



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

PEDRY FREDERICO GALVÃO

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE
CLOROFILA-A NO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL BASEADOS NOS
DADOS DO SENSOR MODIS-AQUA**

Fortaleza, Ceará

2013

PEDRY FREDERICO GALVÃO

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A
NO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL BASEADOS NOS DADOS DO SENSOR
MODIS-AQUA

Monografia apresentada junto ao curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, na área de Oceanografia Física, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira

Fortaleza, Ceará

2013

Ac - 139924
Reg - J9106460

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A
NO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL BASEADOS NOS DADOS DO SENSOR
MODIS-AQUA

Trabalho de conclusão de curso de
Graduação em Oceanografia, Instituto de Ciências do Mar,
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Trabalho de conclusão de curso de
Graduação em Oceanografia, Instituto de Ciências do Mar,
Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Rui Simões de Menezes

G172v Galvão, Pedry Frederico.

Variabilidade espaço-temporal da concentração de clorofila-a no Oceano Atlântico Equatorial
baseados nos dados do sensor MODIS-AQUA / Pedry Frederico Galvão – 2013.
58 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de
Oceanografia, Fortaleza, 2013.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Sensoriamento remoto. 2. Circulação Oceânica. I. Título.

CDD 621.367 8

PEDRY FREDERICO GALVÃO

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A
NO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL BASEADOS NOS DADOS DO SENSOR
MODIS-AQUA

Monografia apresentada junto ao curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, na área de Oceanografia Física, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)

Universidade Federal Do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Maria Oziléa Bezerra de Menezes

Universidade Federal do Ceará (UFC)

*"At beyond continent of reality,
there are oceans of ideas."*

Toba Beta

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira, por todos os ensinamentos transmitidos e pelo admirável auxílio durante a elaboração do trabalho.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira e Prof.^a Dr.^a Maria Oziléa Bezerra de Menezes, pelas críticas e sugestões que ajudaram abrir novos horizontes e novas perspectivas desta monografia

A todos os professores que passaram por minha formação acadêmica, ajudando no processo de aprendizagem e na formação do meu caráter.

A Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do projeto “TRANSAQUA – Gestão e Segurança da Navegação e do Transporte Aquaviário: Desenvolvimento Ambientalmente Sustentável de Sistemas Marítimos e Fluviais” pela estrutura computacional disponível para realização dos trabalhos.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio e presença em todos os momentos.

Ao meu irmão e ao meu vô, a quem eu admiro.

E em especial a todos os meus amigos, pelo companherismo e por me proporcionarem os melhores momentos de minha vida.

RESUMO

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto sobre as concentrações de clorofila-a da superfície do mar (CSM) vem sendo considerada uma ferramenta vantajosa para a caracterização de processos dinâmicos nos oceanos, especialmente em regiões com baixo gradiente térmico. Este estudo tem como objetivo descrever a variabilidade espaço-temporal e estudar a dinâmica da circulação oceânica equatorial com base na análise de 11 anos de dados de clorofila-a coletados pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS). A região do estudo localiza-se na porção oeste do Oceano Atlântico Equatorial (AEO) (entre 4°N - 6.7°S e 32.3°W - 52°W). Num total, neste estudo foram utilizadas 489 imagens com resolução espacial de 4km x 4 km e temporal de 8 dias, coletadas entre julho de 2002 e dezembro de 2012. Inicialmente, avaliou-se os parâmetros estatísticos como média, desvio padrão e porcentagem de dados válidos. Em seguida foram estimadas as amplitudes dos ciclos anuais e semi-anuais de CSM com base na metodologia de análise harmônica. Os dados foram submetidos a um filtro passa baixa de médias móveis equivalente a 365 dias e seu desvio padrão foi usado para quantificar a componente interanual da variabilidade. Por último os sinais anual, semi-anual e interanual foram removidos dos dados originais e o desvio padrão deste resíduo foi utilizado para estimar a variabilidade intra-anual dos dados. Em geral, a concentração de clorofila no AEO apresentou um padrão sazonal de ressurgência e fortalecimento dos ventos alísios seguindo o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Quanto as médias, estas apresentaram menores valores entre os meses de Janeiro a Março. As maiores taxas de concentrações ocorreram entre os meses de Julho a Agosto, com valores médios de 0.5 mg/m³ na plataforma externa e 0.15 mg/m³ na região oceânica. O desvio padrão variou em média de 0.01 a 0.05 mg/m³ na maior parte da região oceânica. A quantidade de lacunas nos dados foi relativamente moderada (aproximadamente 60%), devido a presença de nuvens. No entanto, a região apresentou porcentagens aceitáveis de dados válidos em seu total, especialmente sobre a plataforma continental e talude da região Nordeste do Brasil (>70% de dados válidos). O ciclo anual explicou a maior parte das variações de clorofila-a sobre a Corrente Norte do Brasil ($R^2 > 60\%$) e sobre a Corrente Sul Equatorial (CSE). As amplitudes do ciclo anual nesta região variaram, em geral, de 0.01 a 0.05 mg/m³. A fase anual de máximos valores ocorreram mais cedo (< 20 dias) entre a quebra da plataforma e a Corrente Sul Equatorial (CSE). A contribuição semi-anual não apresentou uma melhoria significativa para o modelo de ciclo anual. O resíduo intra-anual mostrou-se maior do que o sinal interanual e semi-anual. Desse modo, o trabalho forneceu subsídios de que as imagens de CSM podem ser usadas como traçadores de processos biofísicos para caracterizar a circulação equatorial.

Palavra-chave: Análise harmônica, Clorofila-a, Circulação Equatorial, MODIS/AQUA, Sensoriamento Remoto, Séries temporais.

ABSTRACT

The use of remote sensing techniques about concentrations of chlorophyll sea surface (CSM) has been considered a very advantageous tool for the characterization of dynamic processes in the oceans, especially in regions with low thermal gradient. This study aims to describe the spatial and temporal variability of chlorophyll and study the dynamics of equatorial ocean circulation based on the analysis of 11 years of data collected by the sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) installed aboard the AQUA satellite. The study area is located in the western portion of the Equatorial Atlantic Ocean (between $4^{\circ}\text{C} - 6.7^{\circ}\text{S}$ and $32.3^{\circ}\text{W} - 52^{\circ}\text{W}$). A total of 489 images, collected between July 2002 and December 2012, with a spatial resolution of $4\text{km} \times 4\text{ km}$ and temporal 8 days were used in this study. At the methodological procedures, first we assessed the statistical parameters such as mean, standard deviation and percentage of valid data. Then the time series were estimated based on the harmonic analysis of the annual and semi-annual cycles to identify patterns in the behavior of chlorophyll. The data passed through a low pass filter of mobile averages of 365 days and its standard deviation used to quantify the interannual variability. Finally the annual, semi-annual and interannual signals were removed from the data, and the standard deviation of this residue was used to estimate the intra-annual variability. In general, the concentration of chlorophyll in AEO showed a seasonal pattern of resurgence and strengthening of the trade winds following the ITCZ march. The average showed lower values between January to March. On the other hand, the highest rates of chlorophyll concentrations occurred between July and August with average values of 0.5 mg/m^3 on the outer shelf and 0.15 mg/m^3 in the oceanic region. The standard deviation ranged from 0.01 to 0.05 mg/m^3 in most of the oceanic region. The amount of data gaps was relatively moderate (60%), due to the presence of clouds. However, the region had acceptable percentage of valid data, especially over the continental shelf and slope of the Northeast of Brazil ($> 70\%$). The annual cycle explained most of the variation 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/m^3 . The annual phase of maximum values occurred earlier between the shelf break and the South Equatorial Current (SEC). The semi-annual contribution did not show a significant improvement for the model of annual cycle. The intra-annual residue was greater than the inter-signal, but its influence was smaller than the annual cycle. Thus, the work provided subsidies that satellite imagery can be used as tracers of biophysical processes to characterize the equatorial circulation in the marine environment.

Keywords: Harmonic analysis, Chlorophyll-a, Equatorial Circulation, MODIS/AQUA, Remote sensing, Time series.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Representação esquemática da circulação no Oceano Atlântico Sul tendo como foco a região estudada que situa-se entre 4°N - 6.7°S e 32.3°W - 52°W.....	15
Figura 02 – Média do log[Clo] entre 2002 e 2012 (mg/m3).	25
Figura 03 – Desvio Padrão do log[Clo] entre 2002 e 2012 (mg/m3).	27
Figura 04 – Porcentagem de Dados Válidos do log[Clo] entre 2002 e 2012 (%).	28
Figura 05 – Variabilidade mensal média da posição latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) estimada na longitude de 27,5°W.....	29
Figura 06 – Sequência trimestral da Média (mg/m3) e da Porcentagem de Dados Válidos (%) para todo o período estudado.....	31
Figura 07 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 1 e 2 (mg/m3).	34
Figura 08 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 3 e 4 (mg/m3).	34
Figura 09 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 5 e 6 (mg/m3).	35
Figura 10 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 7 e 8 (mg/m3).	35
Figura 11 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 9 e 10 (mg/m3).	36
Figura 12 – Amplitude do Ciclo Anual (mg/m3).	37
Figura 13 – Fase do Ciclo Anual (dias).	38
Figura 14 – Coeficiente de Determinação (R2) do Ciclo Anual (%).	40
Figura 15 – Amplitude do Ciclo Semi-Anual (mg/m3).....	41

Figura 16 – Coeficiente de Determinação (R^2) do Ciclo Semi-Anual (%).....	41
Figura 17 – Variabilidade Interanual (mg/m ³).....	43
Figura 18 – Variabilidade Intra-anual (mg/m ³).	43
Figura 19 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 1 e 2 (mg/m ³). ...	46
Figura 20 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 3 e 4 (mg/m ³). ...	47
Figura 21 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 5 e 6 (mg/m ³). ...	48
Figura 22 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 7 e 8 (mg/m ³). ...	49
Figura 23 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 9 e 10 (mg/m ³). ..	50
Figura 24 – Representação esquemática das médias anuais de clorofila da superfície do mar para o período de Julho de 2002 a Dezembro de 2012 (mg/m ³).....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização dos Pontos.....	21
Tabela 2 – Características das séries temporais determinísticas.	32
Tabela 3 – Quantificação da variabilidade inter e intra-anual (mg/m ³).....	44

LISTA DE SIGLAS

ADEOS	<i>Advanced Earth Observing Satellite</i>
AEO	Atlântico Equatorial Oeste
BMC	Brasil-Malvinas Confluência
CA	Corrente de Angola
CB	Corrente do Brasil
CCO	Corrente de Contorno Oeste
CCSE	Contracorrente Sul Equatorial
CCNE	Contracorrente Norte Equatorial
CNB	Corrente Norte do Brasil
CM	Corrente das Malvinas
CSM	Cor da Superfície do Mar
CSE	Corrente Sul Equatorial
CZCS	Coastal Zone Color Scanner
EDOS	<i>EOS Data and Operations System</i>
ENSO	El Niño Oscilação Sul
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradio</i>
NASA	<i>National Aeronautic and Space Administration</i>
OCDPS	Ocean Color Data Processing System
OCTS	Ocean Color and Temperature Scanner
RN	Rio Grande do Norte
SCNB	Subcorrente Norte do Brasil
Sv	Sverdrup
TDRSS	<i>Tracking and Data Realy Satellite System</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 Área de Estudo	14
2 OBJETIVOS	18
2.1 Objetivo Geral	18
2.2 Objetivos Específicos	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1 Base de Dados	19
3.2 Tratamento Estatístico	20
3.3 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-anual	21
3.4 Caracterização da Variabilidade Residual	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Dados Válidos	24
4.2 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-Anual	32
4.3 Caracterização da Variabilidade Inter e Intra-Anual	42
4.4 Resíduos Não Determinísticos	44
5 CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

No ambiente marinho, o fitoplâncton possui uma enorme relevância para toda a biosfera. Esses organismos ocupam a base da cadeia alimentar sendo responsáveis pela fotossíntese, principal processo de produção primária, no qual sequestram carbono da atmosfera convertendo matéria inorgânica em energia. 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).

Apesar do processo de fotossíntese assemelhar-se à fotossíntese do ambiente terrestre, a produtividade no ecossistema marinho depende principalmente de dois fatores: da intensidade luminosa disponível e da quantidade de nutrientes presentes na zona eufótica. Para que ocorra é necessário que certa quantidade de energia solar seja captada por pigmentos fotorreceptores. O principal pigmento está presente nos cloroplastos das células algais e é composto por clorofila-a, mas também há a presença de clorofila b, c, d e pigmentos acessórios. Esses pigmentos possuem a capacidade de absorver comprimentos de onda na faixa do espectro visível para a conversão de dióxido de carbono em carboidratos.

Além da energia luminosa, os nutrientes constituem a principal fonte de matéria prima necessária para o crescimento e bom funcionamento do plâncton marinho, no entanto, nem a intensidade luminosa e nem a concentração de nutrientes são uniformes ao longo do espaço e tempo.

Logo abaixo da zona eufótica, encontram-se massas d'água muito maiores em volume e com elevadas concentrações de nutrientes, mas, devido à ausência de luz, esses nutrientes não podem ser aproveitados pelo fitoplâncton. Fatores como salinidade e temperatura estratificam a coluna d'água, dificultando a mistura vertical e as trocas entre massas d'água mais profundas com alta concentração de nutrientes e a zona eufótica. Deste modo, a produtividade primária também é largamente influenciada por processos físicos que transportem nutrientes e que causem mistura vertical na coluna d'água (ex. correntes oceânicas, ventos e marés) (SOUZA, 2006).

Há vários métodos de amostragem para quantificar a distribuição fitoplânctonica através do cálculo de biomassa *in situ*. Ainda assim, para os oceanos essas técnicas se tornam

bastante limitadas, pelo simples fato de não haver uma continuidade temporal na coleta de dados. Além disso, a distribuição espacial das coletas é bastante limitada.

Desse modo, ao longo das últimas décadas, a grande amplitude espacial dos sensores remotos torna a representação esquemática de imagens de satélite através de algoritmos preparados para quantificar a absorção seletiva da radiação solar refletida pela concentração de pigmentos fotossintéticos na superfície do mar, principalmente da clorofila-a, um método bastante eficaz para medir a biomassa fitoplanctônica em escala global. Apesar da facilidade de representar esquematicamente a concentração de determinado constituinte, a técnica de sensoriamento traz consigo uma série de limitações que não substituem a amostragem *in situ*.

O primeiro sensor orbital capaz de monitorar a cor do oceano foi o Coastal Zone Color Scanner (CZCS) foi lançado em 1978 pela *National Aeronautic and Space Administration* (NASA) a bordo do satélite NIMBUS 7. Existiam outros sensores na época, mas o CZCS possuía uma programação que melhor otimizava a visualização dos parâmetros no ambiente aquático. Durante os 91 meses de operação, CZCS conseguiu capturar 68 mil imagens da superfície do mar, o que permitiu inferir, pela primeira vez, sobre a distribuição e biomassa do fitoplâncton (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/CZCS/>). Uma das principais constatações obtidas a partir das imagens CZCS foi a de que oceanos tropicais não são imensas áreas desérticas, como anteriormente acreditava-se (MENEZES, 2001). Tal fato representou um grande avanço tecnológico em comparação a outros métodos de análise amostral em larga escala.

Somente após uma década do término da missão CZCS, começaram a surgir novos sensores para medir a cor da superfície dos oceanos. Em 17 de agosto de 1996, a Agência de Desenvolvimento Espacial do Japão lança o segundo satélite espacial, o Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), com o objetivo de monitorar alterações nos ecossistemas terrestres. O satélite carregava oito sensores para captar as mudanças ambientais, dentre os quais, o Ocean Color and Temperature Scanner (OCTS) que observava as variações na concentração de clorofila-a e na temperatura da superfície dos oceanos, no entanto, devido a problemas técnicos, o satélite operou por apenas oito meses (KAWAMURA *et al.*, 1998).

O sucessor do CZCS foi lançado em 1997 a bordo do satélite OrbView-2 (ou SeaStar). O sensor Sea-viewing Wide-of-view Sensor (SeaWiFS) conduziu a uma nova era de

sensores capazes de fazer uma avaliação mais precisa sobre o monitoramento dos oceanos, sendo considerado o mais longo e importante dos sensores de CSM.

Mais recentemente, o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) foi lançado em 1999 a bordo do satélite Terra, e em 2002 a bordo do satélite Aqua. O instrumento possui a capacidade de mapear mudanças dinâmicas na concentração de clorofila da superfície do mar duas vezes ao dia com uma resolução espacial de até 250m. Uma das vantagens do MODIS é o uso de uma larga cobertura espectral de 36 bandas de comprimento, até então nunca usada.

