



Imagens do AQUA-MODIS aplicadas à estimativa dos valores de clorofila-*a* e da temperatura da superfície do mar na zona offshore da Bacia Potiguar no Rio Grande do Norte

Venerando Eustáquio Amaro[#] & Anderson Targino da Silva Ferreira[#]

Recebido em 11 de dezembro de 2011 / Aceito em 24 de janeiro de 2012

Resumo

A disponibilidade quase-contínua de imagens do sensor AQUA-MODIS permitiu a estimativa de clorofila-*a* (clo-*a*) e da Temperatura de Superfície do Mar (TSM) para os anos 2009 e 2010 na região *offshore* Bacia Potiguar. O efeito dos fenômenos climáticos La Niña e El Niño em 2009 e 2010, respectivamente, foi confirmado na estação chuvosa de 2009 quando a precipitação acumulada foi acima da normal regional, influenciando o aumento de clo-*a* que alcançam valores médios de 3,6 mg/m³, com destaque para as áreas adjacentes as fozes dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu. No entanto, em 2010 nenhuma variação significativa das concentrações de clo-*a* entre as estações secas e chuvosas foi observada. A média da TSM para a região da plataforma e talude continental foi de 28°C em ambos os anos. As séries temporais de imagens do AQUA-MODIS indicaram aquecimento relativo das águas de 2009 para 2010, com uma diferença média de 0,2°C para a região da plataforma continental e de 0,3°C para a área do talude continental. A análise multitemporal das águas da plataforma continental também confirmaram concentrações elevadas de clo-*a* e valores de TSM durante a estação chuvosa devido à contribuição de águas continentais com nutrientes provenientes de zonas estuarinas. Os resultados destacam a importância de ações de monitoramento ambiental na Bacia Potiguar, como as que têm sido executadas pela PETROBRAS.

Palavras Chaves: AQUA-MODIS, clorofila-*a*, TSM, Bacia Potiguar.

Abstract

The availability of a nearly-continuous images from AQUA-MODIS sensor allowed the assessment of chlorophyll-a (Chl-a) and Sea Surface Temperature (SST) maps for 2009 and 2010 for Potiguar Basin offshore region. The effect of climatic phenomena La Niña and El Niño in 2009 and 2010, respectively, is proved in rainy season of 2009 when the amount of accumulated rainfall was above the normal regional influencing the increase of chl-a that reach the average values of 3.6 mg/m³, with emphasis on the areas adjacent to the mouths of the rivers Apodi-Mossoró and Piranhas-Açu. However in 2010 there is no significant variation of chl-a concentrations between the rainy and dry seasons. The SST for the continental shelf and shelf break average temperature was 28°C in both years. The AQUA-MODIS time series images indicated relative warming of the waters from 2009 to 2010, with an average difference of about 0.2°C for continental shelf and of 0.3°C for shelf break area. The multitemporal analysis of continental shelf waters also confirms the high chl-a concentrations and

SST values in inner shelf through rainy season due to contribution of continental water with nutrients from estuarine areas. The results highlight the importance of environmental monitoring actions in Potiguar Basin, such as those that have been performed by PETROBRAS.

Key words: AQUA-MODIS, chlorophyll-a, SST, Potiguar Basin.

Laboratório de Geoprocessamento, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário Lagoa Nova, CEP 59078-970 - Natal, RN - Brasil - Caixa-Postal: 1584; Telefone: (84) 3213212; Fax: (84) 32153807 (234). E-mail: amaro@geologia.ufrn.br; andersontargino@yahoo.com.br

1. Introdução

Um desafio aos estudos oceanográficos em tempos das mudanças climáticas globais tem sido a documentação de variações temporais e espaciais da distribuição e abundância de parâmetros físicos, químicos e de organismos marinhos em grande escala, uma vez que as campanhas oceanográficas convencionais são dispendiosas na cobertura simultânea de amplas áreas (Pattiaratchi *et al.*, 1994; Montres-Hugo *et al.*, 2008). A qualidade das águas costeiras e plataformais são altamente influenciadas pelas flutuações climáticas sazonais, regionais e globais, e pelas atividades antrópicas que cada vez mais se ampliam na zona costeira, apesar da alta sensibilidade ambiental dos ecossistemas costeiros (Lambim *et al.*, 2001; Romm, 2007; Trondalen, 2009). As principais fontes de poluição das águas oceânicas são os fertilizantes agrícolas, resíduos e dejetos orgânicos e inorgânicos, humanos e industriais, geralmente carregados pelos rios até a plataforma continental.

As imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) do satélite AQUA (lançado em Maio/2002) tem sido amplamente utilizadas na medição de parâmetros de qualidade de água, incluindo a cor da superfície do mar, fitoplâncton (clorofila-*a*), material particulado em suspensão, matéria orgânica dissolvida, turbidez e temperatura (Hu *et al.*, 2004; Miller & Mckee, 2004; Mironga, 2004; & Shi, 2008;

Muhairi *et al.*, 2009; entre outros). O sensor AQUA-MODIS tem apresentado séries temporais consistentes de dados sobre a qualidade da água devido às 36 bandas espectrais (21 bandas entre 0,4-3,0 μm e 15 bandas entre 3-14,5 μm), à cobertura global a cada 1 ou 2 dias e passagem no Equador às 13:30 hs.

As atividades da indústria petrolífera, devido as recentes ampliações na produção, refino e transporte envolvem riscos de contaminação ao ecossistema marinho decorrente, sobretudo, de derramamentos acidentais de óleo e seus derivados. Os vazamentos acidentais de óleo em zonas costeiras, como o ocorrido na Baía da Guanabara em 2000, com cerca de 1,3 milhões de litros de óleo combustível vazados, e em 2010 no Golfo do México, com uma quantia equivalente a 5,0 milhões de barris vazados são, sem dúvidas, os que mais causam preocupações, pois trazem graves consequências ambientais e socioeconômicas.

O monitoramento ambiental de ecossistemas marinhos é de extrema relevância quando em áreas de exploração petrolífera, como no caso da Bacia Potiguar, que ainda é marcada pela complexidade dos parâmetros dinâmicos ali atuantes, tais como marés, ondas, correntes, ressurgências, coluna d'água variável e rasa, com habitats específicos como, por exemplo, recifes de corais, manguezais e fundo marinho, que sustentam vários organismos de toda a teia biológica integrada, desde os planctônicos até os grandes mamíferos.

Em função da dinâmica física atuante sobre os ecossistemas marinhos, como a intensa ação de ventos, marés, ondas, correntes que atuam no transporte de sedimentos, nutrientes, poluentes e organismos pelos oceanos, os impactos dos vazamentos de óleo sobre os recursos naturais pode se estender por distâncias ilimitadas. Portanto, o reconhecimento do ambiente aquático torna-se importante quando se pretende a distinção entre as mudanças relacionadas à ação antropogênica, daquelas mudanças causadas pelas variações climáticas sazonais (Nezlin, 2000). Por este motivo, o sensoriamento remoto baseado nas imagens do sensor orbital AQUA-MODIS proporciona uma maneira sinóptica e multitemporal de obterem-se informações sobre as interações dos diversos agentes envolvidos nesse processo. A precisão das informações do AQUA-MODIS, devido à resolução espacial de 1,0 km usada, pode ser considerada baixa em primeiro momento. Contudo, através de modelos empíricos e estatísticos de validação, condicionados às medidas *in situ*, pode-se elevar significativamente o nível de precisão dessas informações.

Uma das informações mais importantes obtidas com o AQUA-MODIS é quanto à cor do oceano, caracterizada pela concentração de pigmentos vegetais (primeiramente a clorofila-*a*) na camada superficial do mar (CSM). O monitoramento de parâmetros de águas abertas para gestão de qualidade do meio ambiente marinho nas águas brasileiras ainda é limitada. O objetivo desta pesquisa foi distinguir nas imagens do AQUA-MODIS, validadas por dados de coletas simultâneas *in situ*, a variabilidade sazonal e espacial da temperatura da superfície do mar (TSM) e da concentração de clorofila-*a* em águas da plataforma e talude continental da Bacia Potiguar.

As campanhas oceanográficas de coletas desses parâmetros nos anos de 2009 e 2010 foram conduzidas pela Empresa Petróleo Brasileiro S/A

(PETROBRAS) no âmbito do Projeto de Monitoramento Ambiental Regional da Bacia Potiguar, que também financiou as análises de clorofila-*a* e o apoio técnico e operacional em todas as etapas de processamento dos dados.

