



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE OCEANOGRAFIA**

SUENE COSTA CORRÊA

**VARIAÇÃO SAZONAL DA CLOROFILA A NO ATLÂNTICO EQUATORIAL
OCIDENTAL A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS**

BELÉM

2009

SUENE COSTA CORRÊA

**VARIAÇÃO SAZONAL DA CLOROFILA A NO ATLÂNTICO EQUATORIAL
OCIDENTAL A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Oceanografia do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará, em
cumprimento as exigências para a obtenção do
grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir M e Souza Filho.

BELÉM

2009

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Corrêa, Suene Costa

C824a Variação sazonal da clorofila *a* no Atlântico Equatorial Ocidental a partir de Imagens de Sensores Remotos. / Suene Costa Corrêa. – 2008

33 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Segundo Semestre de 2008.

Orientador, Pedro Walfir Martins e Souza Filho

1. Sensoriamento remoto. 2. Cor do oceano. 3. Concentração de clorofila *a*. 4. Atlântico Equatorial Ocidental. 5. Rio Amazonas. I. Universidade Federal do Pará. II. Souza Filho, Pedro Walfir Martins, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.:621.3678

SUENE COSTA CORRÊA

**VARIAÇÃO SAZONAL DA CLOROFILA A NO ATLÂNTICO EQUATORIAL
OCIDENTAL A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORES REMOTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em cumprimento as exigências para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

Data da Defesa: 06/02/2009

Conceito: EXCELENTE

Banca Examinadora:



Prof. Pedro Walfir Martins e Souza Filho – Orientador
Doutor em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará



Prof. Alexandre Melo Casseb do Carmo - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof.ª Maria Oziléa Bezerra Menezes - Membro
Doutora em Geologia
Universidade Federal do Pará

A DEUS, por sempre me direcionar ao caminho certo a seguir.

*Aos meus pais, Ivanete e José, pela educação, pelo amor e todos
os valores e princípios repassados.*

Aos meus irmãos, Suelen e Edawinson.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde e ânimo para enfrentar os obstáculos, e por proporcionar a grande alegria de trabalhar com o que amo.

Aos meus pais, grandes incentivadores em todos os momentos. Sempre me fizeram acreditar nos meus sonhos e a nunca desistir deles. Sempre incansáveis e dispostos a investir o que fosse preciso na minha educação e na de meus irmãos.

Ao prof. e orientador Dr. Pedro Walfir M Souza Filho, pela amizade, por todo apoio, confiança, troca de idéias e pela oportunidade de mergulhar no mundo fascinante da oceanografia por satélites. O senhor não poupou esforços, assim como meus pais, para que eu concluísse minha graduação e ingressasse na pós-graduação. Muito obrigada.

Ao prof Dr. Claudio Fabian Szlafsztein, pela amizade, conselhos e todo conhecimento de geoprocessamento adquirido no tempo que trabalhei sob sua orientação. Disciplina esta que me ajudou muito neste trabalho e pela correção no abstract. *Danke schön*.

A prof^a Maria Ozilea Bezerra Menezes, pela amizade, conversas, embarques, atividades de pesquisa, pelo empréstimo do laptop que me permitiu trabalhar em casa, na hora em que mais precisei. Muito obrigada.

A prof^a Susane Rabelo, pela amizade, pelos momentos de intensos debates e descobertas dentro dos Sistemas de Informações Geográficas. Valeu muito à pena ter convivido contigo.

Ao prof. Alexandre Melo Casseb do Carmo, pela amizade, pelas observações e sugestões feitas ao longo da construção deste.

Aos demais professores do Instituto de Geociências pelos ensinamentos e/ou contribuições ao meu trabalho.

Aos meus tios, Hailton e Fátima, que num gesto de grande generosidade, presentearam a mim e minha irmã, com um computador. Gesto esse que fez toda diferença na conclusão deste.

Aos meus amigos, Sarita, Ruan, Eurivaldo, Joyce, meu grupo de estudos (e também de risos).

Ao Maurício A F Santos, pelas valiosas dicas nos softwares de geoprocessamento e apoio e incentivo, mesmo a distância.

A toda equipe do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido, família LAIT (a qual tive a honra de compor nos último dois anos), em especial a Helenice, Paulo, Karla, Wilson, Fernando, Carlos, Glenda, Lourival e Maria. Infelizmente não há espaço aqui para enumerar o quanto todos eles me ajudaram ao longo dessa jornada. Uma grande família, sem dúvida uma grande equipe.

A Equipe do Laboratório de Oceanografia Física (LOF), em especial ao Renan Peixoto, por encarar junto comigo os vários desafios no ArcGis, e também pelas dicas, incentivo e orientações de um veterano na Oceanografia Física. O seu TCC e o do Maura e da Ana Paula, serviram de inspiração para o meu. Obrigada

A equipe do Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC), da COPPE, UFRJ, especialmente Luana Freire, Marcos Gallo, Leonardo Dardengo e Carla Vilela, Susana Vinzon. Aprendi muito com vocês durante os embarques pela Barra Norte do rio Amazonas, a bordo do NavHi Sirius. Léo, obrigada pelas aulas de reflectância *in situ*.

Por falar em Sirius, agradeço também ao seu atual comandante, capitão de Mar-e-Guerra Roberto Pacheco Leandro, por todo incentivo, apoio e entusiasmo, pelas discussões e observações acerca deste trabalho, pelos *ebooks* e artigos. Sempre fez questão de lembrar-me da importância da leitura e do cálculo (a mancheias!).

Ao Márcio Raiol, pelas palavras de incentivo no momento certo.

Aos funcionários da Biblioteca de Geociências, que auxiliaram-me com toda paciência na formatação deste.

A todos aqueles que me ajudaram direta ou indiretamente na realização desta etapa.

Todos vocês acompanharam minha trajetória até aqui, com os melhores votos. Pude dividir com vocês não apenas minhas alegrias e vitórias, mas minhas frustrações e inseguranças também. Alguns puxões de orelha, claro, aconteceram ao longo desse árduo caminho. Não me queixo de nenhum, pelo contrário, todos foram dados para o meu bem e hoje estou muito feliz.

Não poderia esquecer de que, paralelo à conclusão da graduação, vocês me ajudaram a encarar e a vencer outro desafio: o ingresso no mestrado. Nada mais justo de que dividir com vocês mais essa alegria que Deus me concede.

O que tenho a dizer é obrigada e obrigada.

*“É melhor conseguir sabedoria do que ouro;
é melhor ter conhecimento do que prata.
Quem presta atenção no que lhe ensinam terá sucesso;
quem confia no Deus Eterno será feliz”*

Provérbios 16: 16 e 20

RESUMO

A concentração de clorofila a (chl a) no oceano Atlântico Equatorial Ocidental tem variado em função da descarga de grandes rios, como o Amazonas e Orinoco. Dados de chl a, temperatura da superfície do mar (TSM) e magnitude e direção de ventos, adquiridos por sensores remotos orbitais tem permitido melhor compreensão da dinâmica dos oceanos, em especial na foz do rio Amazonas, que contribui significativamente para a produção primária do Atlântico Equatorial. Este trabalho analisou as variações sazonais e as estruturas espaciais da chl a no oceano Atlântico Equatorial Ocidental, e de que forma esta está relacionada com as variações da TSM, da zona de convergência intertropical (ZCIT) e da descarga fluvial do rio Amazonas. Dados de séries temporais de chl a e TSM foram analisados, ambos obtidos através do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo do satélite Aqua; de ventos obtidos através do sensor SeaWinds, a bordo do satélite QuickSCAT e de vazão do rio Amazonas adquiridas no banco de dados da Agência Nacional das Águas (ANA) , para o período de julho de 2002 até dezembro de 2007.

O comportamento médio mensal dos dados de chl a e TSM foi analisado, bem como as correlações entre chl a e TSM, e chl a e vazão do rio Amazonas. A análise dos dados permite afirmar que a chl a aumenta concomitantemente com a elevação da TSM a partir do mês de julho, quando a retroflexão da Corrente Norte Brasileira (CNB) começa a ser estruturada. Tal processo ocorre sempre após a estação de maior descarga do rio Amazonas (abril-junho), atingindo valores máximos durante o verão boreal (julho-setembro). Nesta estação ocorre um “bloom” indicado por elevadas concentrações de chl a e altas TSM estão fortemente associadas a ZCIT e a retroflexão da Corrente Norte Brasileira.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto. Cor do Oceano. Concentração de Clorofila a. Atlântico Equatorial Ocidental. Rio Amazonas.

ABSTRACT

Chlorophyll a concentration (chl a) in the Western Equatorial Atlantic ocean has been varied in function of great rivers discharge, like the Amazon and Orinoco. Chl a, sea surface temperature (SST) and winds data from orbital remote sensors has been allowed a further comprehension of the oceans dynamics, especially in the Amazon river mouth. This river contributes significantly for primary production in the Equatorial Atlantic ocean. This work goals the analysis of the seasonal variations and the spatial structures of chl a in Western Equatorial Atlantic ocean, and their correlations with TSM, Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and Amazon River discharge variability. Chl a, TSM, winds and discharge river temporal series data were analyzed for the period from July 2002 to December 2007. Both chl a and SST data were obtained from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on the Aqua satellite. Monthly winds are from microwave scatterometer (SeaWINDS) flown on the QuikSCAT satellite and discharge river data were acquired on National Agency of Waters (ANA) database. Monthly average behaviour of chl a and TSM data was analyzed, as well as the correlations between chl a and TSM, and chl a and the Amazon River outflow. The data analysis showed that the chl a starts to increase in July, concomitantly with TSM increase and the North Brazil Current (NBC) retroflexion start to appear. This process always occurs after the larger discharge period (April-June), with maximum values during boreal summer (July-September). In this season, the summer bloom indicated by higher chl a and warmer SST are linked strongly to the ITCZ and NBC retroflexion.