As técnicas de sensoriamento da CSM não estão limitados apenas as interpretações espaciais e temporais sobre a produtividade primária no ambiente aquático, mas também para identificar processos 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). Na região equatorial, a clorofila é largamente utilizada na verificação de processos de resurgência equatorial. A influência da pluma de grandes rios, como o Amazonas, podem ser aplicadas como traçadores de correntes marinhas.

Acompanhando a escalada histórica dos sensores orbitais, neste trabalho foram reportados os resultados de 11 anos, entre Julho de 2002 a Dezembro de 2012, de avaliação de dados sobre a concentração de clorofila-a obtidos, para a região do Oceano Atlântico Equatorial, pelo sensor MODIS/AQUA.

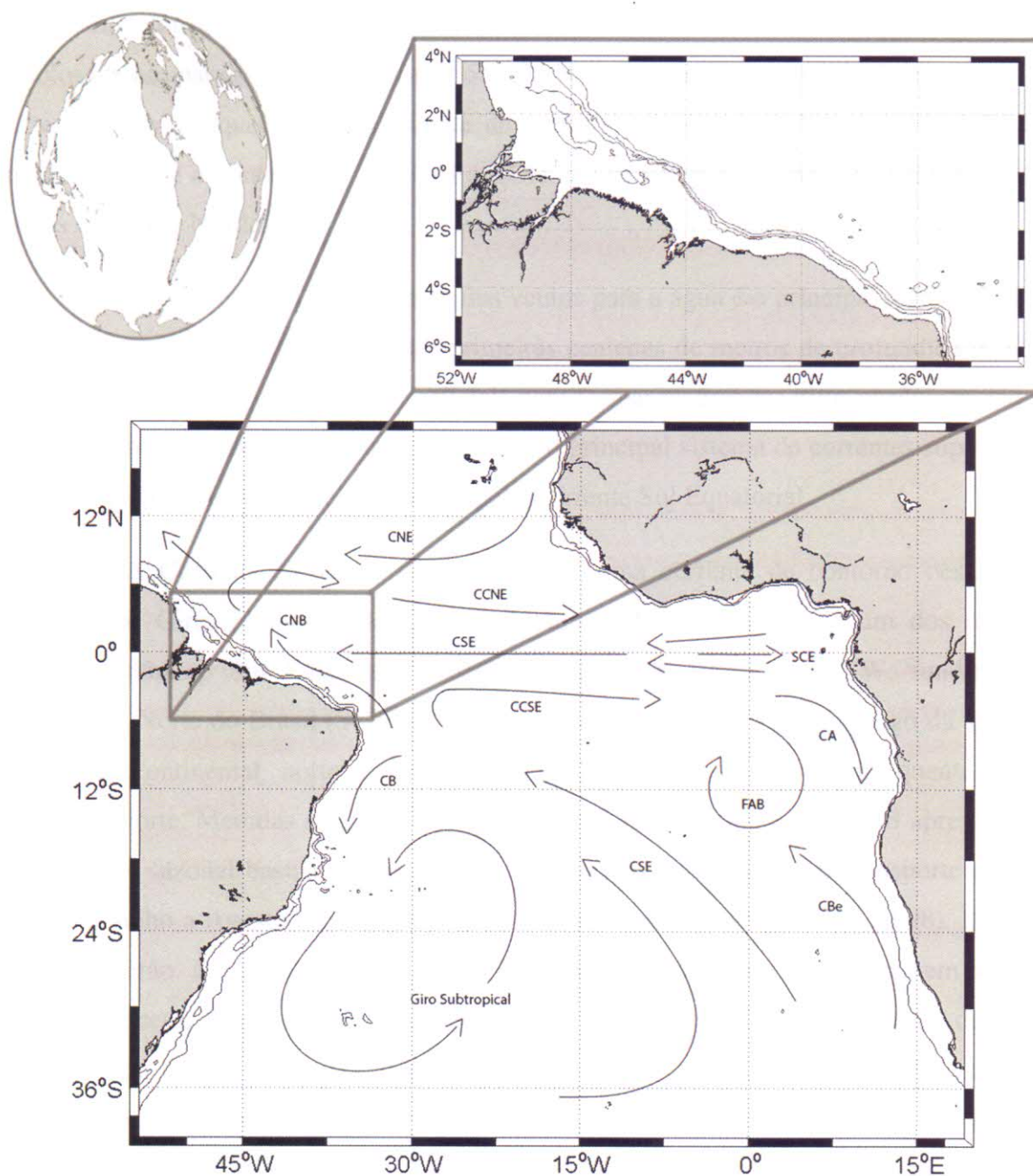
1.2 Área de Estudo

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 1. Esse sistema é caracterizado por uma forte estrutura de correntes e contracorrentes que regem a dinâmica equatorial (BERGER *et al.*, 2009).

Em virtude de encontrar-se em baixas latitudes, a área de estudo está sujeita às influências dos ventos alísios durante quase todo o ano, com predominância dos alísios de sudeste. Graças à convergência dos alísios de sudeste e nordeste sobre a faixa equatorial forma-se uma zona de baixa pressão, chamada de Zona de Convergência Intertropical (ZCIT),

caracterizada pela acentuada instabilidade atmosférica que favorece a formação de grandes nuvens através da intensa camada de correntes ascendentes.

Figura 01 – Representação esquemática da circulação no Oceano Atlântico Sul tendo como foco a região estudada que situa-se entre 4°N - 6.7°S e 32.3°W - 52°W.



Fonte: o autor. As setas representam as principais correntes do sistema de circulação no Atlântico Sul: Corrente de Angola (CA); Corrente do Brasil (CB); Corrente de Benguela (CBe); Contracorrente Norte Equatorial (CCNE); Contracorrente Sul Equatorial (CCSE); Corrente Norte do Brasil (CNB); Corrente Norte Equatorial (CNE); Corrente Sul Equatorial (CSE); Frente Angola-Benguela (FAB); Subcorrente Equatorial (SCE).

A localização da ZCIT varia consideravelmente conforme as estações do ano. Devido à diferença de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), forma-se um gradiente de pressão entre os hemisférios Norte e Sul do Oceano Atlântico, resultando em mudanças no posicionamento médio e na intensidade dos centros de alta pressão, localizados em torno de 30° (BECKER, 2001). Esses centros representam a parte descendente da célula de Hadley, a qual promove um movimento divergente dos ventos em superfície direcionando-os tanto para os polos quanto para o equador. Durante o verão boreal, quando as águas do Oceano Atlântico Norte estão mais aquecidas, o gradiente de pressão favorece o deslocamento da ZCIT no sentido norte. Já durante o mês de abril a ZCIT atinge sua posição mais ao sul ocasionando chuvas na região Nordeste do Brasil.

A transferência de momento dos ventos para a água é o principal responsável pela circulação oceânica e pela mistura nas primeiras centenas de metros de profundidade. O que condiciona um padrão de células superficiais para formar os grandes giros oceânicos. No giro equatorial do Atlântico, sobre a área de estudo, o principal sistema de correntes superficiais é composto pela Corrente Norte do Brasil e pela Corrente Sul Equatorial.

A Corrente Norte do Brasil (CNB) é uma corrente de contorno oeste (CCO) associada ao Giro Equatorial do Oceano Atlântico. Ela origina-se de um dos ramos da Corrente Atlântico Sul Equatorial (CSE), em torno de 10° S e 31° W, fundindo-se a Subcorrente Norte do Brasil (SCNB). Esse sistema de correntes segue ao longo da quebra da plataforma continental norte e nordeste brasileira, transportando água quente para o hemisfério norte. Medidas adquiridas em torno de 4° S mostraram que a CNB apresenta uma variabilidade sazonal bastante considerável, atingindo o máximo de seu transporte por volta 36 Sv em Julho a Agosto e o mínimo de 13 Sv em Abril a Maio (JOHNS, 1998). Durante o inverno e verão, à medida que passa pelo Rio Amazonas e arrasta suas águas em direção a Guiana Francesa, forma-se uma região de retroflexão, onde a corrente se afasta da costa e recircula para formar um giro quase permanente. Na extremidade mais ao sul da célula de recirculação, a corrente flui para o leste, alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (SCHOTT *et al.*, 1998). A outra parte do fluxo retorna à costa para alimentar a Corrente das Guianas, durante o verão e outono. Diversos anéis anticiclônicos são gerados periodicamente na retroflexão da CNB e transportados em direção à noroeste, atingindo as Pequenas Antilhas onde serão absorvidos pela Corrente do Caribe e da Flórida.

A outra corrente que possui larga influência sobre a área de estudo é a CSE. Ela é uma corrente com fluxo leste-oeste que se estende até uma profundidade de, aproximadamente, 100m. A Corrente Sul Equatorial pode ser dividida em três ramos principais: o ramo sul (CSEs), o central (CSEc) e o norte (CSEn) (MOLINARI, 1982). A bifurcação da CSE, ocorre em torno de 16° S próximo a região de Cabo de São Roque, dando origem as duas CCOs brasileira. Em níveis subpicnoclínicos a bifurcação ocorre por volta de 20° S, onde o ramo mais ao norte contribui para aumentar o fluxo da SCNB e a parte que flui para o sul integra-se a CB (STRAMMA & ENGLAND, 1999).

A área de estudo tem baixa contribuição fluvial devido ao clima semi-árido. Com exceção da contribuição do rio Amazonas que é responsável por descarregar um volume de água equivalente a 30% das contribuições hídricas para o Oceano Atlântico (WISSER *et al.*, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

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 Oeste com base na análise de 11 anos de dados de CSM.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar parâmetros estatísticos como média, desvio padrão e porcentagem de dados válidos para a variabilidade de clorofila-a no sistema estudado;
- Estimar as amplitudes e fases dos ciclos anuais e semi-anuais para a região de estudo;
- Caracterizar a variabilidade inter e intra-anual dos dados de clorofila;
- Identificar padrões na dinâmica de circulação na região de estudo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Base de Dados

A *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) disponibiliza dados espaciais da concentração de clorofila-a coletados pelo sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) instalado a bordo do satélite AQUA. No estudo foram utilizados 11 anos de dados semanais com um total de 489 imagens, entre Julho de 2002 e Dezembro de 2012, obtidos diretamente no site Ocean Color: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/MODISA/>.

O sensor MODIS/AQUA funciona como um sistema capaz de registrar o balanço de energia refletida por substratos na Terra. Esse sensor utiliza um algoritmo capaz de descrever com uma boa precisão polinomial a relação entre a concentração de clorofila-a nos oceanos com a quantidade de radiação refletida pela superfície dos oceanos. O algoritmo empregado é baseado na forma de *Ocean Chlorophyll 3-bands* (OC3) de O'Reilly *et al.* (2000), que utiliza coeficientes derivados de dados *in situ* coletados pela *NASA bio-Optical Marine Algorithm Data set* (NOMAD) 2ª versão. O sensor é capaz de reproduzir 36 bandas espectrais variando de 0.405 μm a 14.385 μm . Cada banda corresponde a uma faixa de leitura entre dois comprimentos de onda no espectro eletromagnético. Para a concentração de clorofila (Clo) o MODIS está programado para cobrir bandas nas frequências do visível até o início do infravermelho: 412, 443, 488, 531, 547, 667, 678, 748 e 869 nm (HU *et al.*, 2012). A Clo é derivada da seguinte equação:

$$\begin{aligned} \text{Clo} &= 10^y \\ y &= a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \\ x &= \log_{10}(R) \text{ e } R = \max(R_{rs}(443, 488))/R_{rs}(547) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde, R é a reflectância de sensoriamento remoto e a_0 , a_1 , a_2 , a_3 e a_4 correspondem aos coeficientes de regressão, que para a versão atual (6ª versão) são representados pelos seguintes valores: 0.2424, -2.7423, 1.8017, 0.0015, -1.2280, respectivamente.

Apesar de ser uma boa forma de identificação de processos oceanográficos, o algoritmo utilizado ainda apresenta algumas limitações devido a sensibilidade do modelo ao captar determinado espectro de luz. Muitos substratos como nuvens e/ou material particulado

suspensão podem interagir na mesma escala espectral distorcendo o dado real de clorofila (HUETE, 1987).

3.2 Tratamento Estatístico

Os dados em formato *Hierarchical Data Format* (HDF) foram obtidos através do site Ocean Color, e depois convertidos para ambiente de Matlab®. A partir da base de dados, cada pixel foi tratado como uma série temporal e analisado separadamente. Inicialmente foram encontrados as médias, desvios padrão e porcentagens de dados válidos para a concentração de clorofila-a no período considerado (Julho de 2002 à Dezembro de 2012).

A clorofila-a varia espacialmente em três ordens de grandeza e apresenta-se como uma distribuição logarítmica normal (CAMPBELL, 1995). Portanto, todos os dados de clorofila-a foram transformados em escala logarítmica antes das operações serem efetuadas (UZ, B.M. e J. A. YODER, 2004).

Nos mapas apresentados são mostradas três linhas de batimetria (50, 200 e 1000m) para indentificar a quebra da plataforma continental, visto que alguns processos dinâmicos estão associadas à feições do fundo marinho.

Após a criação dos mapas, definiram-se 10 pontos da área de estudo para serem reproduzidas as séries temporais. A escolha desses pontos foi realizada para evidenciar alguns padrões oceanográficos que podem ocorrer durante uma determinada escala de tempo. Suas localizações estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Localização dos Pontos.

Pontos	Latitude	Longitude
1	6.39° S	33.56° W
2	0.14° S	33.56° W
3	3.47° N	33.56° W
4	4.93° S	35.94° W
5	4.68° S	35.94° W
6	2.56° S	40.52° W
7	2.10° S	40.52° W
8	0.89° S	44.69° W
9	0.35° N	44.69° W
10	3.47° N	48.44° W

Fonte: o autor.

3.3 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-anual

Baseado no princípio de que os processos físicos tendem a se repetir em forma determinística em ciclos periódicos no decorrer dos anos (BERGER *et al.*, 2009), o presente trabalho propôs modelos para caracterizar os padrões anuais e semi-anuais da concentração de clorofila-a para a região do AEO.

O método aplicado constitui-se da análise harmônica do ciclo anual e semi-anual através de um procedimento não linear de mínimos-quadrados (EMERY; THOMSON, 1997). No qual permite representar funções senoidais e cossenoidais, onde cada onda é definida por um valor único de amplitude e fase. A amplitude corresponde a metade do valor máximo e mínimo de oscilação da onda e a fase representa o argumento da função seno.

O modelo proposto segue a seguinte equação:

$$Y_{ij} = Y'_i + Y'_{ij} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde Y_{ij} representa o valor de $\log[\text{Clo}]$ encontrado para determinado tempo i (avaliado em semanas) e posição j , o termo Y'_j é a média temporal do ponto j e Y'_{ij} é a flutuação da anomalia dada por:

$$Y'_{ij} = a_j \cos [(2\pi / T)(t_i - \phi_j)] + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq. 3})$$

Os termos a_j , ϕ_j e ε_{ij} representam a amplitude da função periódica, a fase do ciclo e o resíduo (seção 3.4), respectivamente. T é o período (46 semanas) e t_i varia de 1 à 489 semanas (Julho de 2002 à Dezembro de 2012).

Foram analisados dois harmônicos para descrever a frequência sazonal da concentração de clorofila no AEO. O primeiro harmônico com período T , correspondendo ao ciclo de oscilação anual ($T = 46$ semanas ou 365,25 dias) e o segundo harmônico com período igual a metade do anual, correspondendo ao ciclo semi-anual ($T/2 = 46/2$ semanas ou 365,25/2 dias).

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. Maiores porcentagens de R^2 representam uma maior coerência do modelo com os dados do satélite.

R^2 foi calculado através da seguinte formula:

$$R^2 = \Sigma [(y'_i - y)^2 / (y_i - y)^2] \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde y'_i é o valor ajustado no instante i , y é a média dos dados e y_i é o valor original no instante i .

3.4 Caracterização da Variabilidade Residual

Em séries temporais, muitas vezes não é possível descrever os fenômenos naturais de forma que a parte determinística (ciclo anual + ciclo semi-anual) possa ser ajustada a cada intervalo da série, pois os dados reais podem estar variando por intermédio de diversos fatores

externos. Portanto é necessário descrever o conjunto de dados através das variáveis aleatórias (não determinísticas) que expliquem a porcentagem de dados não correlacionadas com o ciclo anual e semi-anual, no caso as contribuições intra e interanual (ϵ_{ij}).