2. A Plataforma e o Talude Continental da Bacia Potiguar no RN

A plataforma continental adjacente à Bacia Potiguar, margem setentrional do RN, possui largura em torno de 40-45 km com profundidades menores que 60 m e gradiente médio em torno de 1:1.000 (Fig. 1). Trata-se de uma plataforma mista composta predominantemente por sedimentos siliciclásticos, biosiliciclásticos e carbonáticos. A plataforma interna, limitada pela isóbata de 20 m é marcada pela presença de recifes algálicos e arenitos de praia (*beachrocks*) submersos (Vital *et al.*, 2008). O talude continental encontra-se inserido entre as cotas batimétricas de oceano aberto (>2000 m) e a plataforma continental (<60 m), possui uma largura média em torno de 35 km, sendo mais estreito na sua porção leste com aproximadamente 20 km de largura e mais largo na porção oeste com cerca de 50 km de largura, exibindo gradiente médio de 1:11 em alguns trechos.

Nesta porção *offshore* da Bacia Potiguar, os processos hidrodinâmicos ocorrem sob a influência dos ventos alísios de nordeste e sudeste, de velocidades médias de 6,7 cm/s e variando entre 2,6-13,4 cm/s, e pela Corrente Norte do Brasil (CNB) que se desloca no sentido de L para NO (Silva, 1991), paralela à quebra da plataforma continental com velocidades da ordem de 30-40 cm/s (Knoppers *et al.* 1999). Quanto à direção dos vetores da corrente predominante na plataforma continental, os vetores apontam para SO no estágio de maré enchente, enquanto que em marés de vazante para sentidos N-NE, como também NO, frequentemente observadas durante os períodos de

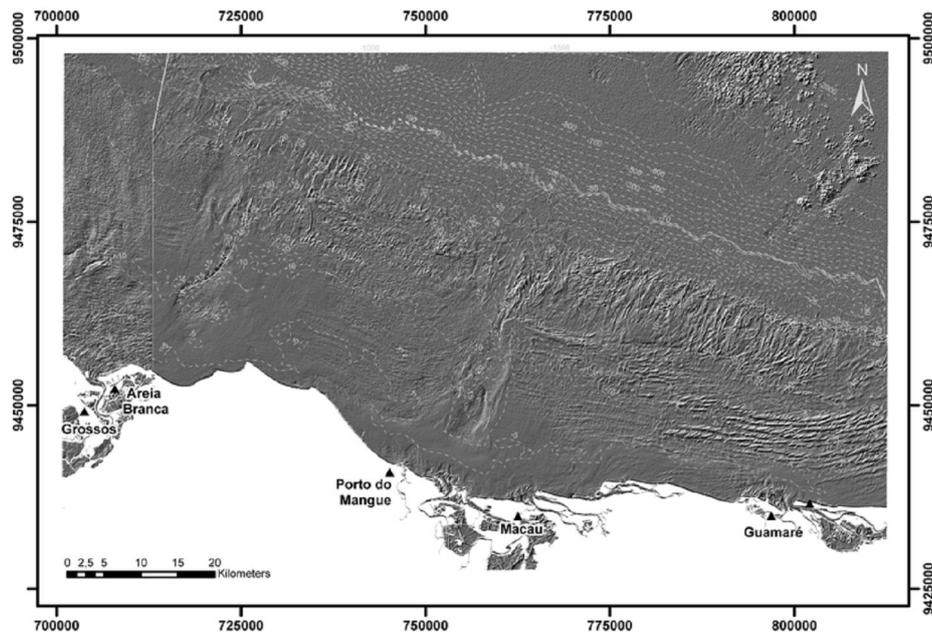


Fig 1. Mapa de localização da área de estudo na porção offshore da Bacia Potiguar no Estado do Rio Grande do Norte (plataforma e talude continental). A Foz do Estuário Apodi-Mossoró ocorre entre as cidades de Grossos e Areia Branca; a Foz do Estuário Piranhas-Açu na região das cidades de Porto do Mangue e Macau; a Foz do Estuário Galinhos-Guamaré entre as cidades homônimas.

transição Sizígia' !Quadratura e Quadratura' !Sizígia, respectivamente. Em medições realizadas próximas a quebra da plataforma continental as variações de velocidades apresentaram médias em torno de 1,84-40 cm/s.

O clima de ondas gerado através do Modelo STWAVE indicou altura média de 2,2 metros, e um valor médio para o período de onda da ordem de 7,5s (Araújo *et al.* 2004). De acordo com a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (Vellozo & Alves 2006), a região do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, encontra-se em regime de mesomaré semidiurna, com nível de maré médio da ordem de 1,3 m, nível médio de maré alta de sizígia de aproximadamente 2,8 m e a amplitude de maré de quadratura em torno de 1,3 m.