Key words: Remote Sensing. Ocean Color. Chlorophyll a concentration. Western Equatorial Atlantic. Amazon River.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	15
Figura 4.1 - Comportamento médio mensal da concentração da clorofila a de julho de 2002 a dezembro de 2007 , utilizando dados do sensor MODIS.....	20
Figura 4.2 - Comportamento médio mensal de concentração de clorofila a, composta de cinco anos de dados mensais do sensor MODIS de Julho de 2002 até Dezembro de 2007.....	21
Figura 4.3 - Comportamento médio mensal temperatura da superfície do mar, composta de cinco anos de dados mensais do sensor MODIS de Julho de 2002 até Dezembro de 2007.....	23
Figura 4.4 - Média mensal da temperatura da superfície do mar de julho de 2002 a dezembro de 2007 , utilizando dados do sensor MODIS	24
Figura 4.5 - Média mensal de ventos, magnitude e direção, de julho de 2002 a dezembro de 2007 , utilizando dados do sensor SeaWINDS	25
Figura 4.6 - Valores de vazão no Rio Amazonas, estação de Óbidos, de janeiro de 2002 até janeiro de 2008.....	26
Figura 4.7 - Resultados do Teste t de Student aplicado sobre os dados de correlação entre chl a e TSM.....	27
Figura 4.8 - (a) Distribuição espacial dos coeficientes de correlação da chl a (miligramas por metro cúbico) e TSM (graus Celsius), ambos sensor MODIS-Aqua, no oceano Atlântico Tropical ao norte América do Sul, de julho de 2002 até Dezembro de 2007. (b) Série temporal da média de chl a (curva vermelha) e TSM (curva azul) sobre área que apresentou correlação positiva (4° N-10° N, 40° W-50° W, o retângulo em (a).....	28
Figura 4.9 - (a, b) Séries temporais de TSM (curva azul) mensal, em graus Celsius, e vazão do rio Amazonas (curva verde), em metros cúbicos por segundo, e Chl a (curva vermelha), miligramas por metros cúbicos, no oceano Atlântico Tropical Oeste (4° N-10° N, 40° W-50° W), de julho de 2002 à dezembro de 2007.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVO.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL.....	14
3	ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE SR E FERRAMENTAS DE ANÁLISE.....	15
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	15
3.2	AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	16
3.2.1	Dados mensais de concentração de clorofila (chl a) e temperatura da superfície do mar (TSM).....	16
3.2.2	Dados de ventos superficiais	18
3.2.3	Dados de vazão.....	18
4	RESULTADOS.....	19
4.1	CICLO SAZONAL DA CLOROFILA A (chl a).....	19
4.2	RELAÇÃO TSM E VENTOS.....	22
4.3	VAZÕES DO RIO AMAZONAS.....	26
4.4	RELAÇÃO ENTRE CHL A E TSM.....	26
4.5	RELAÇÕES CHL-VAZÃO E TSM-VAZÃO.....	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	30
	REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A região do Atlântico Equatorial Ocidental (10°S-15°N;30°W- 70°W) é fortemente influenciado pela descarga do rio Amazonas. A pluma de sedimentos fluviais, rica em nutrientes, promove o aumento da produtividade das águas costeiras. Flutuações na vazão fluvial, assim como a temperatura da superfície do mar (TSM) e ventos também podem influenciar aos “blooms” de fitoplâncton.

O presente estudo, a partir de dados do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), a bordo do satélite AQUA, enfatiza como a concentração de clorofila *a* (chl *a*) varia no tempo e no espaço. Esse estudo constitui uma contribuição ao entendimento dos processos biogeoquímicos e biológicos marinhos nesta região e caracterização da interação entre oceano e atmosfera.

A variação espaço-temporal global de chl *a* no Atlântico Equatorial, de 1980 a 2000, teve um aumento significativo em relação ao resto do globo, principalmente para os meses de primavera (março-maio) e verão (junho-agosto) boreais (Gregg e Conkriht, 2002). Este aumento de chl *a*, durante o verão, foi associado à zona de ressurgência no Atlântico oriental. Ainda nesse estudo, o aumento da chl *a* observado a partir dos dados SeaWIFS foi influenciado pela descarga dos rios Congo, Amazonas e Niger, que produziram anomalias positivas de TSM.

Gregg et al (2003) ressaltam que esse aumento na produção anual primária, nas bacias de baixa latitude, como o Atlântico Equatorial, pode indicar variações no consumo de carbono via fotossíntese como resultado de mudanças climáticas e sugere maiores implicações para o ciclo global do carbono.

Takahashi et al (1997) afirma que o Atlântico Equatorial é um das fontes de CO₂ para a atmosfera. E o aumento na produção primária nesta bacia pode significar uma redução do fluxo de CO₂ para a atmosfera, devido ao maior consumo do gás pelo fitoplâncton oceânico durante o processo de fotossíntese (Gregg et al, 2003).

Dadas essas implicações climáticas, o monitoramento dessa área torna-se de grande importância. Este monitoramento é facilitado pela alta correlação existente entre processos físicos de grande e meso-escala com a chl *a*. Um deles é a propagação de *eddies* anticiclônicos ao longo da costa da América do Sul (Signorini,

1999). A descarga hídrica e sólida de rios como o Amazonas e Orinoco tem forte assinatura com plumas com altos valores de chl *a* ($\sim 10 \text{ mg. m}^{-3}$) (Signorini, 1999).

A TSM, juntamente com os ventos, tem papel importante na variabilidade sazonal da biomassa plactônica em áreas costeiras do Atlântico Equatorial. A TSM indica a localização aproximada da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre os oceanos e influencia remotamente a precipitação continental em regiões costeiras (Biasutti, Battisti e Sarachik, 2003). Quanto mais intenso for o regime pluviométrico, maior volume de água estará presente na bacia de drenagem. O maior volume de água no sistema implica na maior vazão dos rios, resultando num maior volume de nutrientes despejados no oceano, refletindo direto na produção primária local (Gregg et al, 2003)..

O presente estudo analisou a variação sazonal e as estruturas espaciais de chl *a*, a partir de dados do sensor MODIS no Atlântico Equatorial Oeste, fortemente influenciada pela descarga do rio Amazonas. Correlações entre chl *a* e TSM, assim como entre chl *a* e vazão do rio Amazonas foram calculadas para entender a variabilidade da concentração de chl *a* na área investigada. Dados mensais de ventos também foram examinados para auxiliar no entendimento dessa questão.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a variação sazonal e as estruturas espaciais de chl *a* no Atlântico Equatorial Ocidental e sua interrelação com a descarga do rio Amazonas, TSM e ventos. Para que este objetivo fosse alcançado foi necessário:

- Processar e analisar os dados de média mensal de chl *a* e TSM do sensor MODIS para o período de julho de 2002 a dezembro de 2007;
- Processar e analisar os dados de média mensal de vento do sensor SeaWinds para o período de julho de 2002 a dezembro de 2007;
- Analisar os dados de vazão do Rio Amazonas em Óbidos para o período de julho de 2002 a dezembro de 2007;
- Analisar as séries temporais referentes aos dados mencionados acima;
- Analisar os dados de correlação entre as variáveis mencionadas.

3 ÁREA DE ESTUDO, DADOS DE SR E FERRAMENTAS DE ANÁLISE

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo está compreendida entre os paralelos 15°N e 10°S, e entre os meridianos 40° W e 50° W (veja figura 3.1).