Para observar a contribuição interanual 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. A princípio, o resíduo R_1 foi encontrado removendo-se a parte determinística dos dados originais de clorofila.

Para obter a variabilidade intra-anual (R_2) removeu-se a contribuição interanual do resíduo R_1 , dando origem a uma série onde só existem sinais não determinísticos menores do que um ano

Obteve-se o valores de desvio padrão das séries inter e intra anuais para se quantificar a amplitude de variabilidade netes períodos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Média, Desvio Padrão e Porcentagem de Dados Válidos

A biomassa fitoplânctonica é controlada principalmente pela intensidade luminosa e pela disponibilidade de nutrientes dissolvidos na água do mar. Em regiões intertropicais, onde a iluminação solar é alta e as águas são bem estratificadas durante todas as estações do ano, desenvolve-se uma barreira térmica (termoclina) permanente que dificulta as trocas entre as águas superficiais (Água Tropical) com as camadas mais profundas (Água Central do Atlântico Sul). Portanto, a dinâmica equatorial de afloramentos fica a mercê da variação sazonal regida pelo cisalhamento dos ventos alísios na coluna d'água, com o objetivo de romper essa barreira.

Nesse contexto, a Figura 02 revela o padrão de distribuição espacial da média semanal de clorofila-a para os dados coletados pelo sensor MODIS/AQUA, entre Julho de 2002 a Dezembro de 2012.

Em zonas oceânicas foram observadas baixas concentrações na média total de clorofila, com uma taxa de variação entre 0.05 mg/m^3 a 0.2 mg/m^3 . Enquanto que em áreas da plataforma continental brasileira são encontrados valores, em geral maiores que 2 mg/m^3 .

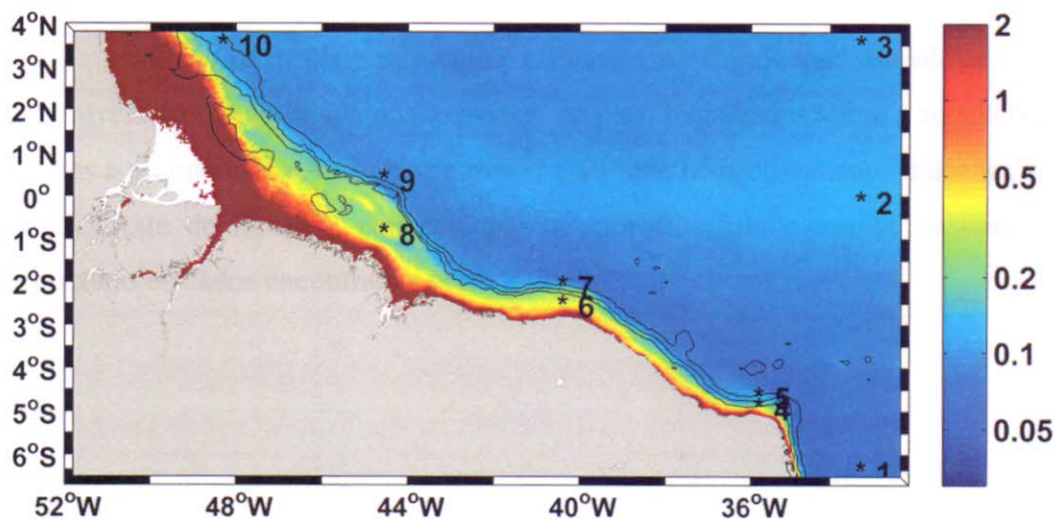
Como esperado os maiores valores foram observados próximos da costa, uma vez que o grande aporte de nutrientes por parte da drenagem continental, a mistura induzida pela ação das marés e a ressuspensão do sedimento de fundo disponibilizam uma maior quantidade de matéria prima para o desenvolvimento do fitoplâncton.

A medida que se afastam dos ambientes costeiros, os nutrientes vão sendo diluídos pela água do mar e consumidos em processos metabólicos, atingindo concentrações mínimas no centro dos oceanos. De modo geral, a produtividade no interior dos oceanos tende a aumentar com o decréscimo da latitude, de zonas com baixas concentrações geradas pela subducção dos giros subtropicais para zonas de ressurgência no equador (GRODSKY *et al.* 2008). Assim sendo, e levando em consideração que a CNB é originária das águas extremamente pobres em nutrientes oriundas do ramo mais ao sul da CSE, as menores taxas de concentrações médias ($<0,1 \text{ mg/m}^3$) são observadas sobre sua extensão. Em determinados meses é possível visualizar claramente a sua assinatura de baixas concentrações ao longo do talude continental brasileiro (Figura 06).

Em contrapartida com a baixa produtividade das regiões oceânicas, o grande aporte de nutrientes por parte da descarga de grandes rios pode contribuir significativamente para soerguer o regime de produtividade na zona equatorial. A oeste do Oceano Atlântico o principal contribuidor para elevar a biomassa no regime equatorial é o rio Amazonas, do qual descarregar cerca de $1,55 \times 10^5 \pm 0.13 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ na cidade de Obidos (PA) (SALISBURY *et al.*, 2011). Embora a maior taxa de concentração esteja associada à pluma do rio Amazonas ($>2 \text{ mg/m}^3$), é possível que a grande quantidade de material particulado em suspensão possa estar influenciando no sinal de clorofila-a captado pelo sensor.

Apesar das maiores concentrações de clorofila estarem associadas a pluma do Rio Amazonas e as zonas costeira, esse sistema é marcado por uma significativa variabilidade que ocorre ao longo de 0° , com valores médios de 0.2 mg/m^3 em resposta a ressurgência equatorial.

Figura 02 – Média do $\log[\text{Clo}]$ entre 2002 e 2012 (mg/m^3).



Fonte: o autor. Os pontos 1 a 10 representam a localização das áreas escolhidas para as análises das séries temporais (tabela 01).

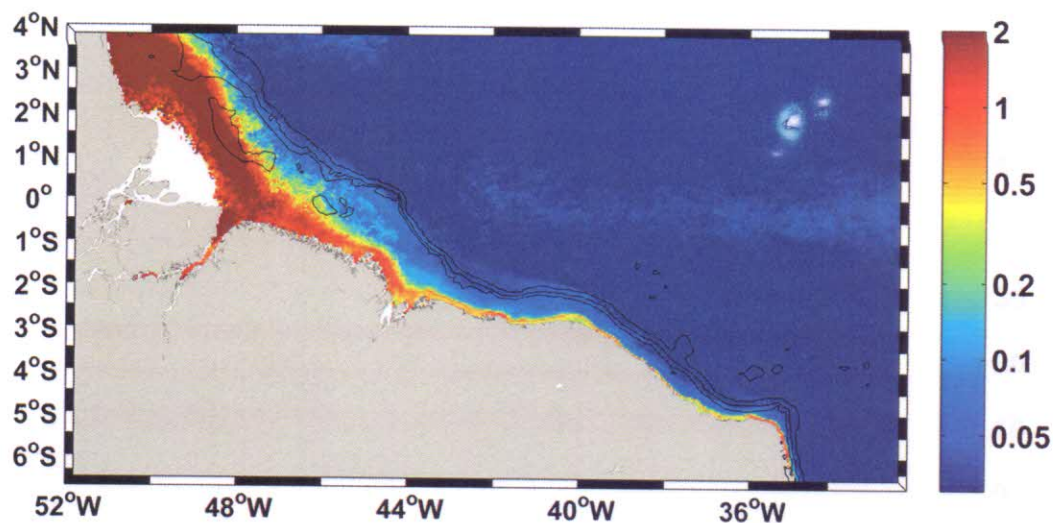
Considerando o padrão de distribuição da clorofila no equador, a Figura 03 expressa os valores médios de desvio padrão encontrados para todo o período analisado. No qual, pode-se observar uma clara relação com o mapa de média total. Onde as zonas que apresentaram maiores concentrações de clorofila manifestaram, da mesma forma, maiores taxas de desvio padrão.

O desvio padrão variou, aproximadamente, em 0,01 a 0,05 mg/m³ na maior parte do oceano aberto. Os maiores índices (>2 mg/m³) foram observados sobre a pluma do Rio Amazonas e próximos da costa. Em oceano aberto o desvio padrão exibiu taxas relativamente baixas, com leves picos de $\pm 0,08$ mg/m³ observados sobre a linha do equador, como resultado do transporte da Corrente Sul Equatorial no sentido oeste e do processo de ressurgência equatorial.

Em baixas latitudes, onde as águas são estratificadas durante todo o ano, a variação de intensidade é bem pequena. Mas, a medida que nos afastamos do equador, o efeito da sazonalidade sobre a produtividade primária se torna bem maior mais relevante. Dessa forma, Garcia et al (2004) encontrou uma maior taxa de variabilidade para a região de Confluência entre Brasil e Argentina (BMC), com desvio padrão variando de 1,04 a 38 mg/m³.

Ciotti *et al.* (2010) ao estudar a Plataforma Continental Brasileira encontrou os maiores níveis de variabilidade nos extremos do país, localizados sobre a região Norte e Sul, associados a pluma do rio Amazonas e do rio Da Prata, respectivamente. Equanto que sobre a região Nordeste do Brasil a concentração de clorofila demonstrou-se bastante constante. Corroborando os dados encontrados neste trabalho.

Figura 03 – Desvio Padrão do $\log[\text{Clo}]$ entre 2002 e 2012 (mg/m^3).

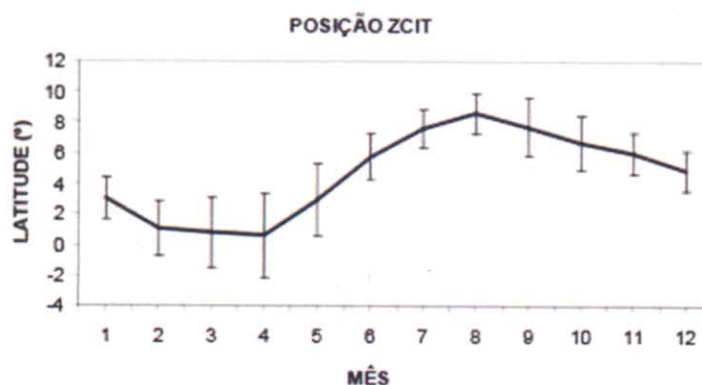


Fonte: o autor.

As porcentagens de dados válidos apresentaram-se relativamente moderadas na maior parte da área de estudo, com valores médios entre 30 a 45 % durante o período de Julho de 2002 a Dezembro de 2012 (Figura 04). Contudo, os dados nebulosos assumiram altas porcentagens sobre a plataforma continental Norte do Brasil, com variações médias de 0 a 30% de dados válidos. Esses baixos valores devem-se, provavelmente, ao fato de a pluma do rio Amazonas apresentar muito material particulado em suspensão que invalida o algoritmo de clorofila utilizado pelo sensor MODIS. Vale ressaltar que a presença de nuvens na região também pode influenciar no sinal do satélite. Os baixos valores junto a costa resultam da dimensão espacial captada pelo sensor. Cada pixel da imagem computado pelo sensor equivale a uma área de 16 km^2 , logo o sensor não consegue distinguir parte da área marinha com parte da área continental. Somente na região da plataforma continental e talude do Nordeste Brasileiro foram observados as maiores porcentagens de dados válidos ($\geq 70\%$), por encontrar-se sob uma região com baixa presença de nuvens.

Os valores de dados válidos encontrados para essa região do Atlântico Tropical Oeste foram bem maiores do que os encontrados por Garcia et al (2004), para a zona de confluência entre a CB e a Corrente das Malvinas (CM).

Figura 05 – Variabilidade mensal média da posição latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) estimada na longitude de 27,5°W.



Fonte: CARVALHO, M. Â. V. ; OYAMA, M. D. (2013).

Considerando que os ventos alísios representam a principal forçante atuante no regime equatorial de flutuações da biomassa primária. Em baixas latitudes, a transferência de momento dos ventos para a água associadas com a Força de Coriolis causam divergência no transporte de Ekman em ambos os hemisférios. Este transporte força o ressurgimento de águas mais profundas e nutritivas para a camada superficial dos oceanos de acordo com a intensidade dos ventos zonais.

No primeiro e segundo trimestre do ano, devido ao enfraquecimento dos ventos zonais são observados as menores médias de clorofila (Figura 06 - A1). Já os picos de clorofila-a ocorrem no verão do hemisfério norte, no momento em a ZCIT atinge sua posição mais ao norte e os alísios se intensificam na região equatorial (Figura 06 - C1). Após Setembro os ventos voltam a enfraquecer, mas no final de Novembro e começo de Dezembro, graças a um segundo fortalecimento dos ventos em resposta a interrupção das monções do Noroeste da África (GRODSKY *et al.*, 2008), é possível visualizar um novo afloramento nos mapas mensais (não revelados neste trabalho). De acordo com Grodsky *et al.* (2008) , este afloramento secundário é duas vezes mais fraco do que o primeiro, mas está sujeito a mesma variabilidade interanual.

Outro fator que deve ser levado em consideração a cerca da taxa de afloramentos na região equatorial é a ação da Subcorrente Equatorial (SCE). Apesar de não estarem em contato com a atmosfera as correntes subsuperficiais são geradas indiretamente pela ação do

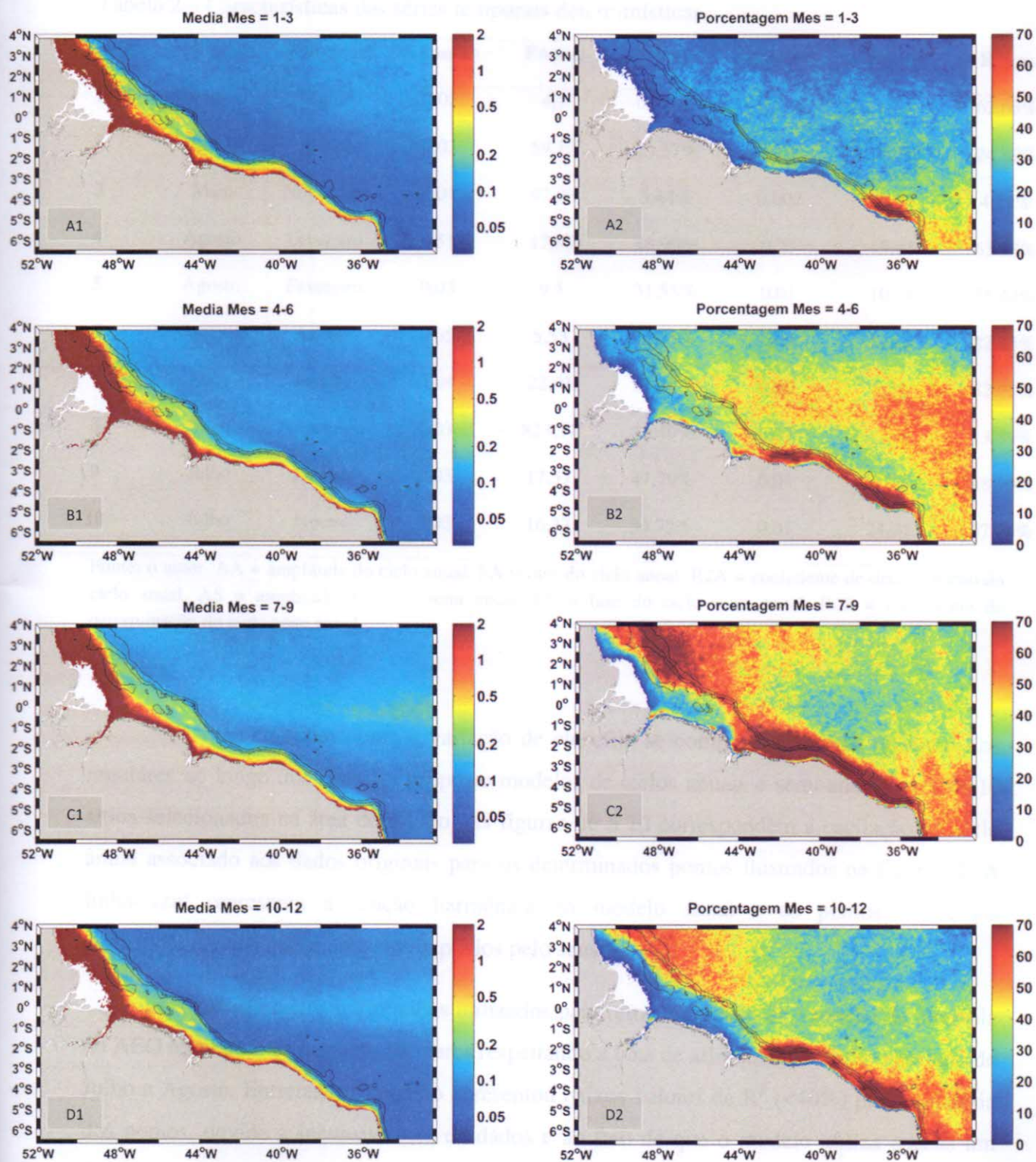
vento. Dessa maneira, nos meses de Julho, a intensificação da transferência de energia dos ventos para a coluna d'água aumenta o atrito da CSE com a SCE, contribuindo, do mesmo modo, para uma elevação no transporte vertical de águas mais frias e produtivas. Entre Janeiro e Abril há um enfraquecimento dos ventos zonais e, conseqüentemente, da fricção entre a CSE com a SCE. Assim, as trocas verticais entre as massas d'água diminuem, suprimindo a concentração de clorofila na faixa equatorial (GOES *et al.*, 2001).

