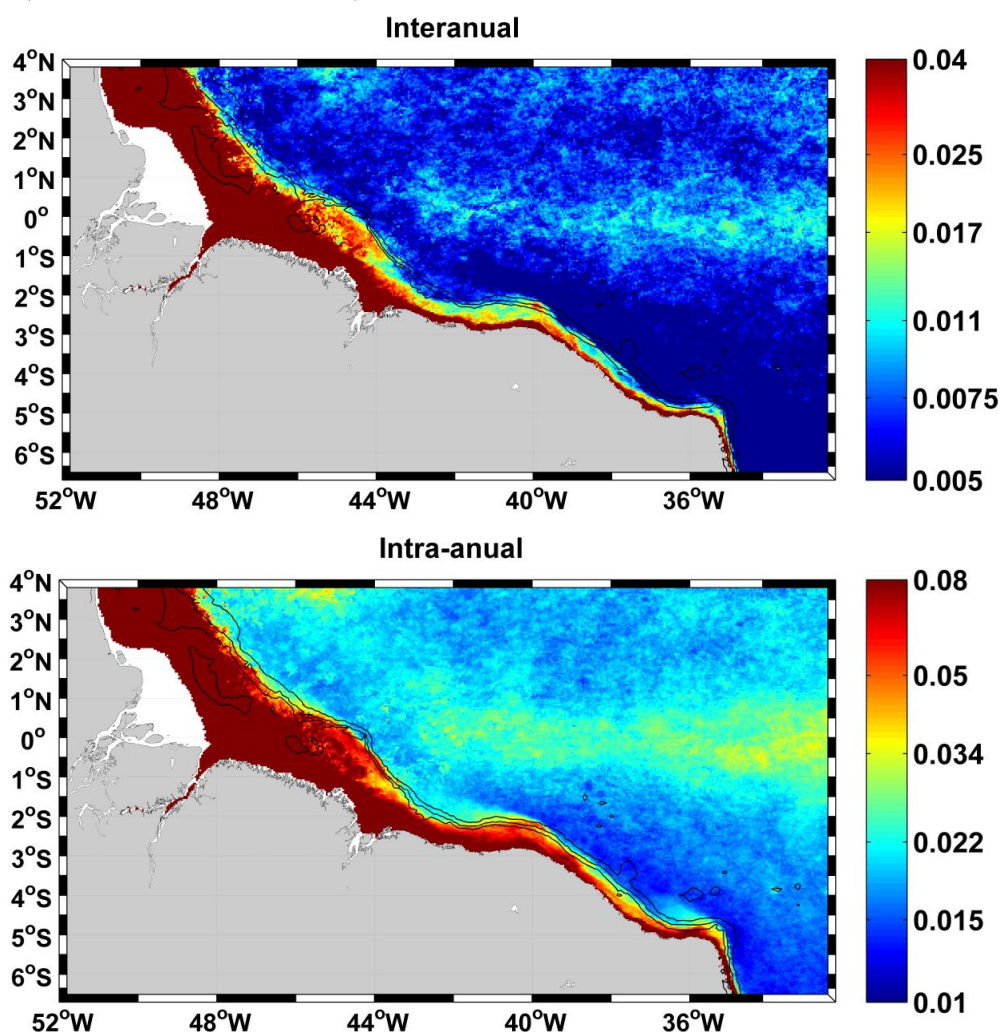


Figura 5. Mapas da variabilidade inter e intra-anual (mg/m^3).

A contribuição intra-anual chegou a desempenhar uma amplitude de duas a três vezes maior do que a variabilidade inter-anual (Figura 5b) em geral com maiores valores sobre o Equador e na plataforma.

No AEO, a variabilidade inter-anual mostrou-se bastante complexa de ano para ano (Figura 6), não apresentando uma uniformidade padrão para os diferentes pontos da área de estudo como os dados de TSM encontrados por Machado (2012). Contudo, o resfriamento sazonal da superfície do mar está diretamente correlacionado com a mistura nutritiva da zona eufótica (PEREZ *et al.* 2005). Assim, mudanças positivas nas anomalias de temperatura podem responder de forma inversa na taxa de clorofila. Comparando com os dados encontrados por Machado (2012) para a mesma região do Atlântico, no período em que as anomalias de TSM inclinavam-se para taxas mais negativas na faixa equatorial, as concentrações de clorofila aumentavam (ponto 2), graças a inserção de águas mais profundas e frias para a superfície que são carregadas de nutrientes.

Os ciclos sazonais de fortalecimentos dos ventos alísios no Equador e de variações na TSM são bem semelhantes em ambos os Oceanos Pacífico e Atlântico. No entanto, diferente do Oceano Pacífico, que possui uma profunda variabilidade inter-anual relacionada às fortes anomalias durante os eventos da fase de aquecimento do El Niño Oscilação Sul (ENSO) (WANG *et al.*, 2013), o Atlântico Equatorial expressa uma fraca variabilidade inter-anual, em toda a região oceânica, sendo os períodos anuais e intra-anuais os maiores responsáveis pela variabilidade temporal da Clo-a.

Na região da plataforma, haja vista o R^2 do modelo anual não apresentar valores significativos sobre a plataforma, são os períodos inter e intra-anuais que melhor representam a variabilidade temporal da Clo-a na região.