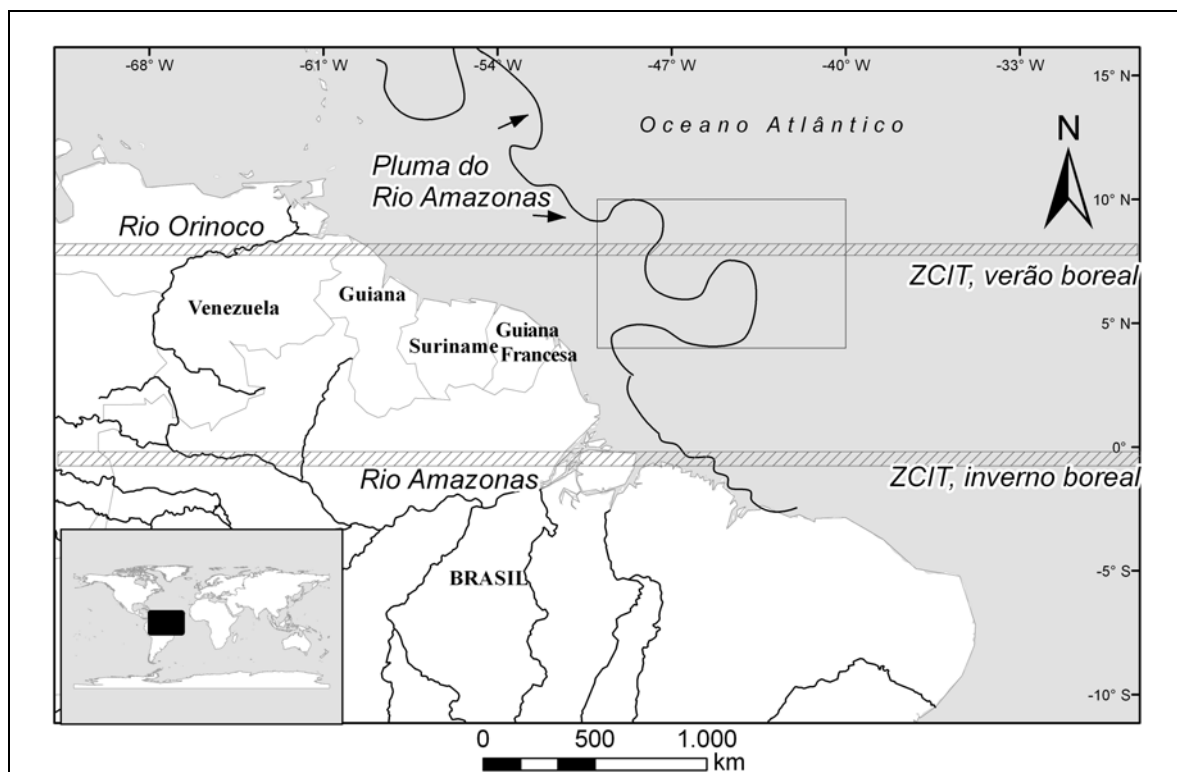


FIGURA 3.1 - Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Pluma, mês de julho e agosto, adaptado de Molleri (2008); ZCIT (Grodsky e Carton, 2002).

A área em estudo é fortemente influenciada pela descarga hídrica e sólida do rio Amazonas, pela Corrente das Guianas e por ventos alísios de nordeste que possibilitam a mistura da água do referido rio com a água do Oceano Atlântico, formando uma imensa pluma de sedimentos, altamente turbida, com índices de salinidade bastante reduzidos, que se estende ao longo da plataforma, pelo menos 300 km em direção à NW (LIMEBURNER et al., 1995). A região do Atlântico Equatorial Oeste também é marcada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que corresponde a uma faixa onde os ventos alísios convergem e suas velocidades são reduzidas. A ZCIT varia de latitude no Atlântico e durante o mês de janeiro, é deslocada em direção ao sul, sobre águas equatoriais mais quentes, com intensa convecção sobre a América do Sul. Esse deslocamento da máxima TSM,

que inicia em janeiro e vai até julho, é refletido na magnitude e direção dos ventos (Grodsky e Carton, 2002). Durante a primavera boreal (Março-Maio), A máxima TSM está bem próxima do equador, e no final do verão boreal (Agosto) ela se desloca entre 10°N-15°N (Grodsky e Carton, 2002).

3.2 AQUISIÇÃO DOS DADOS

As seguintes variáveis são objetos de estudo deste trabalho:

- Concentração de clorofila-a (chl a) estimada a partir do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA, para o período de julho de 2002 a dezembro de 2007;
- Temperatura da superfície do mar (TSM) estimada a partir do sensor MODIS a bordo do satélite AQUA, para o período de julho de 2002 a dezembro de 2007
- Magnitude e direção do vento estimado a partir do sensor SeaWind, a bordo do satélite QuickScat, para o período de julho de 2002 à dezembro de 2007;
- Vazão do Rio Amazonas, dados mensais da Agência Nacional das Águas, coletados na estação de Óbidos.

3.2.1 Dados mensais de concentração de clorofila (chl a) e temperatura da superfície do mar (TSM)

Os dados de concentração de clorofila a foram adquiridos no formato ASCII (texto) apresentando as mesmas características dos dados de TSM, com valores mensais expressos mg/m^3 . Este dados foram produzidos pelo “Ocean Biology Processing Group” do “Goddard Space Flight Center”/NASA e estão disponíveis no site <http://reason.gsfc.nasa.gov/OPS/Giovanni/ocean.aqua.shtml>.

O sensor adotado para as duas variáveis foi o MODIS, cujas propriedades estão detalhadas na tabela 1. O produto utilizado é OBGP MODIS-Aqua Monthly Global 9-km Products.

TABELA 1 - Características do sensor MODIS

Órbita	705 km, helio-síncrona, circular
Tamanho	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Peso	228.7 kg
Quantização	12 bits
Resolução Espacial	250 m (bandas 1-2) 500 m (bandas 3-7) 1000 m (bandas 8-36)

Fonte: Acker e Leptoukh (2007).

Os atributos contidos nos arquivos ASCII (Latitude, Longitude e variável analisada) foram inicialmente submetidos a uma padronização num editor de texto, TextPad.

Posteriormente, no intuito de facilitar a manipulação de um grande volume de informações, criou-se um banco de dados no programa Microsoft Office Excel 2003, onde foram retirados todos os campos sem informação, padronização das casas decimais e geração de uma tabela no formato dbf4.

A partir da tabela em formato .dbf foi possível plotar os pontos com as informações referentes num ambiente de SIG (Sistemas de Informações Geográficas), programa Arc Gis 9.3. O passo seguinte consistiu na interpolação dos dados para gerar um GRID, superfícies de informação, e imagens em formato geotiff.

O comportamento médio mensal (CMM) de chl a e TSM foi calculado para os meses estudados, de julho de 2002 até dezembro de 2007. Essa média foi calculada dentro de um SIG, que permitiu realizar operações aritméticas entre as imagens geradas, como adição, subtração, multiplicação e divisão.

A média aritmética simples foi utilizada para estabelecer o comportamento médio mensal (veja Fórmula 3.1)

$$\text{CMM} = \frac{(\text{mês 2002}) + (\text{mês 2003}) + (\text{mês 2004}) + (\text{mês 2005}) + (\text{mês 2006}) + (\text{mês 2007})}{6} \quad (3.1)$$

O coeficiente de correlação entre chl a e TSM foi calculado com o uso do sistema Giovanni (<http://Giovanni.gsfc.nasa.gov>) que gerou o mapa de coeficiente de correlação. Os dados de coeficiente de correlação são disponibilizados para

download em formato ASCII (Latitude, Longitude e coeficiente de correlação) no mesmo endereço. A fim de determinar a correlação entre as duas variáveis eram significantes ou não foi aplicado o teste t de Student, descrito por Spiegel (1993).

3.2.2 Dados de ventos superficiais

Os dados de vento gerados a partir informações coletadas pelo sensor SeaWINDS, a bordo do satélite QuikSCAT, foram adquiridos no formato GIF (Graphics Interchange Format). O arquivo GIF apresenta informações sobre magnitude e direção dos ventos superficiais. Estes dados encontram-se disponíveis no website (<http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch>).

As imagens foram dispostas em uma figura única de modo a compor a série temporal para o período estudado.

3.2.3 Dados de vazão

Os dados mensais de vazão da estação de Óbidos foram escolhidos para representar a vazão do Rio Amazonas. Eles estão disponíveis para download na página eletrônica da Agência Nacional das Águas (ANA), <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

A partir desses dados, foi gerado no programa excel, um gráfico para estabelecer a relação entre vazão e período do ano. Assim pode-se observar quais foram as épocas de picos máximos e mínimos de descarga do Amazonas.

4 RESULTADOS

4.1 CICLO SAZONAL DA CLOROFILA A (chl a)

A distribuição espacial das concentrações de clorofila *a* são apresentadas mês a mês na Figura 4.1. Pela escala de cores, a cor mais “fria” (roxo) representa as menores concentrações e, a mais “quente” (vermelho), as maiores concentrações de clorofila *a*.

Há uma nítida diferença entre as “águas costeiras” e as “águas oceânicas”. As águas localizadas próximo a costa apresentaram maiores índices de clorofila, resultantes da biomassa fitoplanctônica mais elevada, com valor máximo 2,5 mg/m³. Enquanto que as águas oceânicas exibiram valores de concentração baixos, menores que 0,08 mg/m³.

Os meses de janeiro a março são marcados por baixa produtividade primária nas águas oceânicas. Em todos os anos, uma estreita faixa com altos valores de chl *a*, restringem-se a águas costeiras. A concentração de chl *a* começa a aumentar no mês de abril, maio e junho, de cada ano, próximo ao Golfão Maranhense, passando pela foz do rio Amazonas, até a costa da Guiana Francesa, ao longo de uma faixa costeira que varia de 150 km até 300 km da linha de costa.

A partir de abril, observa-se um aumento da chl *a* na costa das guianas e da Venezuela, estendendo-se por até 700 km da linha de costa. De maio e junho, aumentam os valores de Chl *a* observando-se uma extensa faixa com alta concentração, que vai desde a foz do rio Amazonas até costa da Venezuela, com largura de aproximadamente 600 km.

No período de julho a setembro, a longa faixa com altos valores de Chl *a*, desaparece e o que se observa é a retroflexão da Corrente Norte Brasileira (CNB) em direção a leste marcada pela alta concentração de chl *a*, que atinge a latitude de 15°N.

Os meses de outubro a dezembro apresentam uma redução da produção primária ao longo da área de estudo. As altas concentrações de clorofila *a*, assim como nos três meses iniciais, voltam a ser observadas ao longo da costa.