As taxas de afloramentos na região equatorial são bem diferentes em lados opostos (leste/oeste) do Atlântico. Em cima do Equador, onde a força de Coriolis é desprezível, as correntes fluem no sentido do vento (de leste para oeste). Assim sendo, à medida que os ventos se intensificam sobre a faixa equatorial, a acumulação de águas no lado oeste do oceano geram um maior desnível da termoclina entre os lados opostos do oceano. No leste da bacia a termoclina se torna mais rasa, gerando elevadas taxas de produtividade nova na superfície, com picos de $0,6 \text{ mg/m}^3$ durante o verão boreal (GRODSKY *et al.*, 2008). Ao passo que se torna mais profunda no lado oeste, diminuindo a taxa de ressurgência equatorial ($\pm 0,2 \text{ mg/m}^3$).

Em resumo, o padrão sazonal de afloramentos do fitoplâncton no Atlântico Equatorial reflete a dinâmica de elevação da termoclina de acordo com a mistura vertical provocada pela transferência de momento dos ventos alísios para a coluna d'água (LONGHURST *et al.*, 1993).

Quanto a distribuição de clorofila na plataforma continental, quando se comparam as médias mensais observa-se um pequeno incremento em determinadas áreas durante o período chuvoso da região Norte e Nordeste. Segundo Vianna *et al.* (2012), o aumento das precipitações intensifica o escoamento superficial de águas continentais proporcionando pulsos de nutrientes para a região costeira, conseqüentemente elevando a densidade do plancton marinho.

Figura 06 – Sequência trimestral da Média (mg/m³) e da Porcentagem de Dados Válidos (%) para todo o período estudado.



Fonte: o autor. Os meses representados por 1-3 correspondem de Janeiro a Março, 4-6 de Abril a Junho, 7-9 de Julho a Setembro e 10-12 de Outubro a Dezembro.

R.14106460

4.2 Caracterização do Ciclo Anual e Semi-Anual

Tabela 2 – Características das séries temporais determinísticas.

Pontos	Picos	Depressões	AA(mg/m ³)	FA(dias)	R ² A(%)	AS(mg/m ³)	FS(dias)	R ² S(%)
1	Agosto	Março	0,02	4,1	62.59%	0,001	1,31	62.63%
2	Agosto	Março	0,03	59,17	23.57%	0,01	59,58	24.69%
3	Maiο	Novembro	0,01	97,90	3.44%	0,002	40,13	4.22%
4	Agosto	Fevereiro	0,51	17,90	48.90%	0,25	15,01	63.38%
5	Agosto	Fevereiro	0,03	9,5	31,55%	0,01	10,74	35.44%
6	Janeiro	Agosto	0,05	5,53	31.75%	0,04	52,82	22.13%
7	Julho	Janeiro	0,04	22,03	21,48%	0,02	9,55	32.05%
8	Maiο	Novembro	0,03	823,37	11.49%	0,01	17,94	13.89%
9	Julho	Janeiro	0,03	17,57	47.79%	0,01	4,36	48.90%
10	Julho	Janeiro	0,03	16,33	34.72%	0,01	24,94	37.63%

Fonte: o autor. AA = amplitude do ciclo anual. FA = fase do ciclo anual. R²A = coeficiente de determinação do ciclo anual. AS = amplitude do ciclo semi anual. FS = fase do ciclo semi anual. R²S = coeficiente de determinação do ciclo semi anual.

Para entender como a variação de clorofila se comporta na forma de intervalos regulares ao longo dos anos foi proposto modelos de ciclos anuais e semi-anuais para os 10 sítios seleccionados na área de estudo. As figuras 06 a 10 correspondem a oscilação do ciclo anual associado aos dados originais para os determinados pontos ilustrados na figura 02. A linha azul representa a função harmônica do modelo anual e os pontos vermelhos correspondem aos dados originais captados pelo sensor.

Os dez ciclos harmônicos utilizados para retrar o modelo de variação da clorofila no AEO revelaram-se bastante regulares respeitando a taxa de afloramentos entre o período de Julho a Agosto. Entretanto o modelo apresentou baixos valores de R² (<40%) para a maioria dos pontos, devido a inconsistencia de dados e ao fato de que o modelo utiliza apenas um único valor de amplitude para o harmônico anual, não sendo possível demonstrar com clareza o bloom secundário que ocorre durante o final do outono e começo do inverno do hemisfério norte, bem como outros aspectos não periódicos que podem estar afetando a taxa de oscilação da clorofila na região equatorial.

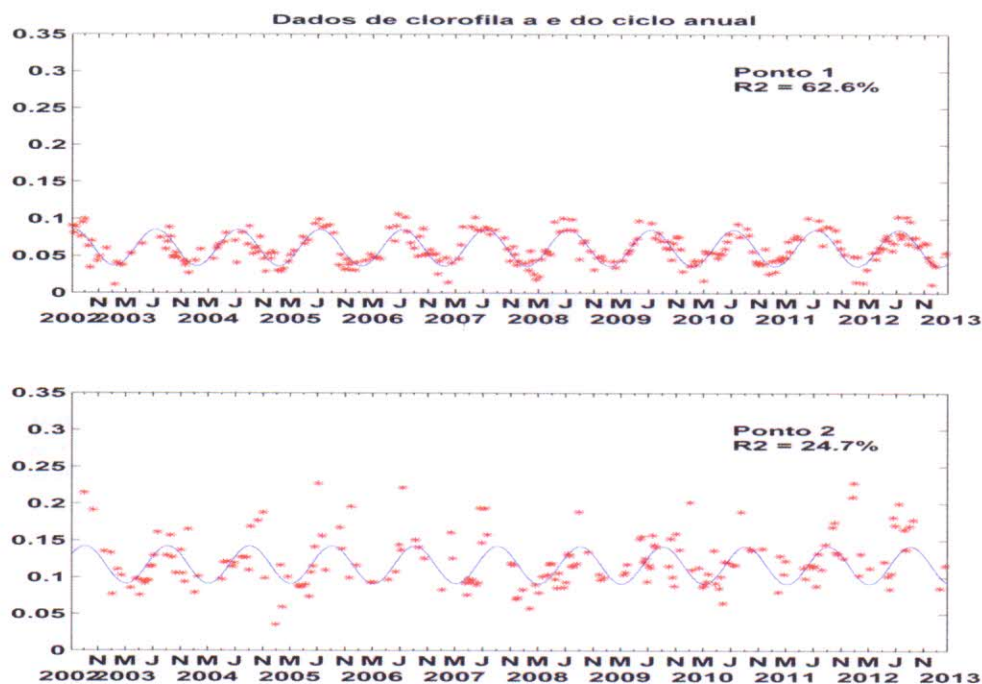
Somente três pixels apresentaram um sinal harmonico relativamente forte, com valores maiores do que 40%. O primeiro localizado no ponto 1, próximo ao início do núcleo superficial da CNB ($R^2=62,63\%$), o segundo no ponto 4, sobre a quebra da plataforma continental do Rio Grande do Norte ($R^2=63,38\%$) e o terceiro no ponto 9, na região oceânica logo acima da plataforma continental, na divisa entre Maranhão com o Pará ($R^2=48,9\%$). Nessas regiões o processo de flutuação da biomassa primária atua de forma razoavelmente sazonal respeitando o modelo adotado. As demais áreas que apresentaram correlações menores do que 30%, provavelmente devem-se ao fato de o modelo ser incapaz de reproduzir o processo natural ou também pelo fato de estar ocorrendo uma acentuada variabilidade interanual (CIOTTI *et al.*, 2010).

Cruzando as informações de clorofila no AEO com os dados do modelo, na maioria dos pontos, os picos foram observados durante o verão boreal (Julho-Setembro). Tal fato reflete o padrão sazonal de ressurgência e fortalecimento dos ventos alísios seguindo a marcha da ZCIT (GRODSKY *et al.*, 2008). Exceto para os pontos 3, 6 e 8, onde as máximas do modelo foram alcançadas nos meses de Janeiro a Maio, uma vez que, em decorrência da inconsistência de dados, impossibilitaram uma caracterização bem definida do modelo de ciclo anual para os pontos três e oito. Cabe mencionar que os pontos 6 e 8 estão localizados sobre a plataforma continental sendo possível que haja uma conexão entre os picos do modelo com o período chuvoso da região Norte e Nordeste do Brasil.

Mais ao sul, sobre a quebra de plataforma do Rio Grande do Norte, o ponto 4 apresenta uma distinta taxa de amplitude em relação aos demais, atingindo valores máximos de $1,8 \text{ mg/m}^3$. Neste mesmo trecho, Ferreira (2009) encontrou uma pluma em espiral com concentrações de clorofila-a semelhantes (próximas de $1,50 \text{ mg/m}^3$) e atribuiu esta feição a uma possível ressurgência de quebra de plataforma. Fenômeno que também pode estar ocorrendo sobre o talude continental do Píauí, observado pela sugestiva analogia dos altos valores de clorofila-a a cerca de $41^\circ\text{W}/2^\circ\text{S}$ e $36^\circ\text{W}/4^\circ\text{S}$ (Figura 06).

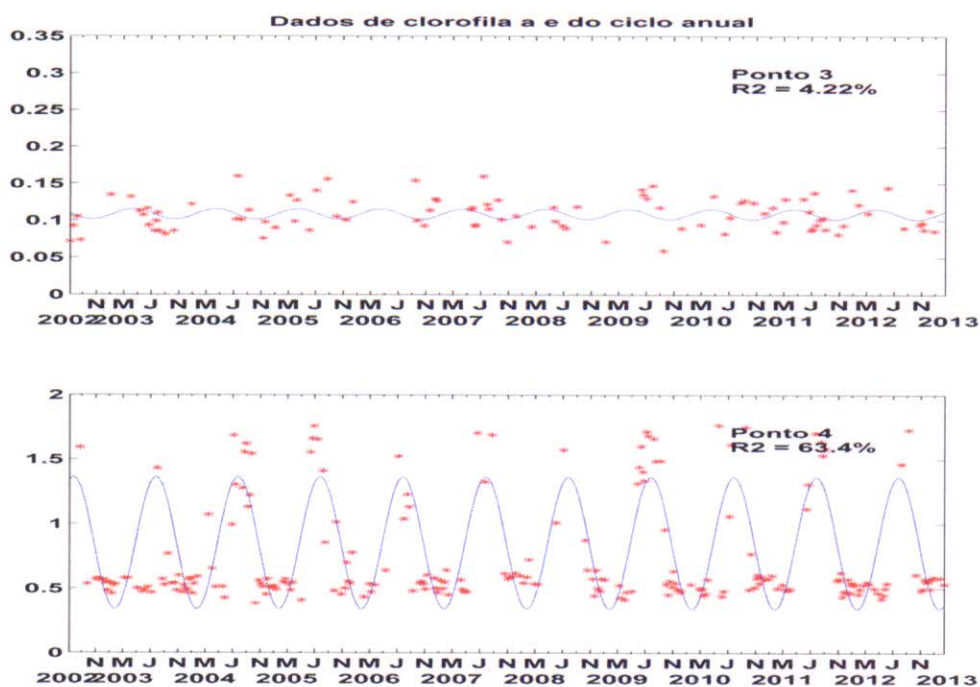
Medidas tomadas por Johns *et al.* (1998), sobre a latitude de 4°S mostraram que a CNB possui um significativo ciclo anual nessa área, variando de um transporte máximo de 36 Sv em Julho-Agosto para um mínimo de 13 Sv em Abril-Maio. Exatamente quando a corrente atinge velocidades máximas é possível visualizar os picos de clorofila no ponto 4 (Figura 08). Fato este que deve estar ocorrendo, provavelmente em resposta a um maior meandramento da CNB frente à abrupta mudança de orientação da margem continental.

Figura 07 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 1 e 2 (mg/m3).



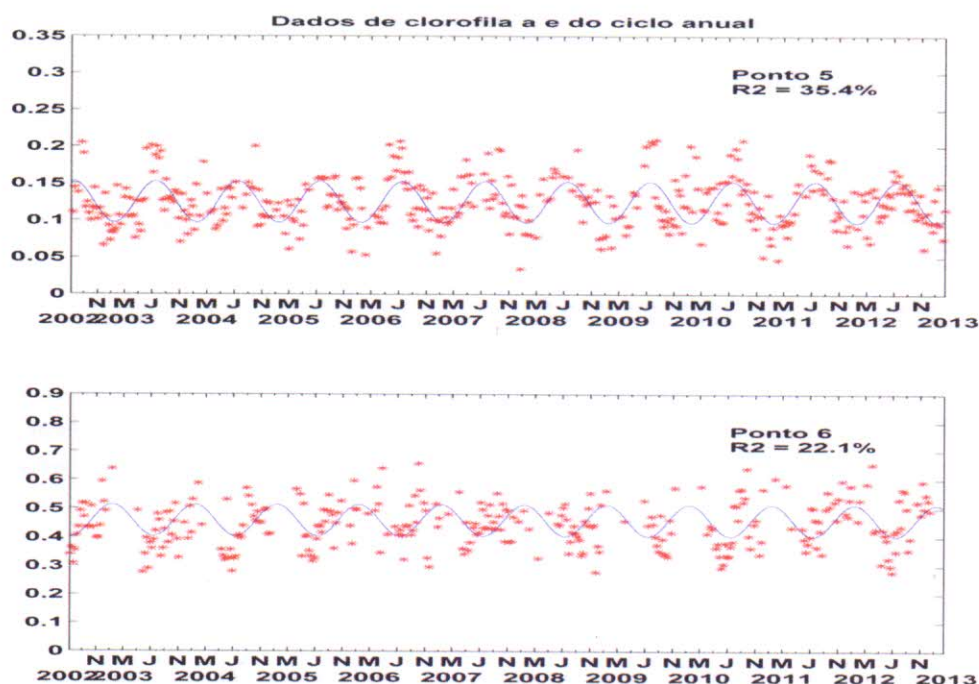
Fonte: o autor.

Figura 08 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 3 e 4 (mg/m3).



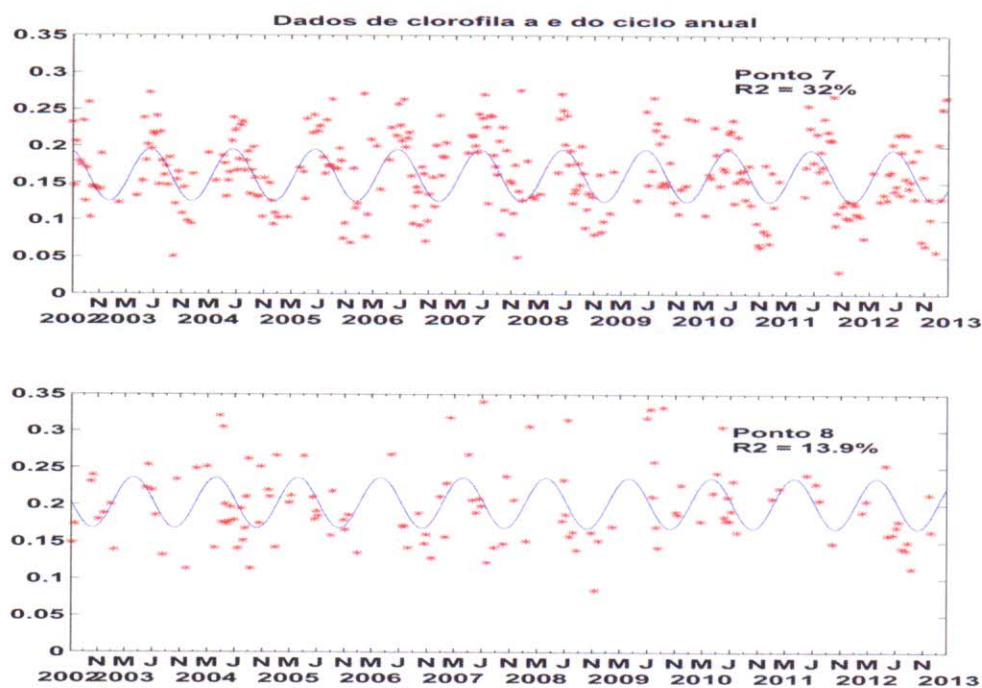
Fonte: o autor.