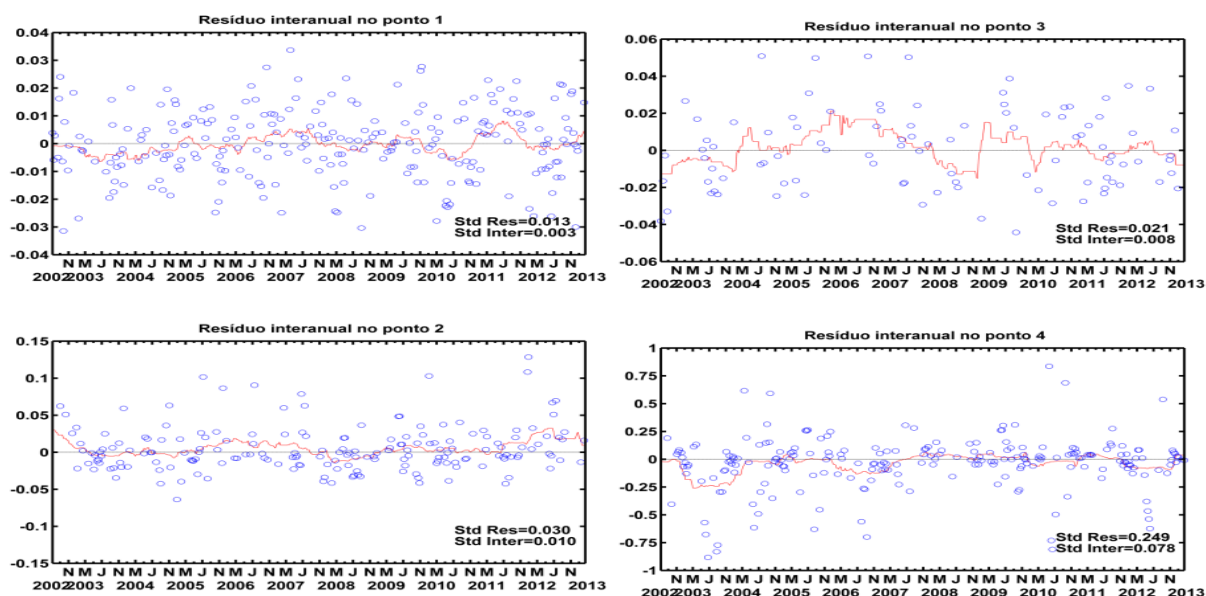


Figura 6. Séries temporais da variabilidade não determinística para os ponto 1, 2, 3 e 4 (mg/m³).

4. Conclusões

De maneira geral, a análise de dados obtidos pelo sensor MODIS/AQUA representaram um considerável avanço no monitoramento ambiental de clorofila-a da superfície do mar, permitindo uma identificação mais apurada dos processos dinâmicos que ocorrem no ecossistema marinho.

Analisando os resultados obtidos pelas séries temporais da CSM pôde-se concluir que a produtividade primária, nessa região do Atlântico Equatorial, reflete um padrão sazonal de afloramentos respeitando a intensidade da energia transferida dos ventos para a coluna d'água.

As maiores taxas de clorofila concentraram-se na zona costeira, em especial sobre a pluma do Rio Amazonas e ao longo da faixa Equatorial. Observaram-se ainda altos valores de Clo-a no talude continental, sugerindo possíveis processos de ressurgência de quebra da plataforma. As porcentagens de dados válidos mostraram-se relativamente altas, com os menores valores associados as mudanças de posicionamento da Zona de Convergência Intertropical.

O ciclo anual apresentou baixas correlações com os dados observados para a maioria da região sobre a plataforma e acima da faixa Equatorial. Entretanto, o harmonico anual e a componente intra-anual ainda são responsáveis pela maior parte da variabilidade de clorofila no Atlântico Equatorial Oeste, principalmente sobre o fluxo da Corrente Sul Equatorial e Corrente Norte do Brasil. Os dados de anomalias inter-anuais revelaram-se bastante pequenos nas regiões oceânicas e grandes sobre a plataforma.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 483850/2012-8 e474755/2011-8), a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) projeto TRANSAQUA CT-AQUAVIÁRIO 01/2010.

Referências Bibliográficas

Christian, J. R.; Murtugudde, Ragu. Tropical Atlantic variability in a coupled physical-biogeochemical ocean model. **Deep Sea Research Part II**, vol. 50, p. 2947-2969, 2003.

Emery, W. J., Thomson, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography**. 1a ed. [S.l.]: Pergamon, 1997.

Garcia, C. A., Sarma, Y. V. B., Mata, M. M., & Garcia, V. M. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region, **Deep-Sea Research**, vol. 51, no. 1-3, pp. 159-172, 2004.

Machado, G. T. **Análise harmônica da temperatura superficial do mar no oceano Atlântico Equatorial a partir de imagens AVHRR/NOAA**. 2012. 59 f. Monografia (Especialização) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE, 2012.

Perez, V. Fernández, E.; Marañón, E.; Serret, P. and García-Soto, C. Seasonal and interannual variability of chlorophyll-a and primary production in the Equatorial Atlantic: In situ and remote sensing observations, **Journal of Plankton Research**, vol. 27, no. 2, p. 189-197, 2005.

Teixeira, C.E.P., Mata, M.M. ; Lentini, C.A.D. ; Garcia, C.A.E. and E.J.D. Campos, 2009 On the temporal variability of the sea surface temperature in the Southwestern Atlantic based on the analysis of Pathfinder AVHRR/NOAA images. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, p. 1-10, 2009.

Wang, X., Murtugudde, R., Hackert, E. e Maranon, E. Phytoplankton carbon and chlorophyll distributions in the equatorial Pacific and Atlantic: A basin-scale comparative study. **Journal of Marine Systems**, p.138-148, 2013.