O CMM dos dados de chl *a* são apresentados na Figura 4.2. O padrão de chl *a* para cada mês foi similar todos os anos. Isso sugere que o CM mensal de chl *a* pode representar muito bem um ciclo anual.

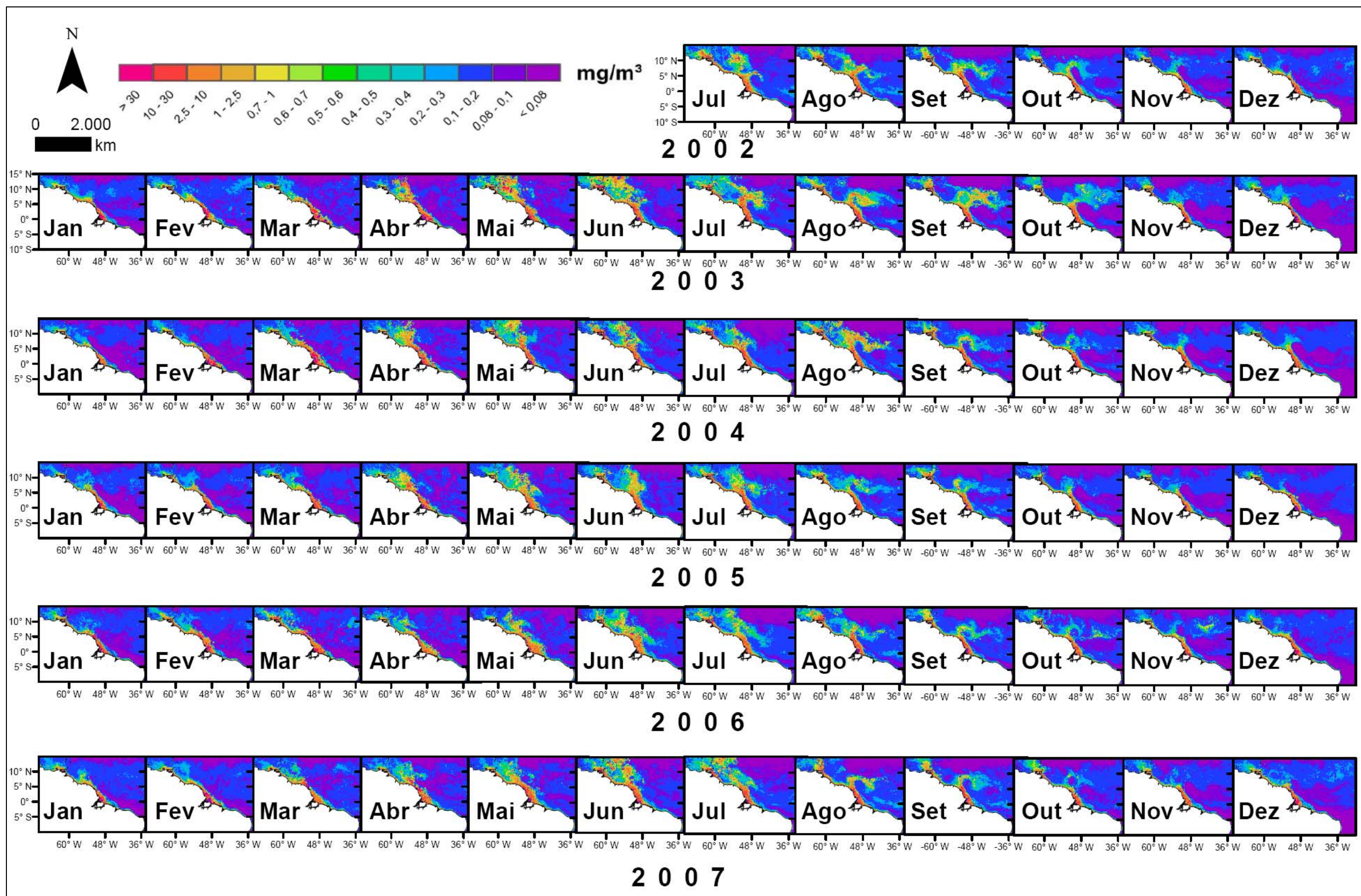


FIGURA 4.1 – Comportamento médio mensal da concentração da clorofila *a* de julho de 2002 a dezembro de 2007, utilizando dados do sensor MODIS. Fonte: <http://reason.gsfc.nasa.gov/OPS/Giovanni/ocean.aqua.shtml>.

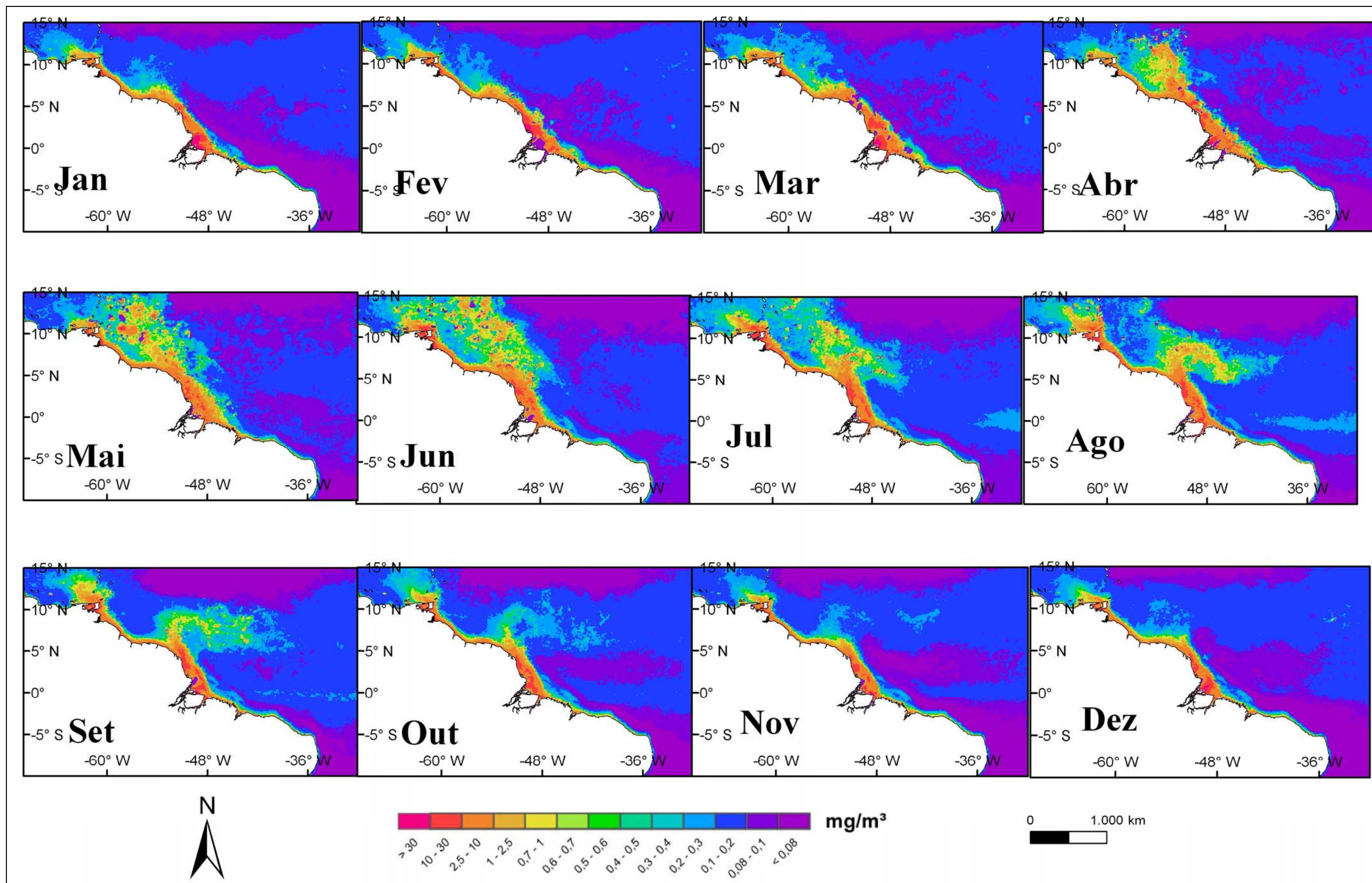


FIGURA 4.2 – Comportamento médio mensal de concentração de clorofila a, composta de cinco anos de dados mensais do sensor MODIS de Julho de 2002 até Dezembro de 2007.

4.2 RELAÇÃO TSM E VENTOS

A distribuição espacial da TSM é apresentada mês a mês na Figura 4.4. A TSM variou de 20,1° C a 31,8°C durante o período de julho de 2002 a Dezembro de 2007.

A região costeira, de maneira geral, apresentou águas mais quentes que as regiões adjacentes. Ao longo do ano, a média de TSM próxima a costa variou entre ~28°C e 30°C. A variação de TSM manteve-se nessa faixa, na região da foz do rio Amazonas, durante todo o período analisado.

Uma nítida faixa de águas mais aquecidas desloca-se com certa regularidade durante um ciclo anual. A Figura 4.3, que ilustra o CMM para o período de 5 anos de dados MODIS, mostra muito bem esse deslocamento de ciclo sazonal.

Durante os meses de janeiro, fevereiro e março, as massas de água mais aquecidas se mantêm próximo ao Equador (Figura 4.3). A direção predominante dos ventos alísios (Figura 4.5), localizados acima da latitude da linha do Equador, é de nordeste, com intensidade superior a 8 m/s. Essa intensidade é mantida até fevereiro. Em março, os alíseos de NE começam a enfraquecer, com intensidade em torno de 7 a 5 m/s.