Figura 09 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 5 e 6 (mg/m³).



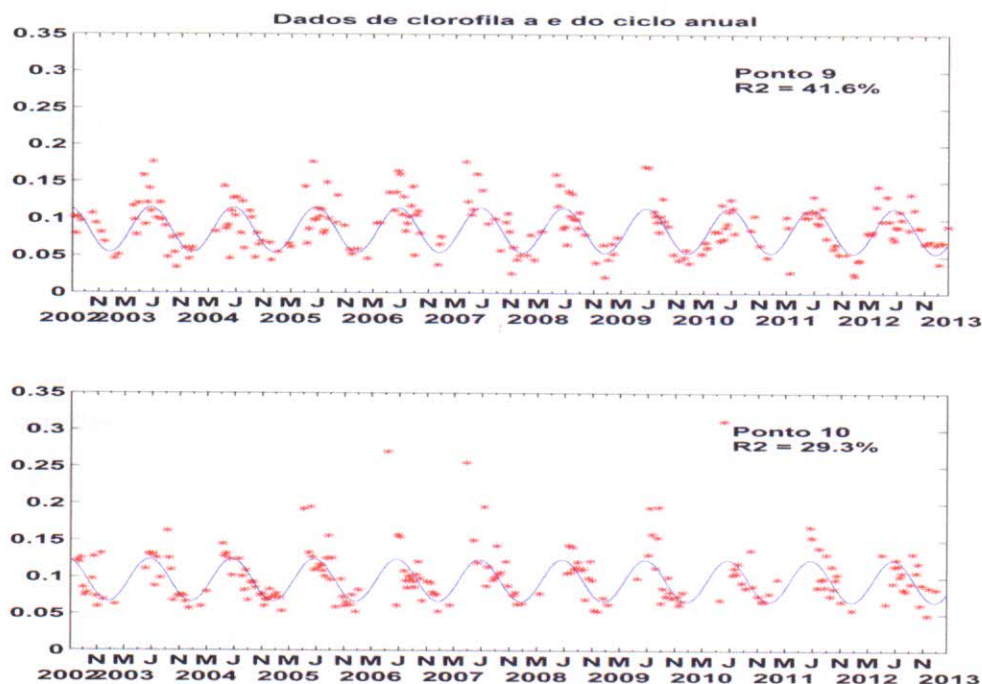
Fonte: o autor.

Figura 10 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 7 e 8 (mg/m³).



Fonte: o autor.

Figura 11 – Caracterização do modelo de ciclo anual (linha azul) associado aos dados reais coletados pelo sensor MODIS (pontos vermelhos) para os pontos 9 e 10 (mg/m³).



Fonte: o autor.

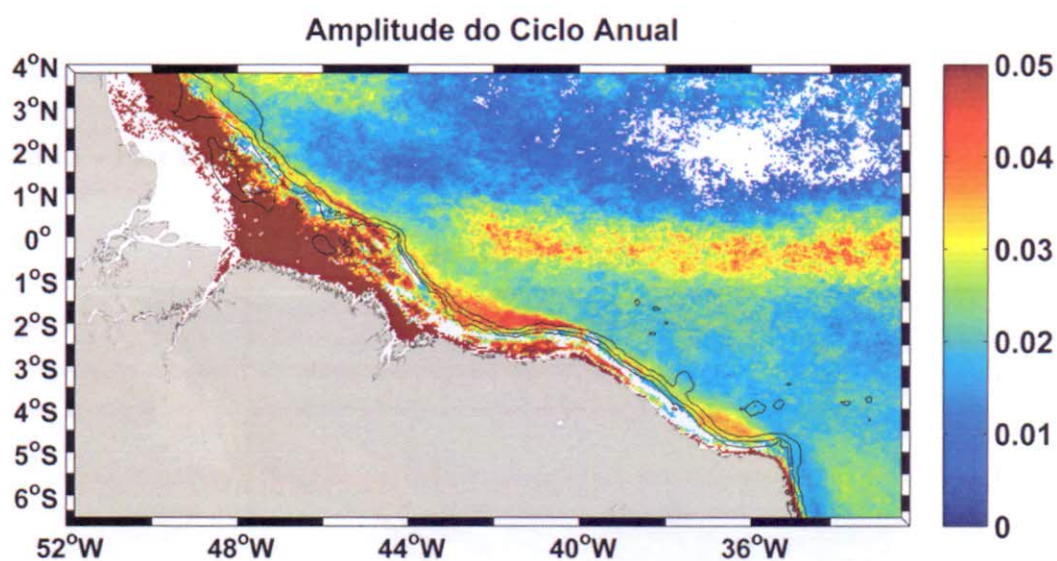
Na figura 12 são apresentadas as amplitudes do ciclo anual de clorofila-a para cada pixel da imagem. Altos valores de amplitude indicam um alto grau de variação na taxa de clorofila-a do sistema. Em geral, constataram-se baixas amplitudes de clorofila na maior parte da região oceânica ($<0,04 \text{ mg/m}^3$). O sinal de baixas amplitudes é quebrado apenas próximo a costa brasileira e sobre a pluma dos rios, pelo simples fato de disponibilizarem uma maior quantidade de nutrientes para o crescimento do fitoplâncton.

Analisando as amplitudes encontradas por Garcia *et al.* (2004) para a região da BMC foram constatados valores bem diferentes da região do AEO, onde a plataforma interna apresentou baixas amplitudes graças a influência do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos. No entanto, a taxa de variação da clorofila para a região da BMC é muito maior do que as encontradas neste trabalho, em função de uma maior taxa de aquecimento e arrefecimento cíclico dos corpos de água, no qual gera-se um padrão sazonal de estratificação (verão) e homogeneização (inverno) da coluna d'água. Por exemplo, enquanto as amplitudes sobre o talude continental na região da BMC variam em média de $2,5 \text{ a } 4 \text{ mg/m}^3$, a amplitude varia em média de $0,02 \text{ a } 0,05 \text{ mg/m}^3$ no talude da região Norte e Nordeste do Brasil.

As áreas do talude continental, especialmente logo acima do estado do RN e PI, apresentaram taxas consideráveis de amplitudes, as quais acreditamos serem atribuídas aos eventos de ressurgência devido ao meandramento da CNB frente à mudança de orientação da costa. 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). Sem mencionar que, a 0° , na área sob a influência da CSE, também destacaram-se amplitudes mais elevadas, próximas de $0,04 \text{ mg/m}^3$, sugestivas de ressurgência equatorial.

Ao comparar os mapas de desvio padrão (Figura 03), média (Figura 02) e amplitude anual percebe-se uma relação direta entre a taxa de concentração da clorofila com a disposição das áreas mais produtivas. O que reforça a idéia de que o anual é o principal responsável pela variabilidade clorofila no AEO.

Figura 12 – Amplitude do Ciclo Anual (mg/m^3).

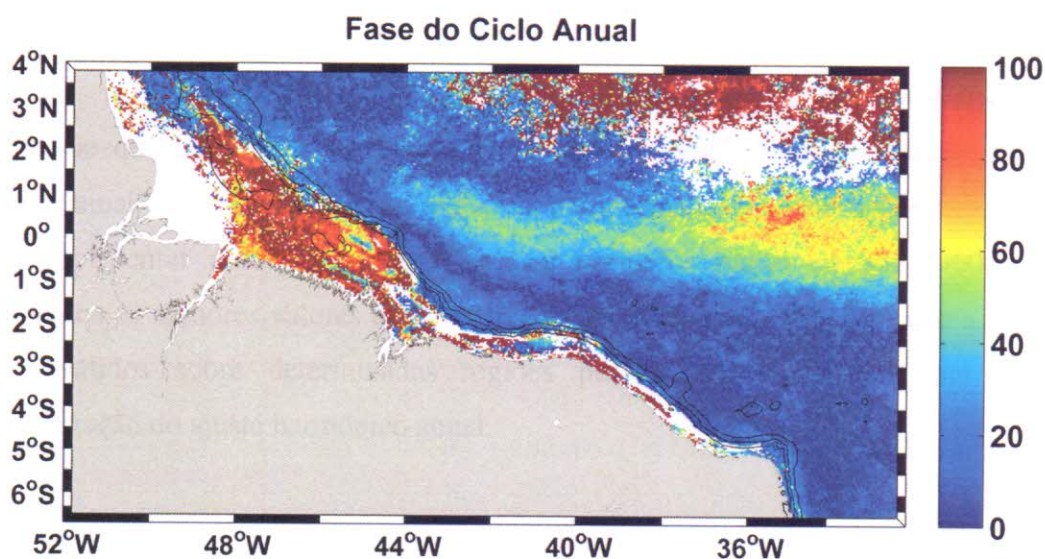


Fonte: o autor.

A fase do ciclo anual (Figura 13) indica o período em que a série harmônica expressou os valores máximos de amplitude. Os intervalos dos dados do ciclo anual apresentaram uma demarcada diferença em várias regiões, com máximas de clorofila ocorrendo 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 14) estes resultados devem ser olhados com cuidado. Sobre a língua da Corrente Sul Equatorial (0°), as máximas na concentração de clorofila-a ocorreram entre 40 e 80 dias.

Diferente dos dados encontrados no AEO onde as águas oligotróficas da CNB encontram máximas bem mais cedo (< 20 dias). Os resultados de fase encontrados por Garcia *et al.* (2004) para a região da BMC revelaram um padrão bastante distintos para a região da Argentina e Brasil, com máximas ocorrendo bem mais cedo nas zonas influenciadas pela Corrente das Malvinas (< 10 semanas), enquanto que para as zonas de atuação da Corrente do Brasil as máximas foram observadas bem mais tarde (> 35 semanas). Em manifestação as condições ambientais e pelo contraste entre as águas oligotróficas provenientes do Giro Oceânico do Atlântico Sul com a riqueza das águas subantárticas, transportadas pela CM.

Figura 13 – Fase do Ciclo Anual (dias).



Fonte: o autor.

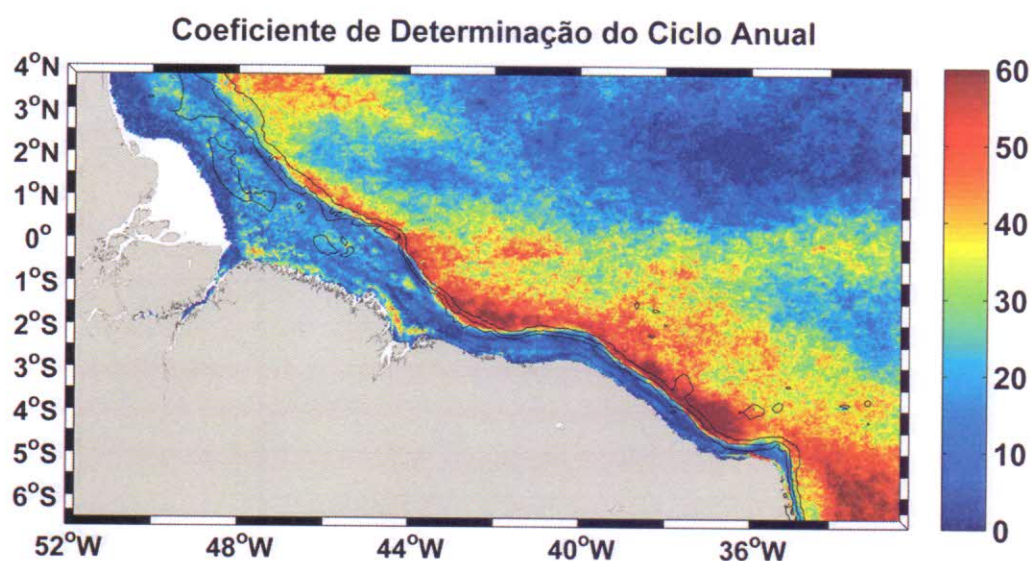
Mapas de coeficiente de determinação (R^2) foram igualmente produzidos para cada pixel da área de estudo (Figura 14), com o intuito de mostrar a proporção de quanto o ciclo anual consegue explicar da variabilidade original de clorofila captada pelo satélite. Consideramos que o ajuste do modelo foi significativo para os pixels onde o valor de R^2 foi maior do que 30-40%.

A partir da análise do mapa de coeficiente de determinação (Figura 14) para o primeiro harmônico pode-se notar que a região nordeste do mapa, acima de 1° N, apresentou os menores valores de R^2 , com áreas em que o modelo não manifestava nenhuma correlação com os dados. A plataforma continental também apresentou baixos percentuais de R^2 , com valores abaixo de 20%. Provando que sobre essas regiões não há dominância do ciclo anual, provavelmente, devido a persistência de material particulado em suspensão na plataforma, na qual resulta em altos índices nos valores de médias e desvio padrão em comparação com as áreas adjacentes (Figuras 02 e 03) (GARCIA *et al.*, 2004) e/ou pelo fato de estar ocorrendo uma acentuada variabilidade residual.

Contrastando com a região de plataforma, altos índices de R^2 ($\geq 60\%$) foram verificados ao largo do talude continental evidenciando bem a assinatura da CNB no sentido noroeste. O ciclo anual aparenta dominar sobre essa região, em resposta ao fluxo oligotrófico da corrente. Na região da CSE também foram observados percentuais relevantes, entre 30 a 50%.

Comparando-se o mapa de R^2 com o percentual de dados válidos (Figura 04), percebe-se que a escassez de dados não interfere significativamente na interpretação do modelo anual, como contrastado na região da plataforma continental nordestina. Apesar desta região apresentar uma porcentagem de dados válidos muito elevada ($>60-70\%$), foram observados os menores valores de R^2 ($<10\%$). Contudo, é bem provável que a quantidade de dados válidos sobre determinadas regiões possa estar interferindo em uma melhor caracterização do ajuste harmônico anual.

Figura 14 – Coeficiente de Determinação (R^2) do Ciclo Anual (%).

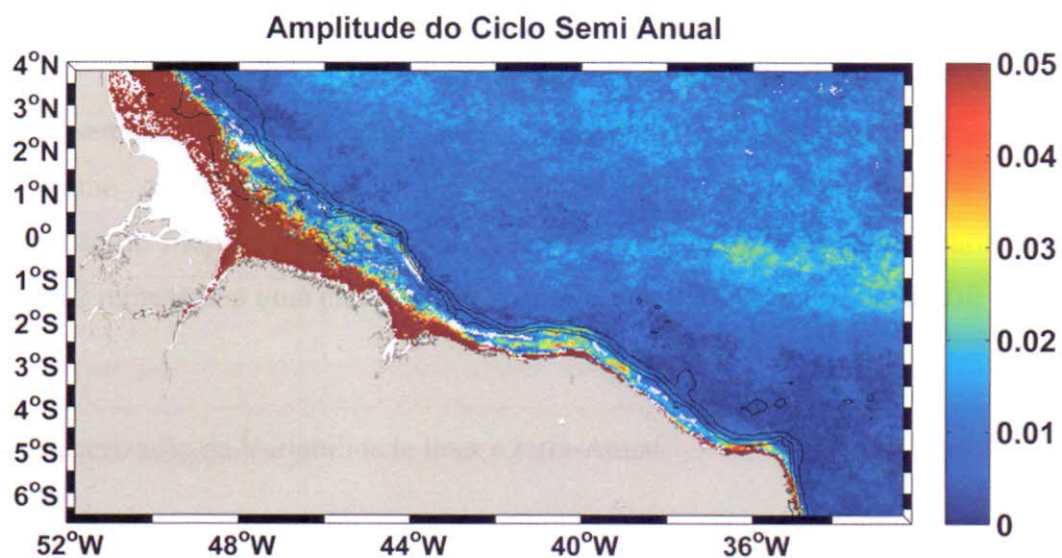


Fonte: o autor.

Como o modelo com apenas o ciclo anual não mostrou-se adequado ao tentar reproduzir a variabilidade de clorofila-a sobre algumas áreas do mapa, consequentemente, não explicando a variância das oscilações. Desta maneira foi testado a somatória de um sinal periódico anual e semi-anual para detectar outros possíveis padrões físicos por toda a extensão da área de estudo.