No diagrama Temperatura-Salinidade que permite a determinação das massas de água identificou-se que na área de estudo entre as profundidade de 0-70 m se encontra Água Tropical Superficial, caracterizada por valores de $\sigma-t$ (kg/m^3) inferiores a 24,500, sotoposta pela Água Central do Atlântico Sul, caracterizada por valores

de $\sigma-t$ (kg/m^3) inferiores a 24,500 kg/m^3 , sotoposta pela Água Central do Atlântico Sul, caracterizada por valores de $\sigma-t$ entre 24,500-27,125 kg/m^3 em profundidades entre 70-150 m (Stramma & Schott, 1999; Barnier et al, 2001) Água de Máxima Salinidade e temperaturas variando entre 18-26°C e salinidade próxima ou superior a 37,0 ups também foram observadas nesse mesmo intervalo (Schott *et al.*, 1998).

3. Estratégia metodológica

Sensoriamento Remoto

O satélite AQUA (lançado em 04/05/2002) é parte do programa integrado da *National Aeronautics and Space Administration - Earth Observing System* (NASA-EOS) consistindo em satélites projetados para inventários de terra, água e atmosfera. O AQUA-MODIS atua em órbita polar heliossíncrona descendente a 705 km e possui 36 bandas espectrais (comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm) com 12-bit de resolução radiométrica e resolução espacial entre 250-1.000m. *Revista de Geologia, Vol. 25 HIDROSEMA-UFRN, 2012*

As imagens do sensor AQUA-MODIS no Nível 0, que assinalam no visível os campos de CSM e no infravermelho termal a TSM, foram adquiridas diariamente entre os meses de Janeiro/2009 a Dezembro/2010 do *Ocean Biology Processing Group* (OBPG), do *Goddard Space Flight Center* (GSFC) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), pelo *website* <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

O processamento digital das imagens foi realizado no ambiente *SeaWiFS Data Analysis System* (SeaDAS, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) em sistema Linux. Os dados brutos foram calibrados para gerar valores de radiâncias normalizadas referentes à superfície marinha (cor do oceano e temperaturas de brilho). Cada imagem foi submetida a algoritmos de correção atmosférica disponíveis no SeaDAS (Gordon & Wang, 1994).

O cálculo da CSM foi baseado no algoritmo empírico *Ocean Chlorophyll 3-bands - OC3M* (O'Reilly *et al.* 2000, Equação 1). Em seguida, foram empregados algoritmos para o cálculo das concentrações de clorofila-*a* e TSM no nível regional da plataforma continental. A sequência de processamentos das imagens AQUA-MODIS foi indicada no fluxograma da Figura 2 estabelecido por Ferreira (2009).

Equação 1

$$C_a = 10.0^{(0.283 - 2.735R_{3M} + 1.457R_{2M}^2 - 0.659R_{3M}^3 - 1.403R_{3M}^4)}$$

Onde, $R_{3M} = \text{Log}_{10}(R_{\text{max}})$ e R_{max} é a razão máxima entre $R_{RS}(443)/R_{RS}(550)$ e $R_{RS}(490)/R_{RS}(550)$.

Os valores de TSM foram gerados por meio do algoritmo padrão *MODIS 11µm Non Linear Sea Surface Temperature*, com os coeficientes derivados pela Universidade de Miami, e tendo como estimativa inicial o produto de interpolação ótima de Reynolds (OISST), expressa pela Equação 2:

Equação 2

$$TSM_{\text{sea}} = C_1 + C_2 T_{31} + C_3 (T_{31} - T_{32}) T_b + C_4 (T_{31} - T_{32}) (\text{Sec}\theta - 1)$$

Medidas in situ e Validação das Imagens AQUA-MODIS

A validação das imagens foi feita pelo método dos mínimos quadrados (Equação 3, Equação 4 e Equação 5), a partir da análise por regressão linear entre os dados de clorofila-*a* obtidos *in situ* os observados pelo satélite, para a mesma localização geográfica e relação de data de imageamento/coleta (± 1 dia), de acordo com a disponibilidade de imagens e, sobretudo, devido à ausência de nuvens (Tab. 1).