A partir do mês de abril, a massa ligeiramente aquecida migra para o norte. A confluência dos ventos alísios também desloca-se em direção ao norte. Neste momento, os ventos alísios de SE tornam-se predominantes. Em maio, junho, julho, a confluência dos alíseos atinge as posições entre 0° e 4°N, acima de 4°N e próximo de 8°N, respectivamente. Este deslocamento é acompanhado pela faixa de TSM máxima.

Em agosto e setembro, os ventos alísios convergem na posição mais ao norte entre 5°N e 10°N, exatamente a mesma faixa ocupada por valores de TSM máximas. Em outubro, os ventos alísios de SE enfraquecem, e a convergência dos alísios desloca-se em direção ao sul. A faixa de TSM máxima também se desloca no mesmo sentido.

Os alísios de NE voltam a se intensificar no mês de dezembro. E a zona de confluência dos alísios volta a posição mais ao sul, permanecendo aí até fevereiro. Nesta posição, as águas se mostram ligeiramente aquecidas.

Nota-se que na ZCIT, a velocidade dos ventos é menor.

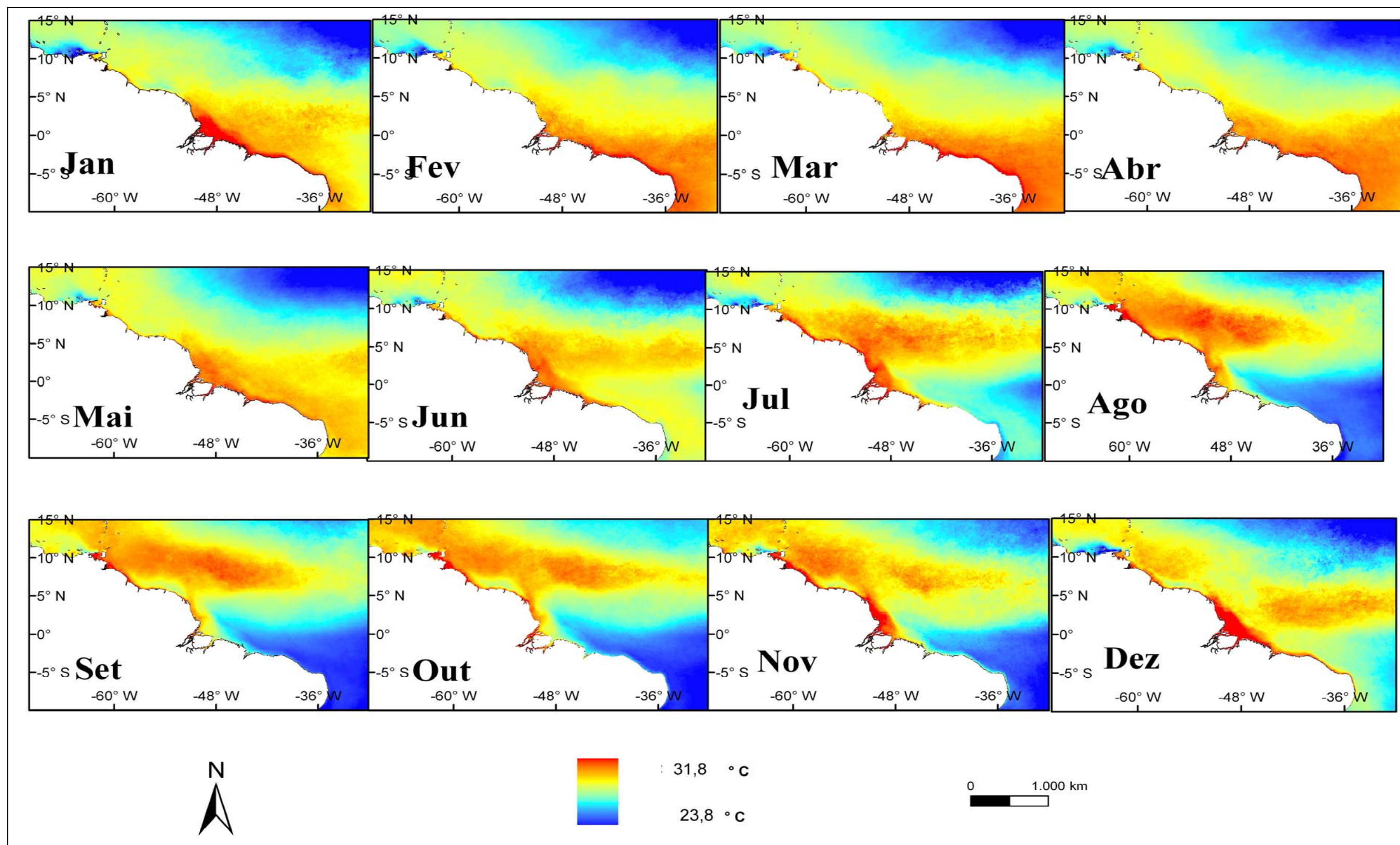


FIGURA 4.3 – Comportamento médio mensal da temperatura da superfície do mar, composta de cinco anos de dados mensais do sensor MODIS de Julho de 2002 até Dezembro de 2007.

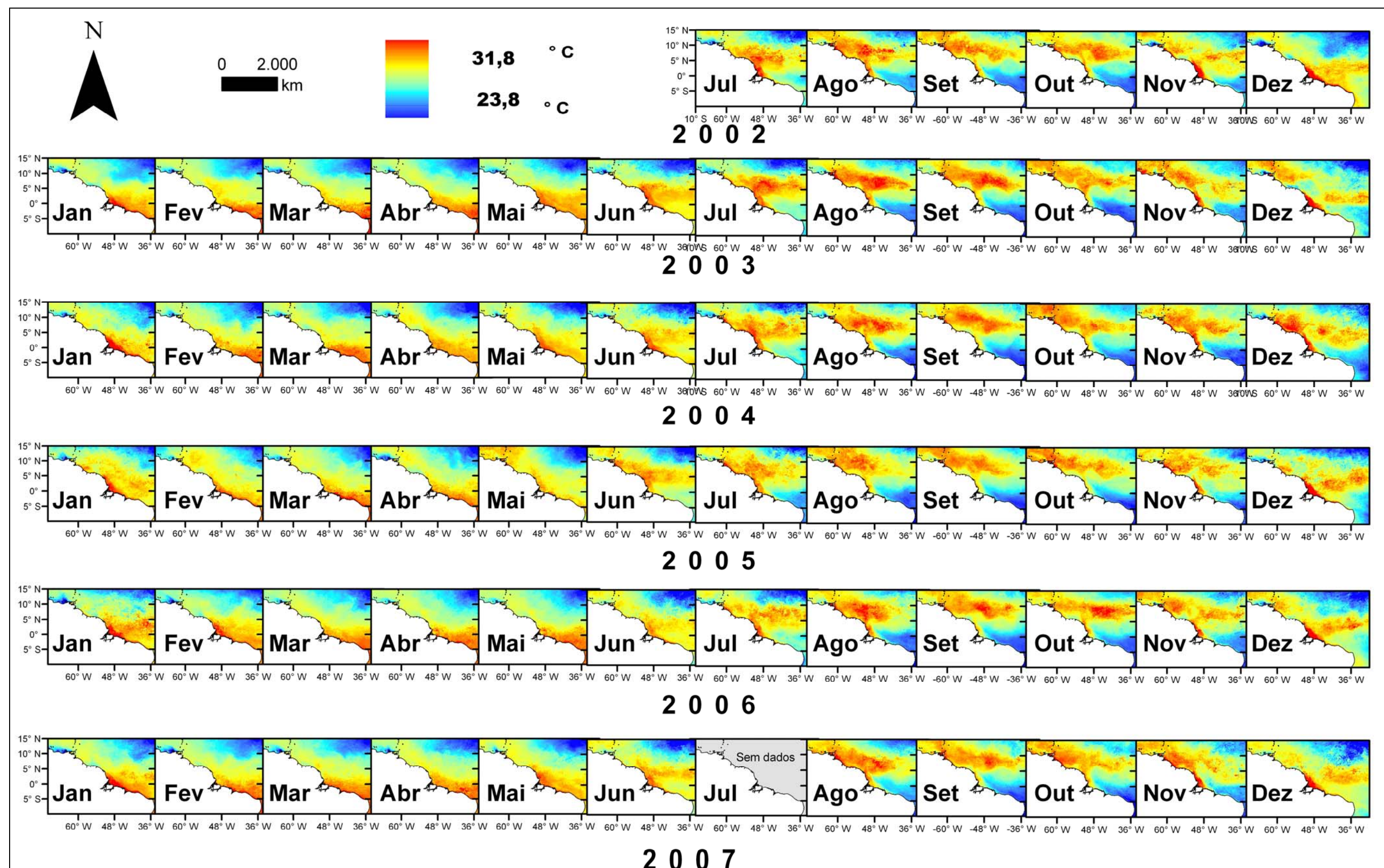


Figura 4.4 Média mensal da temperatura da superfície do mar de julho de 2002 a dezembro de 2007, utilizando dados do sensor MODIS. Fonte: <http://reason.gsfc.nasa.gov/OPS/Giovanni/ocean.aqua.shtml>.