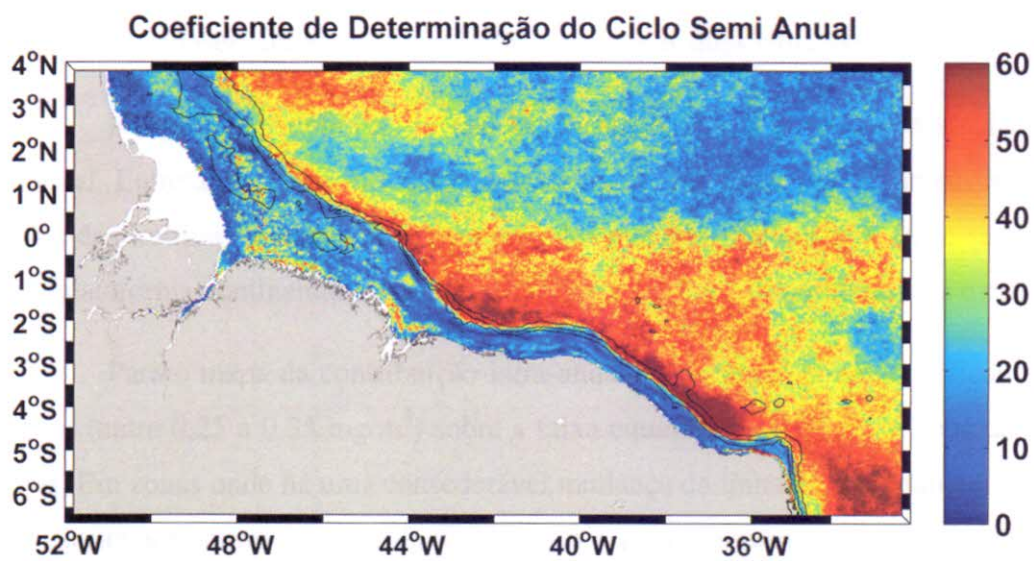
O mapa de amplitude do ciclo semi-anual (Figura 15) revelou variações bem menores do que as esperadas para o ciclo anual. Os maiores valores de amplitude foram observados sobre a zona costeira e pluma dos grandes rios. Ao mesmo tempo em que há um decaimento da amplitude a medida que se afasta da costa, atingindo mínimos sobre o talude continental. Como era de se esperar, uma vez que há um forte enriquecimento nutricional por parte da descarga continental e baixas taxas de nutrientes associados a CNB. Apesar da discrepância de valores na maior parte da plataforma, esses índices não corroboraram o modelo proposto para o ciclo semi-anual, pelo fato de apresentarem uma baixa porcentagem de R^2 , principalmente sobre a região Nordeste (Figura 16).

Figura 15 – Amplitude do Ciclo Semi-Anual (mg/m³).



Fonte: o autor.

Figura 16 – Coeficiente de Determinação (R²) do Ciclo Semi-Anual (%).



Fonte: o autor.

A Figura 16 revela o padrão de distribuição do coeficiente de determinação total ao adicionar a componente do ciclo semi-anual na análise harmônica de cada pixel.

O mapa de R^2 após a adição do harmônico semi-anual apresentou características bastante semelhantes com o mapa anual, constatando que sobre essas áreas tanto o ciclo anual como o ciclo semi-anual desempenham um importante papel na dinâmica de distribuição do fitoplâncton. Contudo, no geral a contribuição do segundo harmônico (semi-anual) não representou uma melhoria significativa para o modelo de ciclo anual.

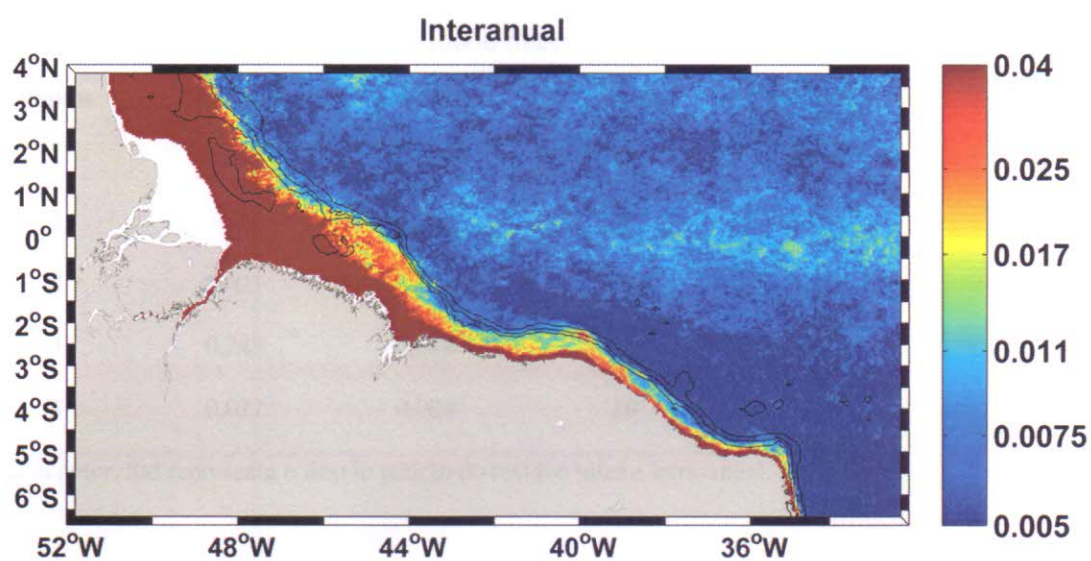
4.3 Caracterização da Variabilidade Inter e Intra-Anual

As contribuições da variabilidade interanual e intra-anual no Oceano Atlântico Equatorial são apresentadas com base nos desvios padrões das séries filtrados de clorofila-a (Figura 17 e 18). A respeito dos dois mapas foi observada uma considerável discrepância entre os valores encontrados sobre a plataforma continental e em regiões de oceano aberto. Também pôde-se observar que a contribuição intra-anual chegou a desempenhar uma amplitude de duas a três vezes maior do que a variabilidade interanual. Enquanto que as correlações entre as áreas mais afetadas e os fatores abióticos que regulam a biomassa fitoplanctônica conservaram-se bem semelhantes para as duas situações.

No geral a amplitude do resíduo mostrou-se maior do que o sinal interanual e semi-anual. Entretanto, a sua influência assemelha-se, em parte, a ciclo anual, revelando que os dados de clorofila no AEO variam em períodos menores que um ano. Deve-se salientar que sobre a plataforma continental os sinais intra-anuais são mais importantes que o ciclo anual.

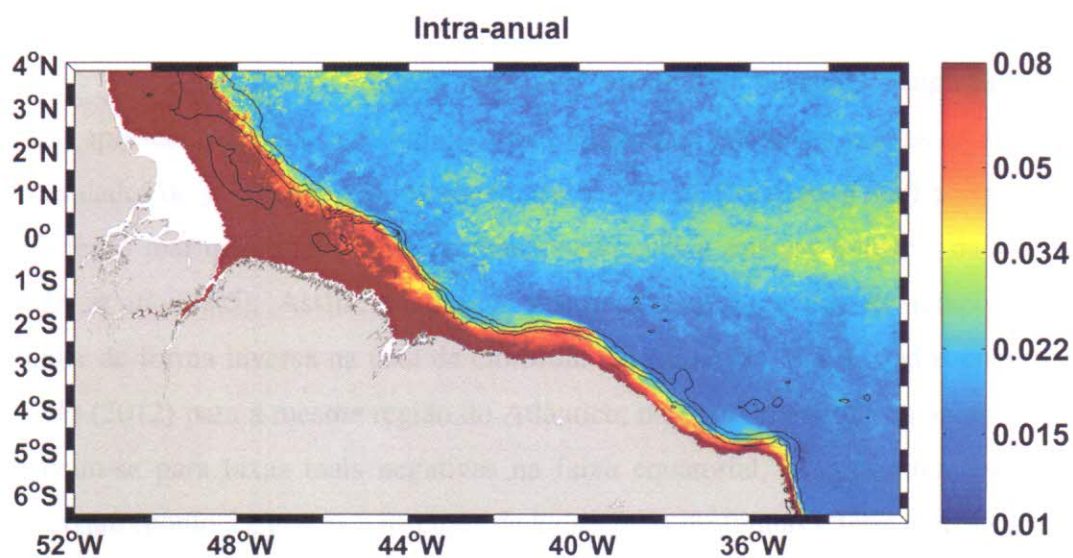
Para o mapa da contribuição intra-anual perduram algumas significantes taxas de variações (entre 0,25 a 0,35 mg/m³) sobre a faixa equatorial e próximo a zona de retroflexão da CNB. Em zonas onde há uma considerável mudança da linha de costa também foi possível visualizar um acréscimo de clorofila (0,22 mg/m³), provavelmente, graças a um meadramento da corrente ao tentar ajustar seu fluxo potencial, como foi citado anteriormente. À medida que, para o mapa de variabilidade interanual é possível visualizar apenas uma pequena elevação na linha do equador, com valor médio de 0,11 mg/m³.

Figura 17 – Variabilidade Interanual (mg/m³).



Fonte: o autor.

Figura 18 – Variabilidade Intra-anual (mg/m³).



Fonte: o autor.

4.4 Resíduos Não Determinísticos

Tabela 3 – Quantificação da variabilidade inter e intra-anual (mg/m³).

Pontos	Std Intra	Std Inter	Pontos	Std Intra	Std Inter
1	0,013	0,003	6	0,071	0,017
2	0,03	0,01	7	0,042	0,011
3	0,021	0,008	8	0,116	0,044
4	0,249	0,078	9	0,023	0,007
5	0,027	0,004	10	0,03	0,006

Fonte: o autor. Std representa o desvio padrão do resíduo inter e intra-anual.

Todos os 10 pontos controles em questão (Tabela 03) foram analisados para quantificar a importância das componentes residuais que não estavam correlacionadas com os ciclos climatológicos (Figuras 18 a 22). A linha vermelha corresponde a variabilidade interanual de clorofila-a, após a aplicação do filtro de médias móveis. Enquanto que a variabilidade intra-anual (R_2) equivale aos círculos azuis, quando a componente interanual é removida dos dados residuais R_1 .

No AEO, a variabilidade interanual mostrou-se bastante complexa de ano para ano, 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.

O ponto 4 apresentou as maiores taxas de amplitude para a variação inter e intra-anual, provavelmente devido a amplificação dos eventos de ressurgência na quebra da plataforma citados anteriormente. Já o ponto 8 destacou-se dos outros por apresentar uma variabilidade interanual bem diferenciada com desvio padrão maior do que a amplitude

harmônica do ciclo anual, entre os anos de 2008 a 2012, no entanto não há informações que expliquem esse tipo de variabilidade.

No geral a variabilidade interanual no Atlântico se reflete na diferença das características oceano-meteorológicas entre os gradientes meridionais dos hemisférios Norte e Sul bem como de gradientes zonais entre os lados oposto do oceano. Além do que, boa parte da variabilidade interanual se deve as respostas remotas dos fenômenos ENSO no Pacífico sobre os ventos e a temperatura no Atlântico (CHRISTIAN *et al.*, 2003).

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 interanual relacionada à 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 interanual, com baixos valores de desvios padrão para todos os pontos controles (Tabela 03). Comprovando que os ciclos sazonais e a variabilidade intra-anual nessa região do Atlântico são bem mais relevantes do que as variações anuais.

Infelizmente, devido a carência de informações na literatura que respondessem esses tipos de variações e por apresentarem características aleatóreas, não foi possível intefir de forma satisfatória a respeito dos fenômenos físicos que regulam a variabilidade intra e interanual no sistema do AEO.

Figura 19 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 1 e 2 (mg/m³).