Equação 3 $y = a + bx + \varepsilon$,

Equação 4

Onde,
$$b = \frac{n^* \sum (X^* Y) - (\sum X^*) (\sum Y)}{n^* \sum X^2 - (\sum X^*)^2}$$
 e

Equação 5

$$a = \frac{\sum Y - b^* (\sum X)}{n}$$

A Figura 3 mostra que dados de clorofila-*a in situ* possuem uma alta correlação com os observados pelo satélite. Da mesma forma, o coeficiente de determinação explica 74% da variação das amostras *in situ*, obtendo um erro médio quadrático (*RMS-Erro*) em torno de 0,071. A análise ANOVA (Zar, 1996), realizada entre as amostras de concentração de clorofila-*a in situ* as derivadas por satélite mostrou que é aceitável a hipótese de igualdade entre os valores das médias desses dados. Na mesma direção, o teste “t” Student controlado pelo Teste de *Levene* para igualdade de variâncias, com o intuito de verificar possíveis diferenças entre as médias das variáveis paramétricas, ressaltou que os valores de variância entre os dados *in situ* os de satélite obtiveram um

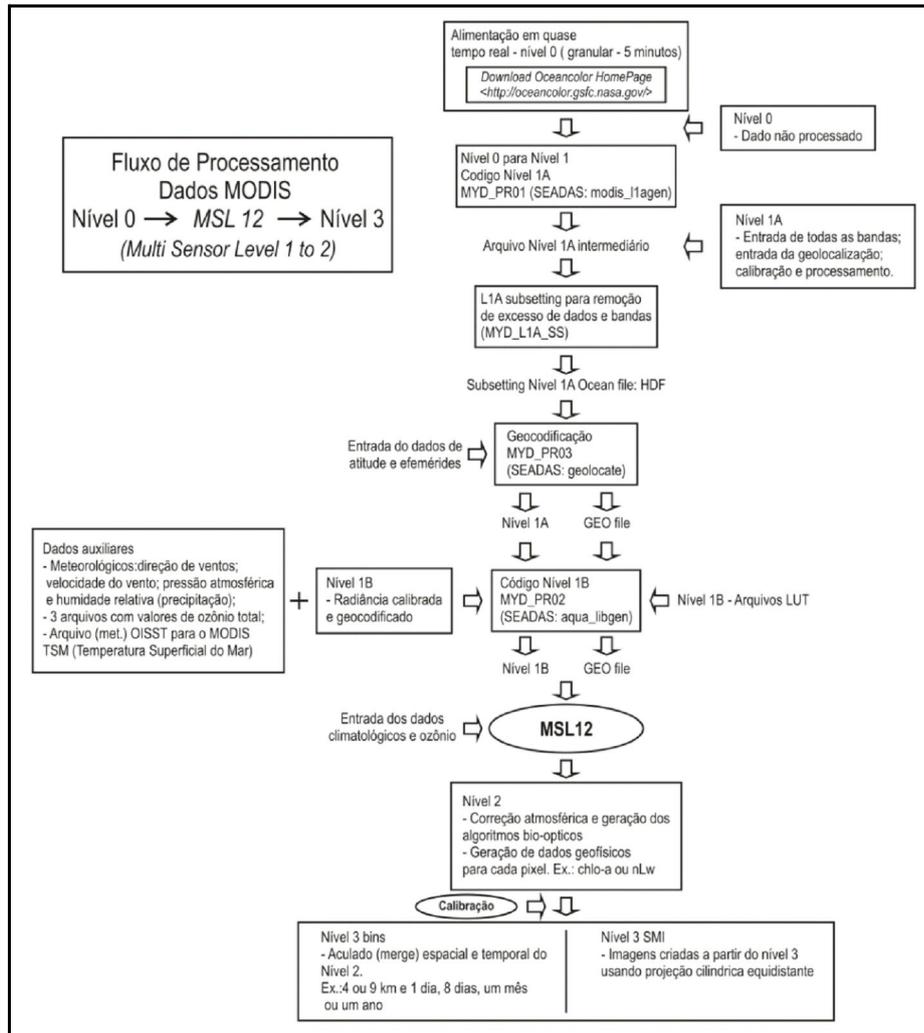


Fig. 2 - Fluxograma de processamentos aplicados às imagens do sensor MODIS do satélite AQUA (NASA-EOS), desde o ambiente SeaDAS até a calibração para o nível regional/local e elaboração das imagens de TSM e clorofila-a. Adaptado da proposta de Ferreira (2009)