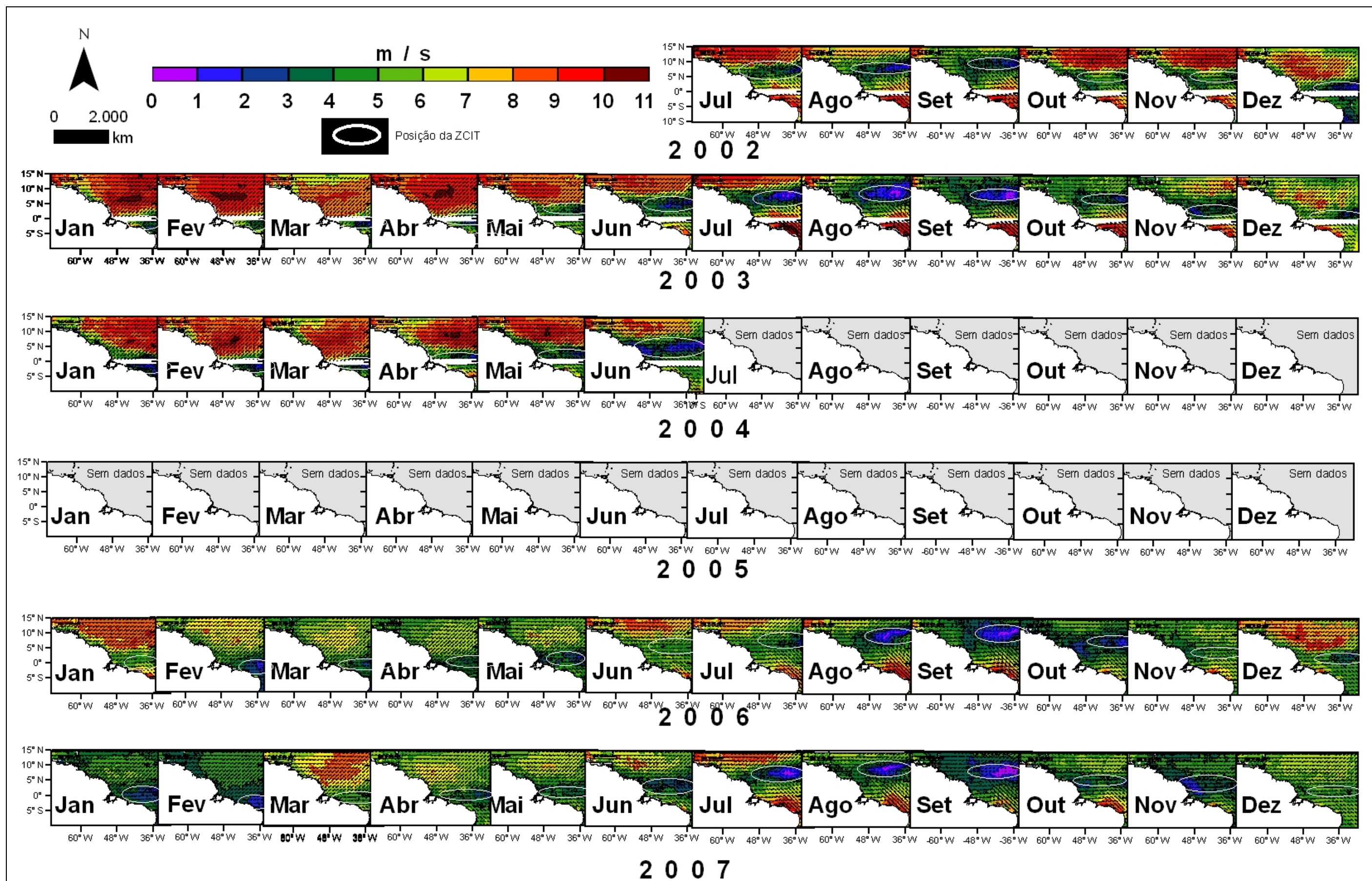


FIGURA 4.5 - Média mensal de ventos, magnitude e direção, de julho de 2002 a dezembro de 2007, utilizando dados do sensor SeaWINDS. Fonte: <http://las.pfeg.noaa.gov/oceanWatch/oceanwa>

4.3 VAZÕES DO RIO AMAZONAS

Segundo os dados disponíveis na página eletrônica da Agência Nacional das Águas (ANA), os valores de vazão, na estação de Óbidos, são apresentados na Figura 4.6.

Os picos de vazão máxima ocorreram em maio/junho com quase 250.000 m³/s, e os de descarga mínima, outubro/novembro, com valores girando em torno de 100.000 m³/s.

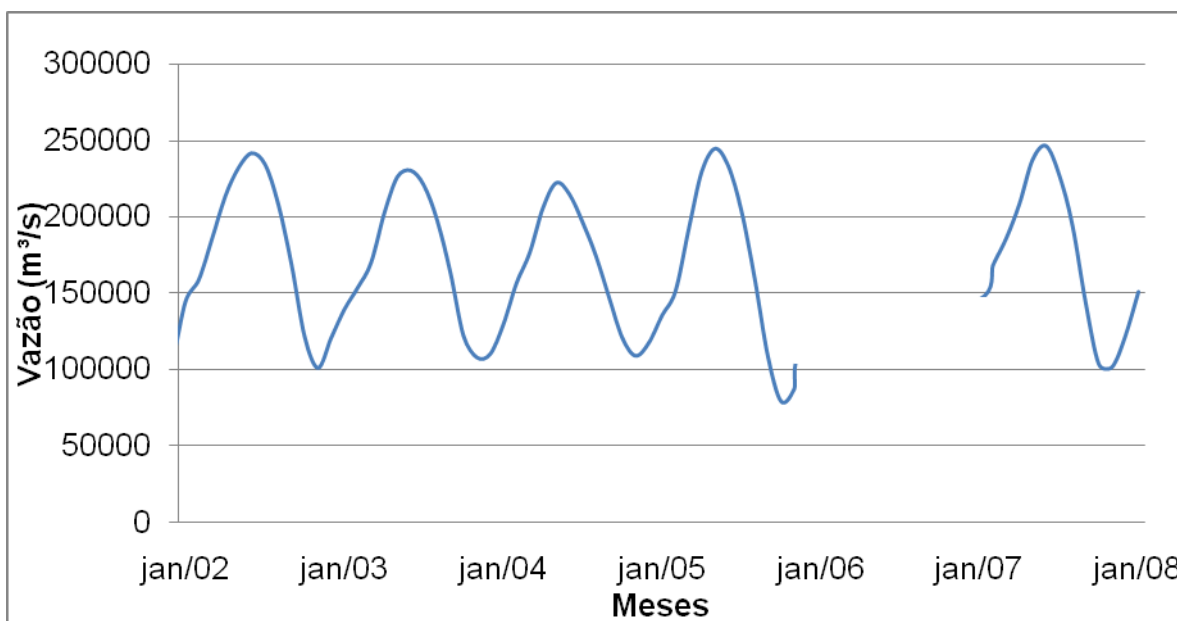


FIGURA 4.6 - Valores de vazão no Rio Amazonas, estação de Óbidos, de janeiro de 2002 até janeiro de 2008.

Fonte: Dados ANA.

4.4 RELAÇÃO ENTRE CHL A E TSM

A distribuição espacial do coeficiente de correlação temporal entre chl a e TSM, no oceano Atlântico Equatorial Ocidental, foi calculado via Giovanni, usando dados de julho de 2002 a dezembro de 2007 (Fig. 4.8 a). Correlações positivas aparecem em águas das regiões costeiras e próximas da desembocadura dos principais rios Amazonas e Orinoco.

A área destacada na Figura 4.8.a (4° N-10°N, 40°W-50° W) apresentou significativa correlação positiva (ver Figura 4.7). Essa região indica a posição da retroflexão da Corrente Norte Brasileira, onde foi detectado a formação de eddies anticiclônicos.

A série temporal mostrada na Fig. 4.8b é uma média de chl a mensal (curva vermelha) e TSM mensal (curva azul). Do início do inverno boreal (dezembro) até o final da primavera (maio), os valores médios da chl a mensais foram menores que 0,15 mg/m³. Exceto em maio de 2005, cujo valor de chl a médio atingiu a concentração de 0,25 mg/m³.

Um nítido aumento de chl a e valores máximos são atingidos de Junho a Agosto de cada ano, com uma exceção em 2003, onde o pico ocorre em setembro, com chl a 0,73 mg/m³. Ressalta-se que esse valor foi maior não só do ano de 2003, mas de todo o período de estudo. Neste ano, porém, um pico de verão não desaparece. Com menor concentração, ele acontece em julho, com chl a de 0,55 mg/m³. De maneira geral, ao longo do período de análise, os picos de chl a, a cada ano, apresentaram queda nas concentrações de clorofila a, variação de 0,73 mg/m³ (set-2003) a 0,29 mg/m³ (ago-2007).

A variação da média de chl a mensal, do verão para o inverno boreais foi sete vezes mais alta em 2003 e 2004, e cerca de três vezes superior em 2005 e 2007.