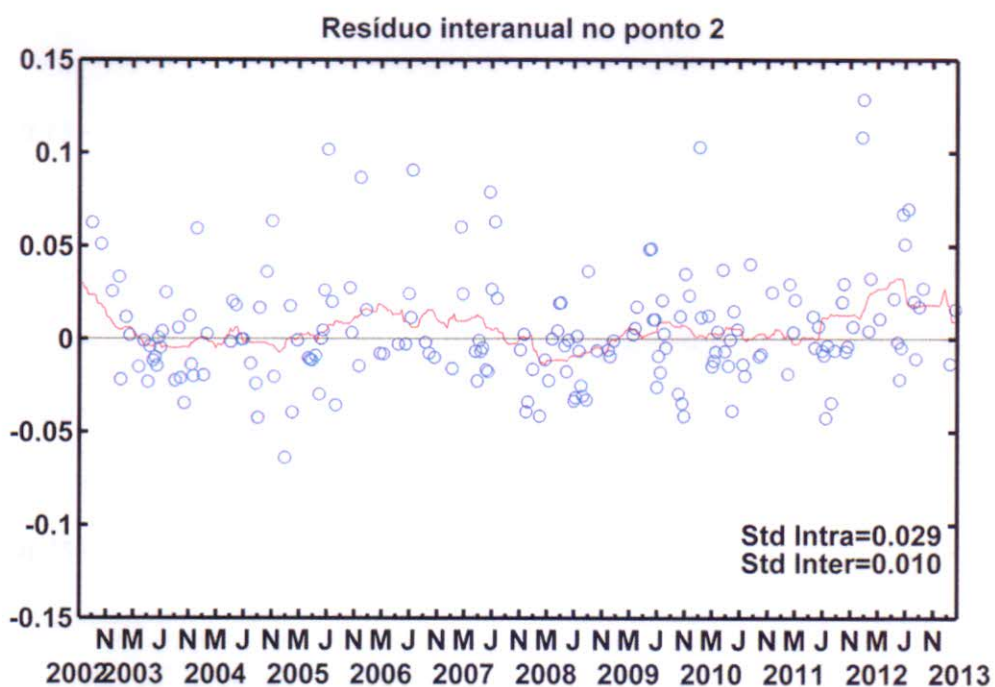
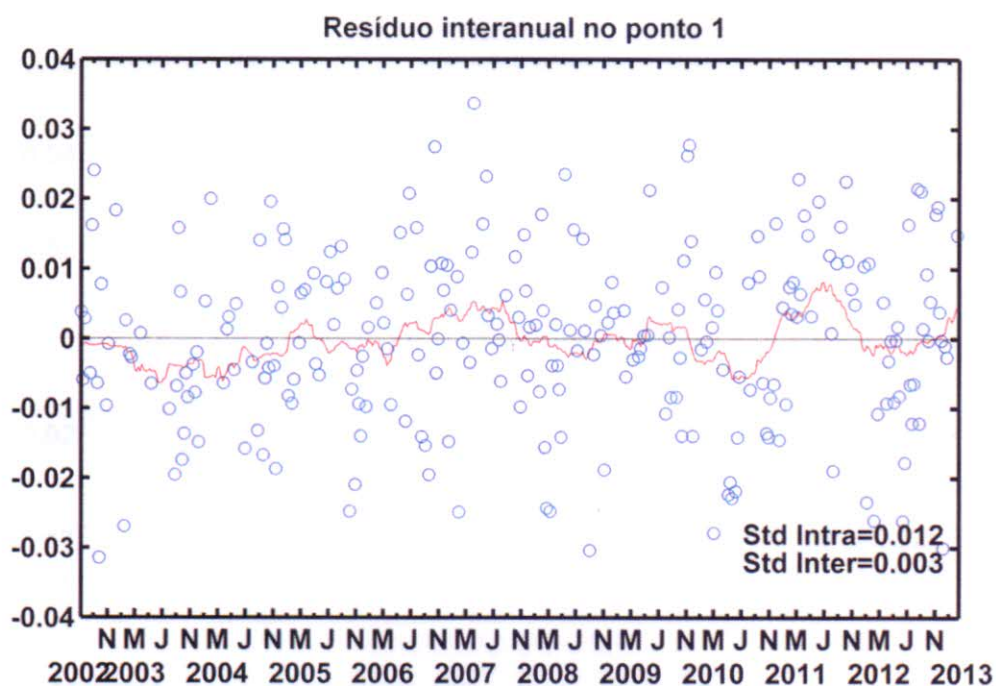
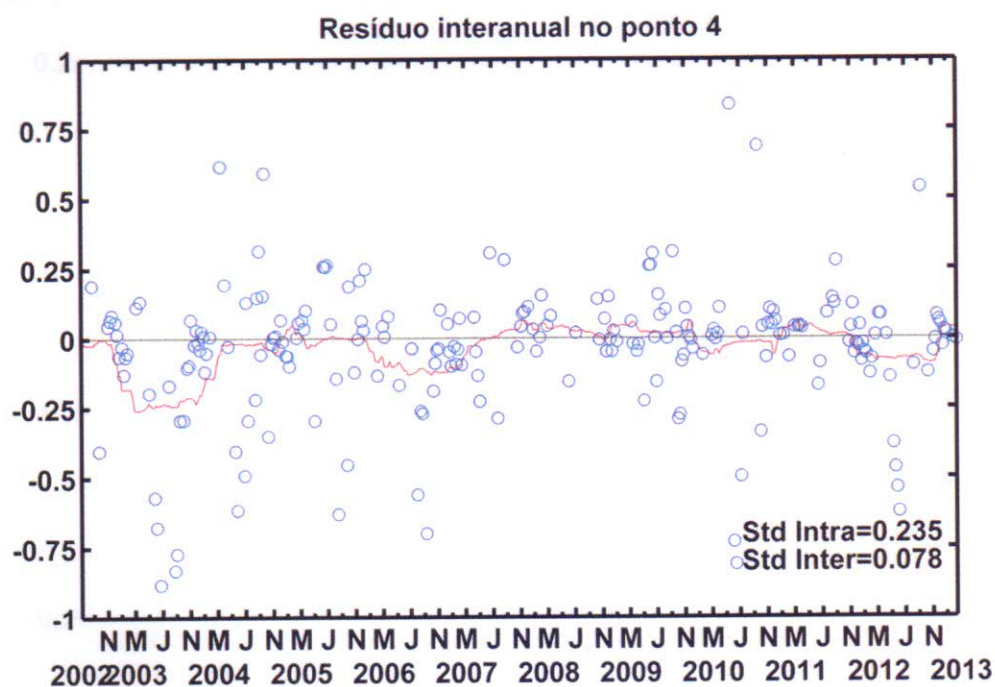
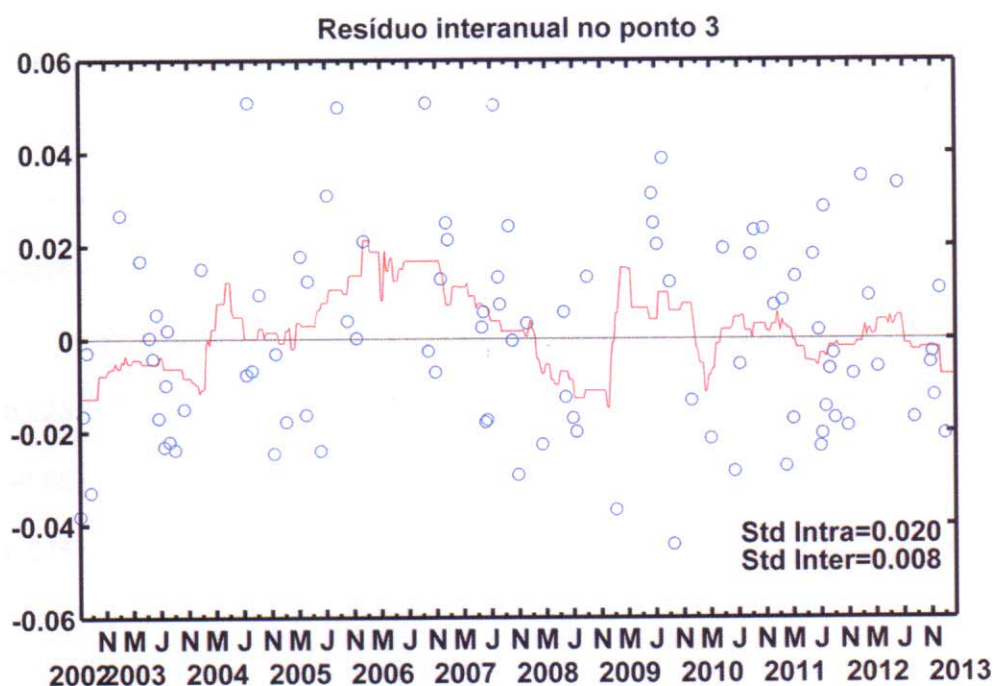
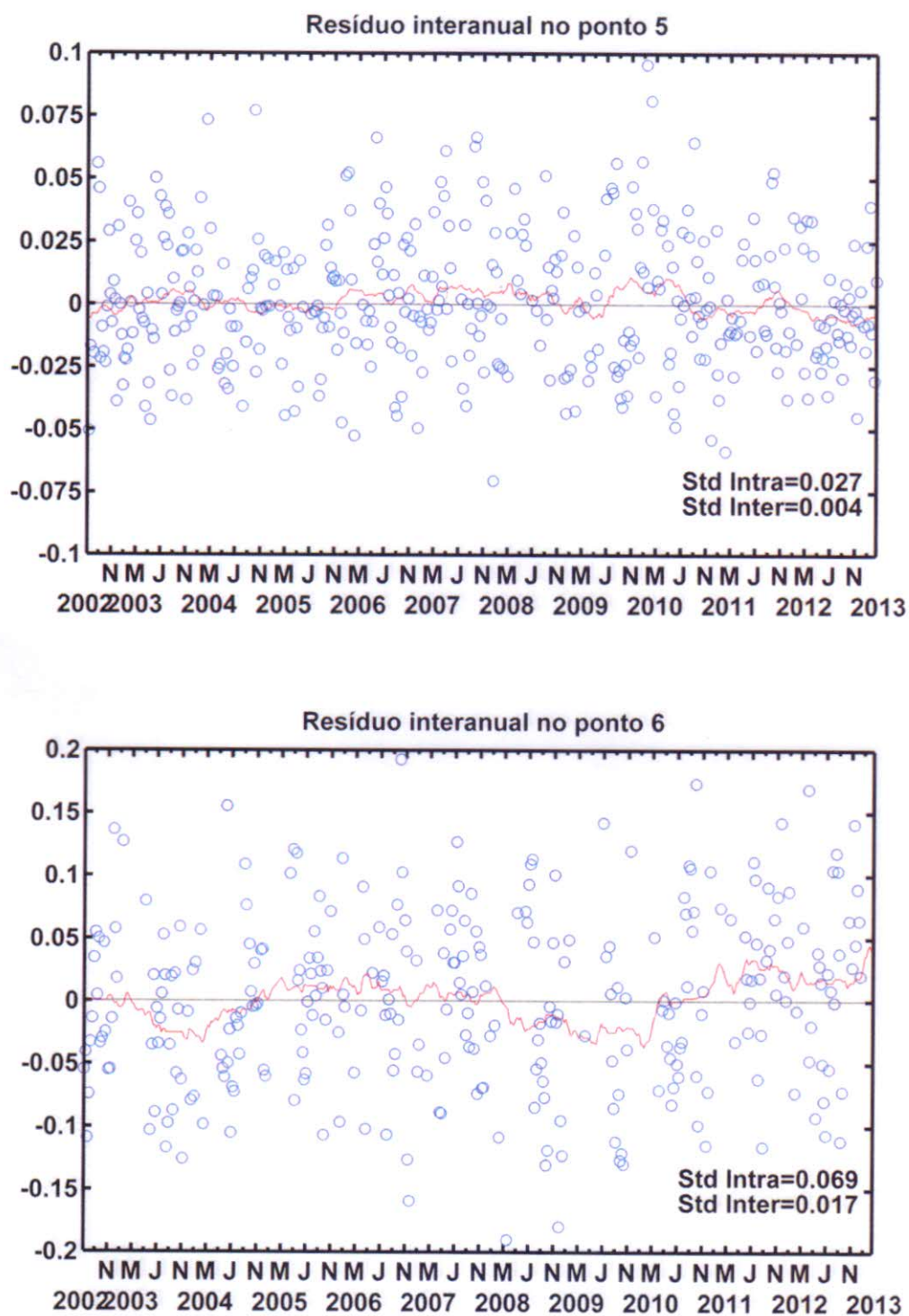


Figura 20 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 3 e 4 (mg/m³).



Fonte: o autor. A linha vermelha corresponde a variabilidade do resíduo interanual e os círculos azuis representam a variabilidade do resíduo intra-anual.

Figura 21 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 5 e 6 (mg/m³).



Fonte: o autor. A linha vermelha corresponde a variabilidade do resíduo interanual e os círculos azuis representam a variabilidade do resíduo intra-anual.

Figura 22 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 7 e 8 (mg/m³).

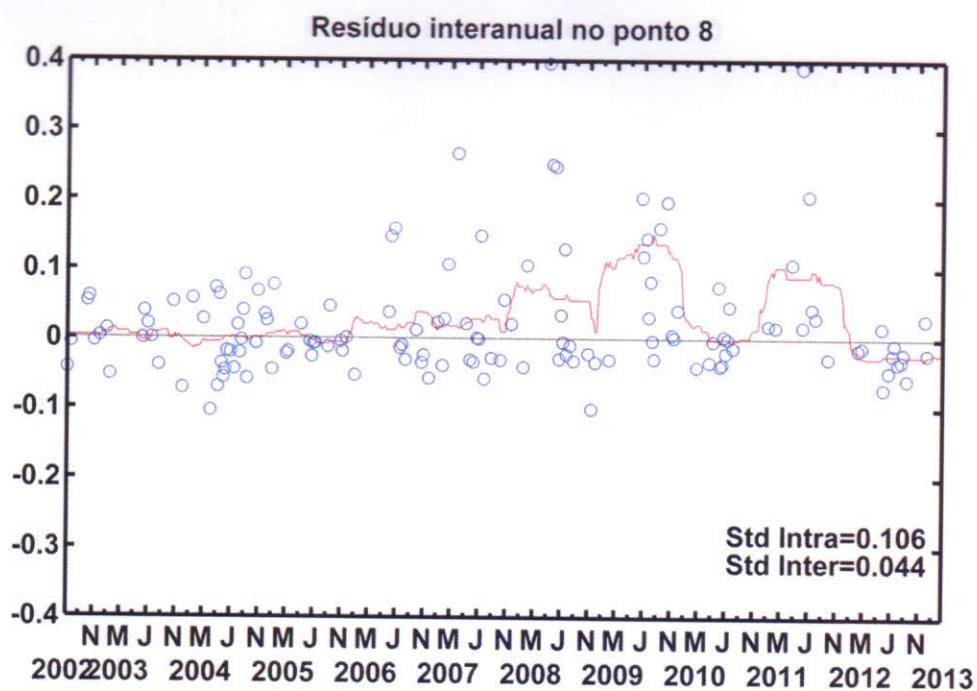
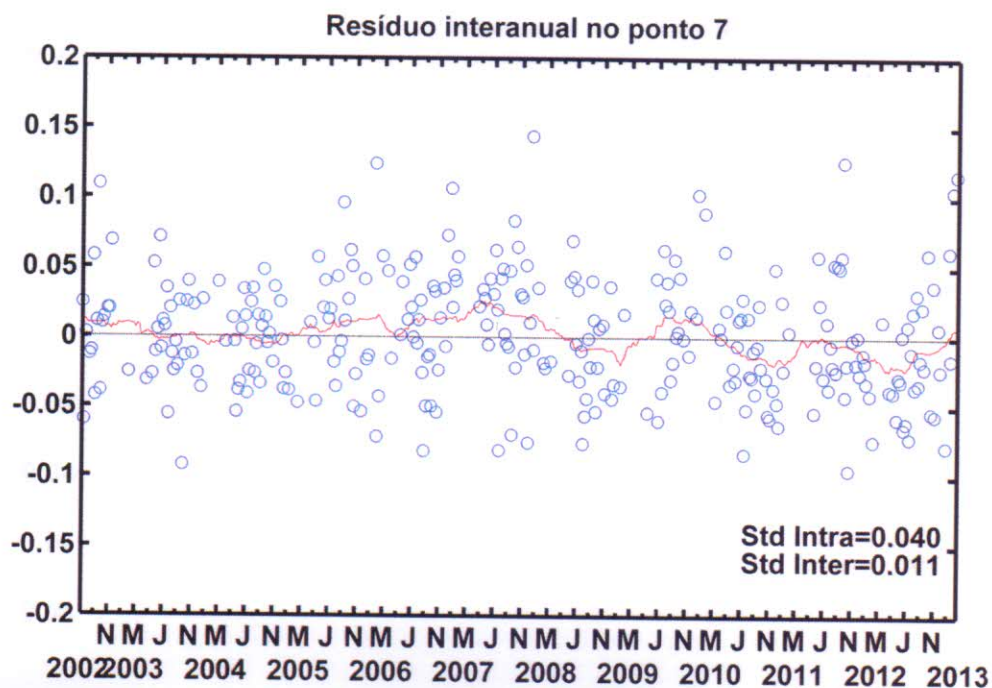
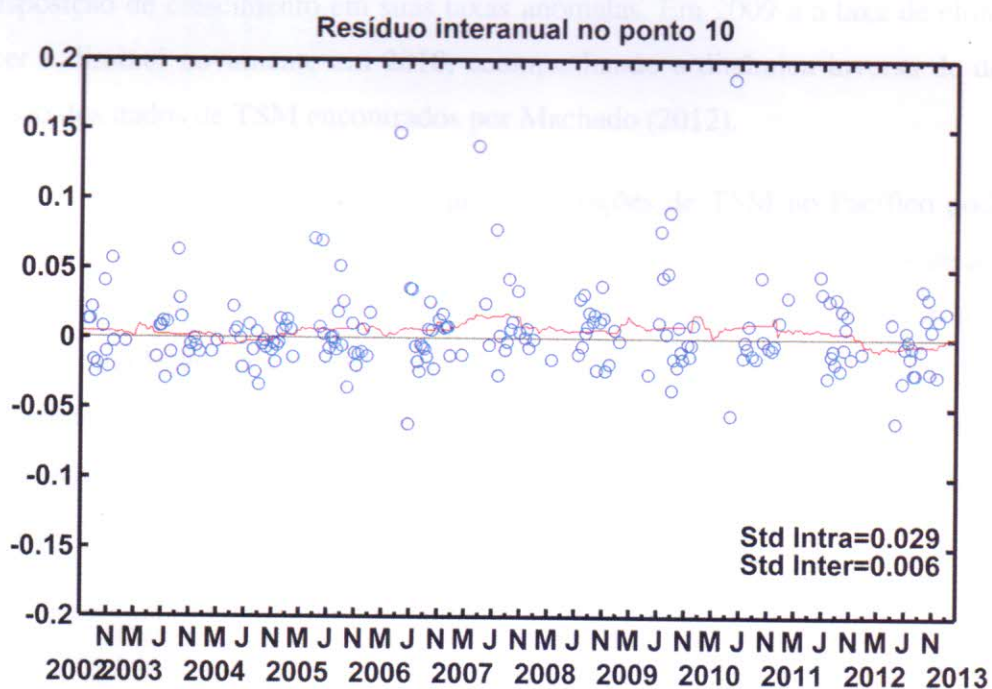
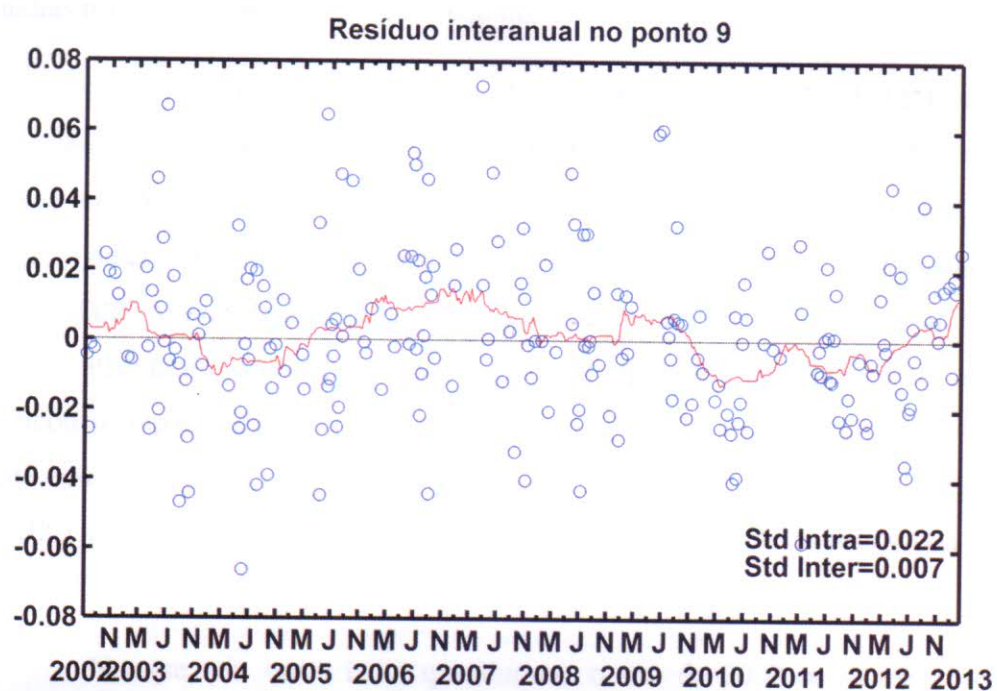


Figura 23 – Séries temporais da variabilidade não determinística no ponto 9 e 10 (mg/m³).