A TSM tem seu máximo valor no verão e valor mínimo no inverno, assim como a chl a. Mas diferente desta, a TSM exibe um padrão mais regular em relação à variação do verão para o inverno, que é três vezes maior para o período todo de análise. Durante o verão e início do outono, a variação de TSM foi maior cerca de 3° C de diferença contra 1° no inverno. Nos meses de Junho a Agosto, quando as águas estavam ligeiramente mais aquecidas, foi registrado elevação na chl a. Em síntese, o aumento de TSM esteve sempre associado a um aumento da chl a (ver Figura 4.8 b).

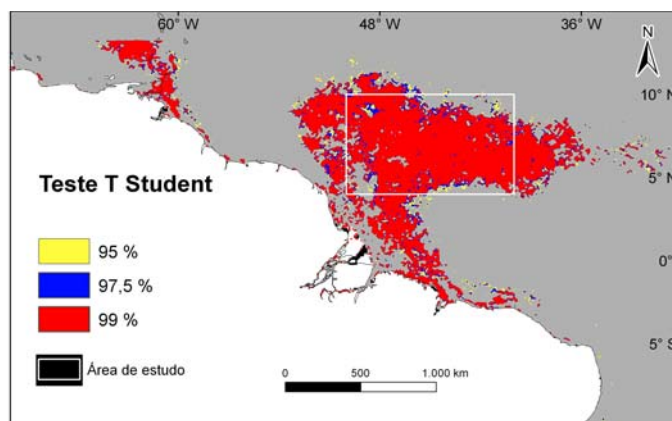


Figura 4.7 – Resultados do Teste t de Student aplicado sobre os dados de correlação entre chl a e TSM.

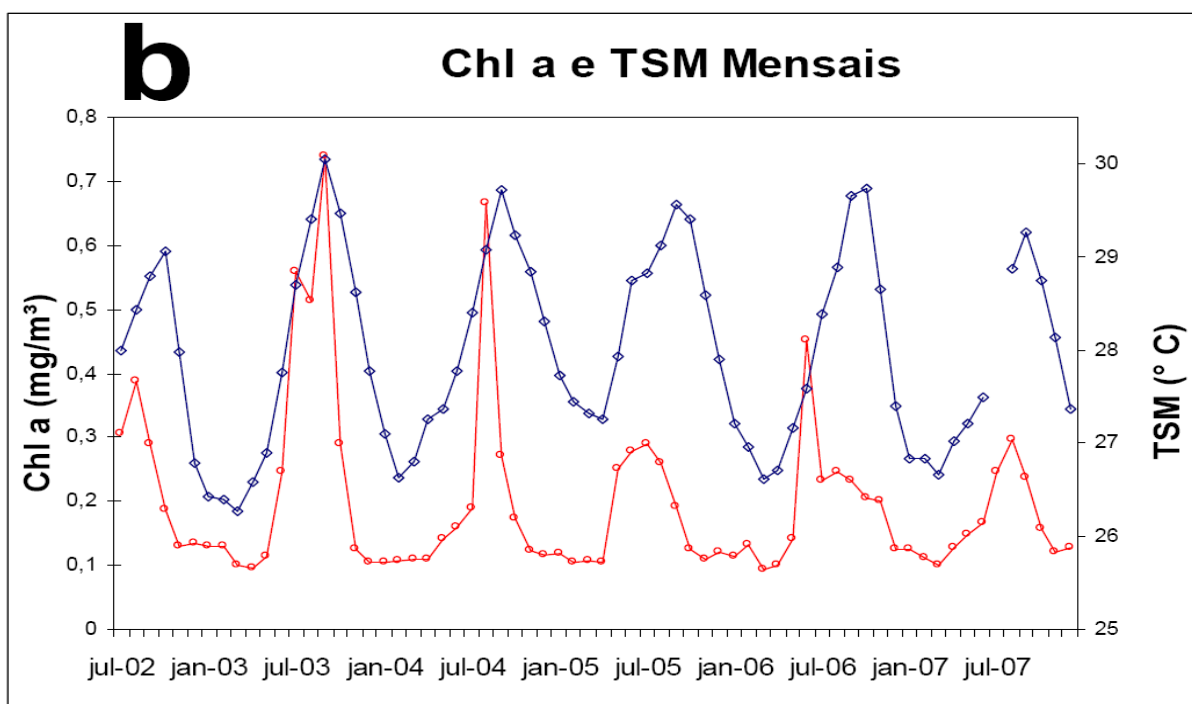
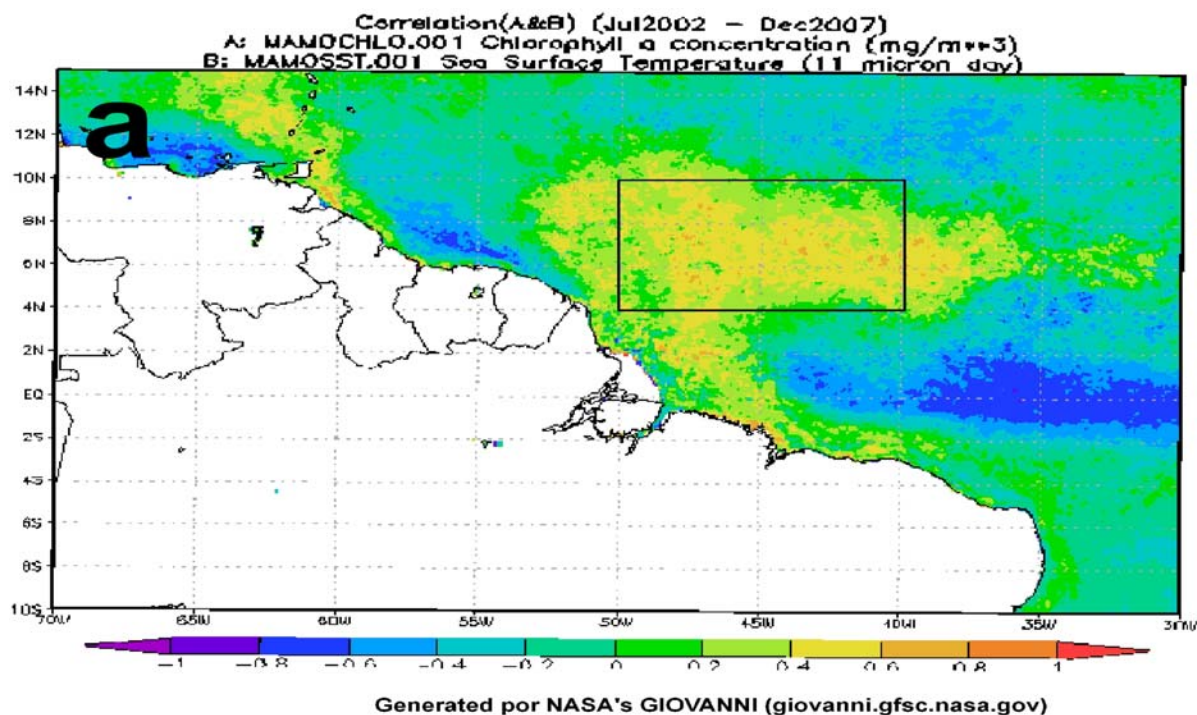


FIGURA 4.8 - (a) Distribuição espacial dos coeficientes de correlação da chl a (miligramas por metro cúbico) e TSM (graus Celsius), ambos sensor MODIS-Aqua, no oceano Atlântico Tropical ao norte América do Sul, de julho de 2002 até Dezembro de 2007. (b) Série temporal da média de chl a (curva vermelha) e TSM (curva azul) sobre área que apresentou correlação positiva (4° N-10° N, 40° W-50° W, o retângulo em (a)). O coeficiente de correlação entre TSM e Chl a é de 0,56

Fonte: (a) NASA's GIOVANNI, (<http://giovanni.gsfc.nasa.gov>) , 2008.

4.5 RELAÇÕES CHL-VAZÃO E TSM-VAZÃO

A análise a seguir refere-se à área destacada na Figura 4.8 a. Os blooms de fitoplâncton ocorreram sempre na estação seguinte (verão boreal) aos meses de maior vazão fluvial (primavera boreal). O coeficiente de correlação entre chl a e vazão foi 0,25. Os valores de TSM, por sua vez, apresentaram correlação negativa com a vazão, -0,25 (Figura 4.9).

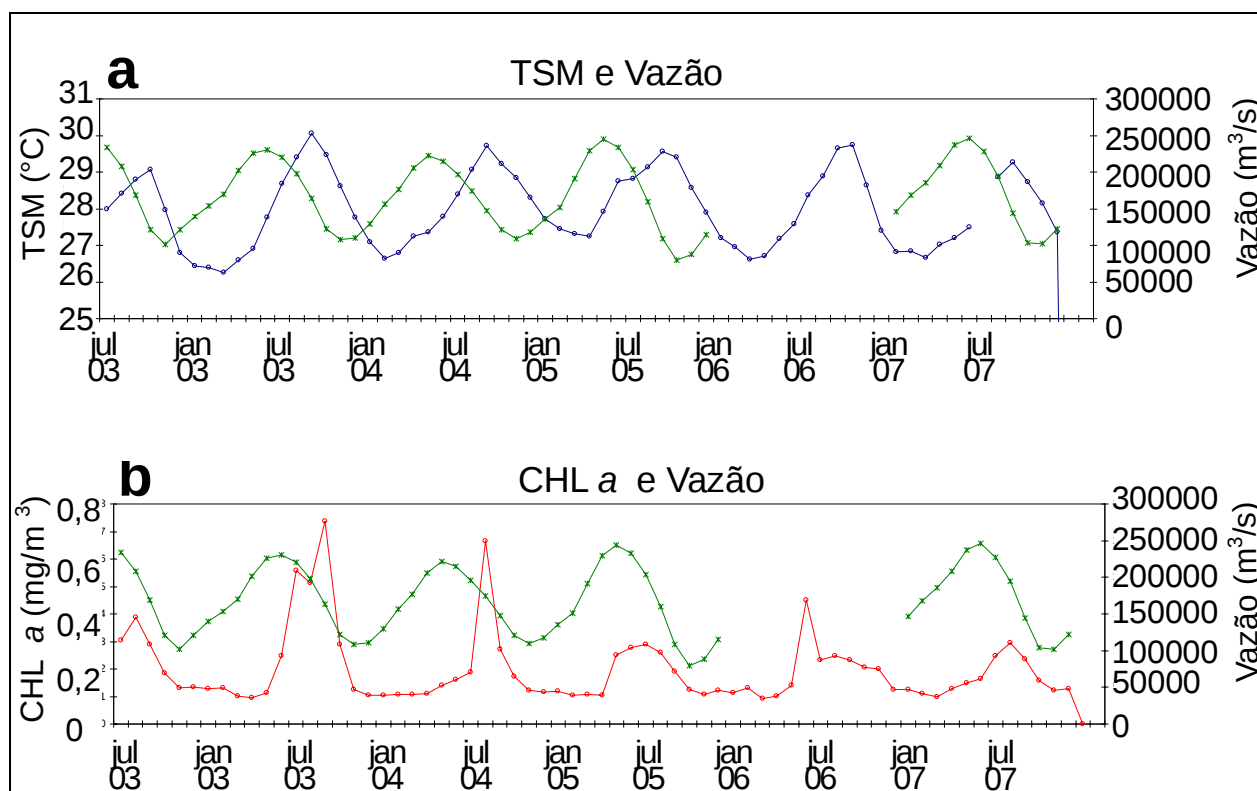


FIGURA 4.9 - (a, b) Séries temporais de TSM (curva azul) mensal, em graus Celsius, e vazão do rio Amazonas (curva verde), em metros cúbicos por segundo, e Chl a (curva vermelha), miligramas por metros cúbicos, no oceano Atlântico Tropical Oeste (4° N-10° N, 40° W-50° W), de julho de 2002 à dezembro de 2007 .

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho descreve a variabilidade da concentração de clorofila *a*, no Atlântico Equatorial Ocidental, e sua relação com outras forçantes físicas, como a temperatura da superfície do mar, descarga fluvial e ventos.

Os altos valores de Chl *a* encontrados nas adjacências das desembocaduras dos rios Amazonas e Orinoco foram semelhantes aos encontrados por Signorini *et al* (1999). Este autores alertam que os valores de chl *a* de ~10 mg/m³ obtido a partir do sensor SeaWIFS em uma área de pluma de sedimentos de origem fluvial pode ser resultado da absorção de substâncias orgânicas dissolvidas e retroespalhamento de sedimentos fluviais. Ainda assim, este dado apesar de incerto, pode ser um ótimo indicador da presença de uma pluma fluvial.

Os máximos de Chl *a*, próximo das desembocaduras, é facilmente entendido quando associados, principalmente aos períodos de maior descarga hídrica desses rios. Para o rio Amazonas, por exemplo, os meses de maio e junho, dos anos 2002 até 2007, representam os picos de maior descarga (Figura 4.9). Na estação seguinte, a Chl *a* e a extensão da pluma foi maior.

O comportamento médio mensal de chl *a*, composto por 5 anos de dados MODIS-Aqua, para a área de estudo, exibiu claramente estruturas espaciais de ciclo sazonal. O máximo de chl *a* ocorre em Maio e Junho, na costa das Guianas.

As imagens do sensor MODIS possibilitaram detectar com clareza o efeito da retroflexão da Corrente Norte Brasileira, com a ocorrência sazonal de *eddies* anticiclônicos, transportando em direção a leste águas com altas concentrações de clorofila *a*. Por essa razão, os “blooms” nesta área ocorrem sincronizados com a retroflexão da CNB e elevações na TSM (julho a setembro).

Nas imagens do sensor SeaWINDS (Figura 4.5), verifica-se que a velocidade dos ventos diminui na latitude da ZCIT. Isso foi observado por Xie (1994). A baixa velocidade tende a reduzir a superfície de evaporação, o propicia um aumento na TSM (Xie, 1994).

O que mais chama a atenção nas imagens de TSM e ventos, no ciclo de um ano, foi o grande deslocamento sazonal de uma faixa ligeiramente aquecida de TSM e da ZCIT. A variação no tempo e no espaço da ZCIT foi documentada em diversos trabalhos (Hubert *et al.*, 1969; Kraus, 1977; Mitchell e Wallace, 1992; Waliser e

Somerville, 1994). Manabe et al. (1974), Battisti e Ovens (1994) e Xie (1994), a partir de modelos oceânicos, constataram que os valores mais elevados de TSM são coincidentes com a posição aproximada da ZCIT.

A chl a e TSM apresentaram correlações positivas. O “bloom” de clorofila ocorre sempre no verão boreal, estação seguinte a de maior vazão do rio Amazonas (primavera boreal). Durante o verão boreal, observa-se também a retroflexão da CNB, assim com o posicionamento da ZCIT nas latitudes entre 5° e 10° N, que de acordo com Xie (1994) propicia o aumento na TSM. Compreender a dinâmica destes processos a partir de dados coletados no oceano passa a ser o novo desafio para se ter um melhor entendimento dos processos de interação entre oceano e atmosfera.

REFERÊNCIAS

- ACKER, J. G.; LEPTOUKH, G. "Online Analysis Enhances Use of NASA Earth Science Data", *Eos, Trans.*, v. 88, n. 2, p. 14 – 17, jan. 2007
- BATTISTI, D. S. The dynamics and thermodynamics of a warming event in a coupled tropical atmosphere-ocean model. *J. Atmos. Sci.*, v. 45, p. 2889-2919. 1988.
- BIASUTTI, M.; BATTISTI, D.S.; SARACHIK, E.S. The Annual Cycle over the Tropical Atlantic, South America, and Africa. *J. Climate*, v. 16, p. 2491–2508. 2003.
- GREGG W.; CONKRIGHT, M. E. Decadal changes in global ocean chlorophyll, *Geophys Res Lett*, 29, 1730, doi:10.1029/2002GL014689. 2002.
- GREGG, W. W. et al. Ocean primary production and climate: Global decadal changes, *Geophys. Res. Lett.*, 30(15),1809, doi:10.1029/2003GL016889, 2003.
- GRODSKY, S. A.; CARTON J. A. Intertropical Convergence Zone in the South Atlantic and the equatorial cold tongue. *Journal of Climate*. In press. 2002
- GRODSKY, S. A.; CARTON, J. A.; MCCLAIN. C. R. Variability of upwelling and chlorophyll in the equatorial Atlantic. *Revised for GRL*, December 5, 2007
- HUBERT, L. F.; KRUEGER, A. F.; WINSTON, J. S. The double intertropical convergence zone--Fact or fiction?. *J. Atmos. Sci.*, v. 26, p. 771-773. 1969.
- JPL PO.DAAC Product 109. *SeaWinds on QuikSCAT Level 3 Daily, Gridded Ocean Wind Vectors – Guide Document*. Versão 1.1 (JPL Publication D-20335), 2001. Disponível em:<<http://podaac.jpl.nasa.gov/quikscat/>>. Acesso em: mar de 2007.
- KRAUS, E. The Seasonal Excursion of the Intertropical Convergence Zone. *Mon. Wea. Rev.*, v. 105, n. 8, p. 1052–1055, ago. 1977.
- LIMEBURNER, R. et al. Lagrangian flow observations of the Amazon river discharge into the North Atlantic. *J. Geophys. Res.*, v. 100, n. C2, p. 2401-2416. 1995.

MANABE, S.; HAHN, D. G.; HOLLOWAY Jr., J. L. The seasonal variation of the tropical circulation as simulated by a global model of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, p. 43-83. 1974.

MITCHELL, T. P.; WALLACE, J. M. The annual cycle in equatorial convection and sea surface temperature, *J. Climate*, v. 5, n. 10, p. 1140-1156, out.1992.

MOLLERI, G. S. F. *Aplicação de dados de sensores remotos orbitais no estudo da variabilidade espacial e temporal da pluma do rio Amazonas no período de 2000 a 2004*. 2008. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

SIGNORINI, S. R. et al. Biological and physical signatures in the tropical and subtropical Atlantic. *J. Geophys. Res.*, v. 104, n. C8, p. 18,367-18,382, ago.1999.

SPIEGEL, M. R. Estatística – 3ª Ed.- São Paulo : Makron Books, 1993

TAKAHASHI, T., et al., Global air-sea flux of CO₂: An estimate based on measurements of sea-air pCO₂ difference, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 94, 8292– 8299, 1997.

WALISER, D. E.; SOMERVILLE, R. C. Preferred latitudes of the intertropical convergence zone. *J. Atmos. Sci.*, v. 51, n. 12, p. 1619-1639, jun.1994.

XIE, S. –P. Oceanic response to the wind forcing associated with the Intertropical Convergence Zone in the northern hemisphere. *J. Geophys. Res.*, v. 99, n. C10, p. 20,393-20,402, out. 1994.