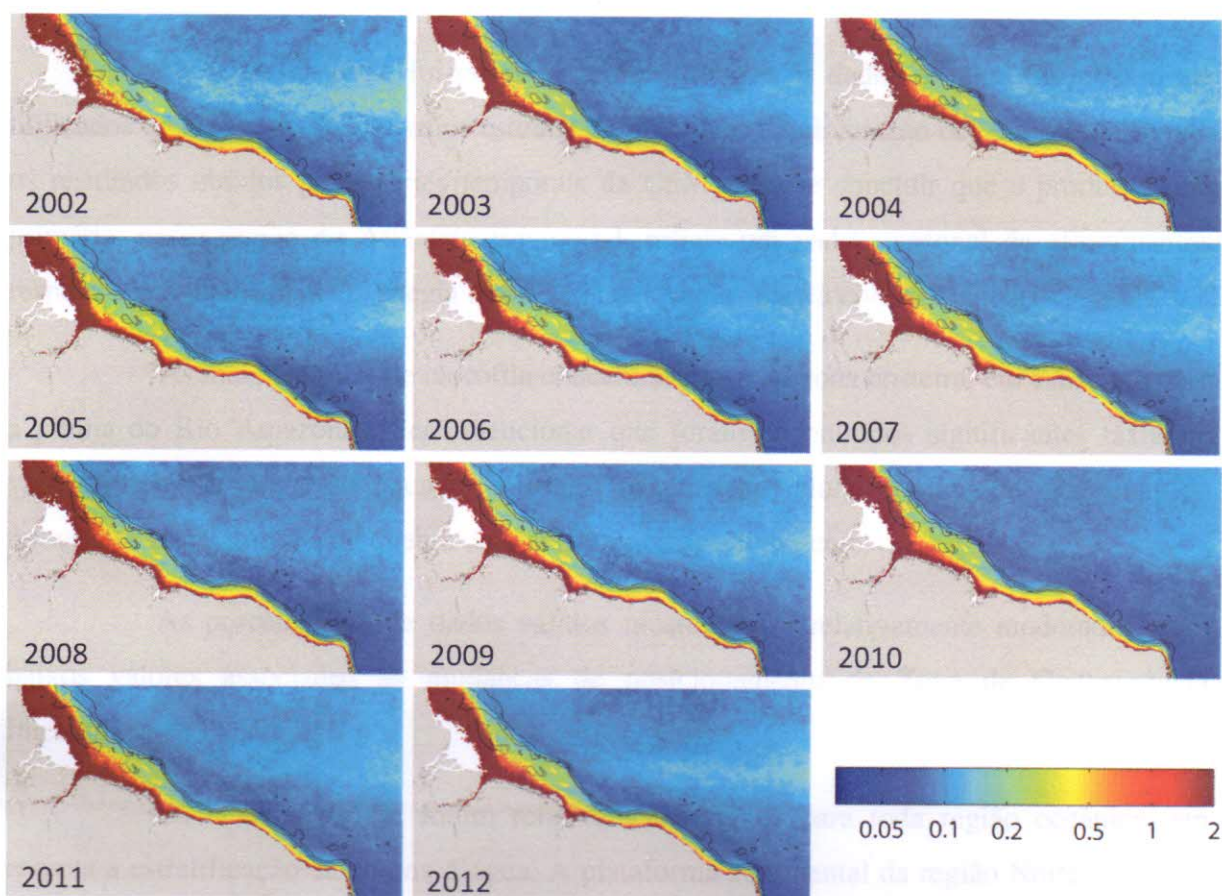
Os mapas das médias anuais de clorofila-a para todo o período em questão estão expressos na Figura 24, com o objetivo de evidenciar, de forma mais clara, a intensidade das anomalias no processo de ressurgência equatorial.

A anomalia mais forte ocorreu durante os anos de 2002 e 2012. Coincidindo com os dados encontrados por Grodsky *et al.*(2008) para 10 anos de registro sobre a variabilidade da CSM no Atlântico Equatorial. No qual destacou que o mais drástico afloramento secundário de clorofila na região equatorial ocorreu durante o ano de 2001 estendendo-se para o ano de 2002. Apesar da anomalia gerada pelo vento não ser considerada tão forte para esse ano, eles atribuíram ao fato de que a baixa frequência de relaxamento da termoclina amplificou o impacto causado pelo vento no equador. De acordo com Machado (2012) foi durante esse ano (2002) que ocorreu a anomalia mais negativa da TSM na região equatorial entre 2001 e 2011, sugerindo uma possível correlação com o efeito remoto da intensificação do evento ENSO.

Nota-se, por outro lado, que durante o ano de 2008 os mapas apresentaram as menores taxas de ressurgência equatorial, no momento em que a TSM apresentava uma predisposição de crescimento em suas taxas anômalas. Em 2009 a taxa de clorofila volta a crescer e diminui novamente em 2010, acompanhando a dinâmica inversa de decréscimo e ascensão dos dados de TSM encontrados por Machado (2012).

Estudos recentes sugerem que as variações de TSM no Pacífico podem afetar a toda a célula de Walker sobre o Atlântico. Desse modo, durante os eventos de aquecimentos anômalos no Pacífico, os ventos alísios de sudeste se intensificam no equador modificando o padrão de circulação na camada superficial do oceano. Esse padrão de circulação oceano-atmosférica fortalece o transporte de Ekman divergente aumentando as taxa de afloramentos sobre a faixa equatorial (LOHMANN AND LATIF, 2007). O inverso também é observado durante os eventos de La Niña.

Figura 24 – Representação esquemática das médias anuais de clorofila da superfície do mar para o período de Julho de 2002 a Dezembro de 2012 (mg/m³).



Fonte: o autor.

5 CONCLUSÃO

De maneira geral, foi possível demonstrar que os dados de clorofila podem ser utilizados na região tropical para os estudos de processos de circulação oceânica. 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. Sem mencionar que foram encontrados significantes taxas de variabilidade ao longo do equador e sobre manchas no talude continental, sugetivas de ressurgência equatorial e de quebra da plataforma, respectivamente.

As porcentagens de dados válidos mostraram-se relativamente moderadas, com baixos valores associados as mudanças de posicionamento da Zona de Convergência Intertropical.

Os desvios padrão foram relativamente baixos para toda região oceânica, em respota a estratificação da coluna d'água. A plataforma continental da região Norte do Brasil apresentou os maiores níveis de variabilidade, graças a influência do Rio Amazonas. Equanto que sobre a região Noredeste a concentração de clorofila demonstrou-se bastante constante e com baixo desvio padrão.

A interpretação das imagens também contribuiu para a identificação de dois processos de afloramentos ocorrendo sobre a faixa equatorial, em virtude do fortalecimento dos ventos alísios e dos ajustes da termoclina. O afloramento primário ocorre durante os meses de Julho e Agosto e o secundário no mês de Dezembro. Infelizmente o modelo de ciclo anual, por apresentar um único valor de amplitude para o harmônico da série temporal, não conseguiu demonstrar com clareza o segundo afloramento de clorofila na faixa equatorial.

O ciclo anual apresentou baixas correlações para a maioria dos pontos selecionados. 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 CSE e CNB.

Os dados de anomalias interanuais revelaram-se bastante pequenos. Contudo, devido a carência de informações na literatura não pôde-se intefir de forma satisfatoria a respeito dos processos físicos que governam a variabilidade intra e interanual.

A análise de dados obitidos pelo sensor MODIS/AQUA representaram um considerável avanço no monitoramento ambiental de clorofila-a da superficie do mar, permitindo uma identificação mais apurada dos processos dinâmicos que ocorrem no ecossistema marinho. Entretanto, o método ainda apresenta algumas limitações espectrais que podem ser aperfeiçoadas com a melhoria dos algoritmos utilizados pelos sensores espaciais com a validação de dados *in situ*.

REFERÊNCIAS

- ANTOINE, D.; ANDRE, J.M.; MOREL, A. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll. **Global Biogeochemical Cycles**, vol. 10, p. 57-69, 1996.
- BERGER, A. P. *et al.* T. **Variabilidade espaço-temporal da clorofila-a e a relação com processos oceanográficos no Oceano Atlântico Equatorial. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** Natal - RN. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, São José dos Campos: INPE, vol. 1, p. 6401-6408, 2009.
- BECKER, H. **Hidrologia dos Bancos e Ilhas oceânicas do Nordeste Brasileiro, uma contribuição ao Programa REVIZEE.** 2001. 151 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ecologia e Recursos Naturais, Departamento de Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.
- CAMPBELL, J. W.. The lognormal distribution as a model for bio-optical variability in the sea. **Journal of Geophysical Research**, vol. 100, p. 13237-13257, 1995.
- CARVALHO, M. Â. V. ; OYAMA, M. D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona De Convergência Intertropical Atlântica: Aspectos Observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, vol. 28, no. 3, p. 305-316. 2013.
- CASTRO, B. M. *et al.* O mar de amanhã, com as mudanças climáticas de hoje. **Ciências e Cultura**, São Paulo, vol. 62, n. 3, p. 40-42, 2010.
- 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.
- CIOTTI, Áurea M.; GARCIA, Carlos A. E.; JORGE, Daniel S. F.. Temporal and meridional variability of Satellite-estimates of surface chlorophyll concentration over the Brazilian continental shelf. **Pan-american Journal Of Aquatic Sciences**, p.236-253, 2010.
- EMERY, W. J., THOMSON, R. E. **Data Analysis Methods in Physical Oceanography.** 1^a ed. [S.l.]: Pergamon, 1997.
- FRATANTONI, D.M.; GLICKSON, D.A. North Brazil Current ring generation and evolution observed with SeaWiFS. **Journal of Physical Oceanography**, vol. 32, p. 1058-1074, 2002.
- FERREIRA, A. T. S.. **Geoprocessamento de dados meteoceanográficos (cor do oceano e temperatura da superfície do mar) aplicado ao monitoramento ambiental na costa setentrional do Rio Grande do Norte.** 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado), PPGG UFRN, Natal/RN, 2009.
- 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.

GARCIA, C. A. E. *et al.* Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region, **Deep-Sea Research**, vol. 51, no. 1–3, pp. 159–172, 2004.

GÓES, M. P. A. *et al.* Retroflections of the North Brazil Current during february 2002. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, vol. 52, no. 4, p.647–667, 2005.

GÓES, M. P. A. **Circulação no Atlântico Tropical para eventos extremos**. 2001. 87 f. Dissertação (Mestrado), Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 2001.

GRODSKY, S. A.; CARTON, J. A.; MCCLAIN, C. R. Variability of upwelling and chlorophyll in the equatorial Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 3, 2008.

HU, C.; LEE, Z.; FRANZ B.A. Chlorophyll-a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference, **Journal of Geophysical Research**, vol. 117, C01011, 2012.

HUETE, A. R. Soil influence in remote sensed vegetation-canopy spectra. In: **Introduction to the physics and techniques of remote sensing**. New York: Wiley-Interscience, p. 107 – 141, 1987.

JOHNS W., ZANTOPP, R., GONI G. Cross-gyre Water Mass Transport by North Brazil Current Rings, to Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean, **Elsevier Oceanographic Series**, vol. 68, p. 411-442, 2003.

JOHNS, W. E. *et al.* The North Brazil Current retroflection: Seasonal structure and eddy variability, **Journal of Geophysical Research**, vol. 95 (C12), p. 22103–22120, 1990.

JOHNS, W. E., *et al.* Annual cycle and variability of the North Brazil Current, **Journal of Physical Oceanography**, vol. 28, no. 1, p. 103–128, 1998.

KAWAMURA, Hiroshi; TEAM, The OCTS. OCTS Mission Overview. **Journal Of Oceanography**, vol. 54, p. 383-399, 1998.

LENTZ, S. J. Seasonal variations in the horizontal structure of the Amazon Plume inferred from historical hydrographic data. **Journal of Geophysical Research**, vol. 100, p. 2391–2400, 1995.

LOHMANN, Katja; LATIF, Mojib. Influence of El Niño on the Upper-Ocean Circulation in the Tropical Atlantic Ocean. **Journal Of Climate**, vol. 20, p. 512-518, 2007.

LONGHURST, A. Seasonal cooling and blooming in the tropical oceans. **Deep Sea Research Part I**, vol. 40, p. 2145–2165, 1993.

MENEZES, V. V. **Relação entre processos físicos e a cor do Oceano Atlântico Tropical**. 2001. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

MODIS Web. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php>>. Acessado em: 20/08/2013

MOLINIER, M. *et al.* **Hidrologia da Bacia do Rio Amazonas. Água em Revista.** Companhia de Pesquisa e Recursos Hídricos e Minerais, vol. 2, p. 31-36, 1995.

MOLINARI, R.. Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978–1980. **Journal of Geophysical Research**, vol. 87, p. 9707–9714, 1982.

MONGER, B.; MCCLAIN, C.; MURTUGUDDE, R. Seasonal phytoplankton dynamics in the eastern tropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, vol. 102, no. C6, p. 12389–1241, 1997.

Ocean Color Web. Disponível em: <<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>>. Acessado em: 20/08/2013

O'REILLY, J. E. *et al.* SeaWiFS postlaunch calibration and validation analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum, NASA, TM-2000-206892, vol. 11, 49 p. 2000.

PEREZ, V. *et al.* 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.

RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN L. M.; WIMBUSH M.. Seasonal Variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A Numerical Study. **Journal of Physical Oceanography**, vol. 37, p.16–30, 2007.

SALISBURY, J. *et al.* Spatial and temporal coherence between Amazon River discharge, salinity, and light absorption by colored organic carbon in western tropical Atlantic surface waters, **Journal of Geophysical Research**, vol. 116, p. 1-14, C00H02, 2011.

SIGMAN, D.M.; BOYLE, E.A. Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. **Nature**, vol. 407, p. 859-869, 2000.

SIGNORINI, S. R. *et al.* Biological and physical signatures in the tropical and subtropical Atlantic. **Journal of Geophysical Research**, vol. 104, p. 18367–18382, 1999.

SILVEIRA, I. C. A. DA *et al.* A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, vol. 48, no. 2, p. 171-183(C11), 2000.

SCHOTT F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. Transports and Pathways of the Upper-Layer Circulation in the Western Tropical Atlantic. **Journal Of Physical Oceanography**, vol.28, Kiel, p. 1904-1928, 1998.

SOUZA, A. T. M. **Resposta do fitoplâncton a um evento de ressurgência em uma estação fixa, na plataforma interna de Cabo Frio - RJ.** 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ecologia, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2006.

STRAMMA, L.; ENGLAND M.. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, vol. 104(C9), 20, p. 863–883. 1999.

- UZ, B.M.; YODER J. A.. High frequency and mesoscale variability in SeaWiFS chlorophyll imagery and its relation to other remotely sensed oceanographic variables. **Deep Sea Research II**, vol. 51, no. 10-11, p. 1001-1017, 2004.
- VIANNA, Simone de Castro; SANQUETTA, Carlos Roberto. Mudanças climáticas e o fitoplâncton marinho: uma revisão. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; p. 1883-1901, 2012.
- YODER, J.; KENNELLY, M.,. Seasonal and ENSO variability in global ocean phytoplankton chlorophyll derived from 4 years of SeaWiFS measurements. **Global Biogeochemical Cycles**, vol. 17, no. 4, p. 23-37, 2003.
- WANG, Xiujun *et al.* Phytoplankton carbon and chlorophyll distributions in the equatorial Pacific and Atlantic: A basin-scale comparative study. **Journal Of Marine Systems**, p.138-148, 2013.
- WISSER, D. *et al.* Reconstructing 20th century global hydrography: A contribution to the Global Terrestrial Network-Hydrology (GTN-H), **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 14, p. 1-24, 2010.
- ZEMBA, I. C. **The structure and transport of the Brazil Current between 27° and 36° South**. 1991. 160 f. Tese (Doutorado), Massachusetts Institute Of Technology And Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, 1991.