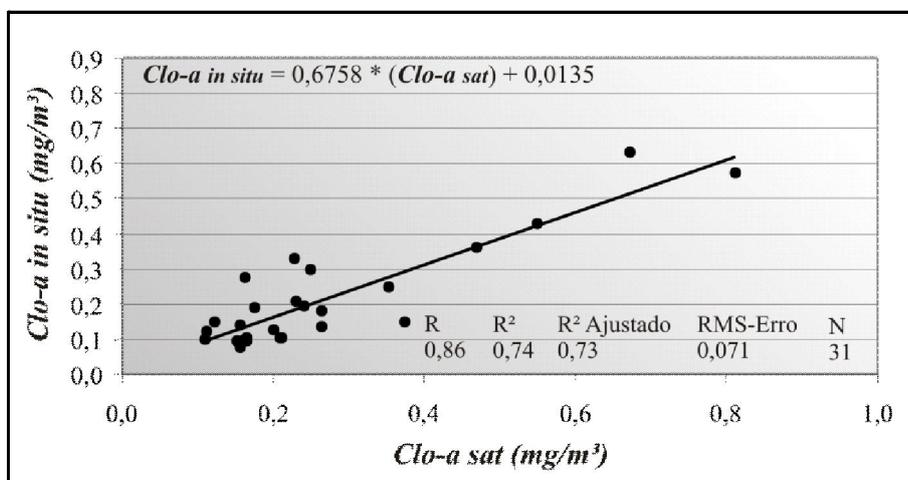


Fig. 3 - Regressão linear entre os valores de concentração de clorofila-a adquiridos in situ (Clo-a In situ) e pelo AQUA-MODIS (Clo-a Sat) para o período da campanha oceanográfica de caracterização ambiental da Bacia Potiguar no ano de 2009.

Tab. 1 - Dados de clorofila-a obtidos *in situ* (Clo-a *in situ*) e os observados pelo satélite (Clo-a Sat), para cada estação oceanográfica das campanhas de monitoramento nos anos de 2009, 2010 e 2011. Unidade: mg/m³.

Local	Estação	Data	Clo-aSat	Clo-a <i>in situ</i>
PLATAFORMA - 2009	1	25/10/2009	0,813	0,575
	2	23/10/2009	0,673	0,634
	3	27/10/2009	0,469	0,361
	4	26/10/2009	0,354	0,250
	5	25/10/2009	0,373	0,148
	6	23/10/2009	0,265	0,181
	7	27/10/2009	0,165	0,105
	8	25/10/2009	0,212	0,102
	9	25/10/2009	0,164	0,096
	10	23/10/2009	0,151	0,097
	11	23/10/2009	0,158	0,097
TALUDE - 2009	12	22/11/2009	0,113	0,120
	13	22/11/2009	0,122	0,150
	14	24/11/2009	0,110	0,100
PLATAFORMA - 2010	1	18/5/2010	0,641	0,550
	3	16/5/2010	0,488	0,229
	4	17/5/2010	0,284	0,240
	5	18/5/2010	0,307	0,230
	15	18/5/2010	0,445	0,250
	16	03/5/2010	0,416	0,163
	6	02/5/2010	0,404	0,174
	7	16/5/2010	0,198	0,264
	8	17/5/2010	0,154	0,210
	9	17/5/2010	0,167	0,202
	10	03/5/2010	0,155	0,156
11	02/5/2010	0,332	0,156	
TALUDE- 2011	17	17/05/2011	0,180	0,118
	18	17/05/2011	0,190	0,129
	19	17/05/2011	0,230	0,194
	20	17/05/2011	0,210	0,148
	21	17/05/2011	0,270	0,214

nível de significância em torno de 0,34. Admitiu-se assim, a existência de uma distribuição próxima do normal e uma igualdade entre esses dados (Fig. 4), para um nível de significância de 0,05.

4. Resultados e discussões

4.1. Imagens AQUA-MODIS dos anos de 2009 E 2010

Na imagem AQUA-MODIS para todo o ano de 2009 e para a área integrada da plataforma e talude continental (Fig. 5-A), a concentração média de clorofila-a ficou em torno de 0,84 mg/m³,

variando entre o mínimo de 0,1 mg/m³ e a concentração máxima de 5,6 mg/m³.

Para a região do talude continental, a concentração média de clorofila esteve em 0,17 mg/m³ e variando entre 0,03-2,3 mg/m³. A imagem AQUA-MODIS para o ano de 2010 (Fig. 5-B) ressaltou uma concentração média de clorofila-a em torno de 0,77 mg/m³, variando entre um mínimo de 0,07 mg/m³ e um máximo de 2,27 mg/m³ em toda a área da plataforma continental. Na região de talude continental esses valores foram de 0,11 mg/m³ em média, com uma variação de 0,03-1,05 mg/m³.

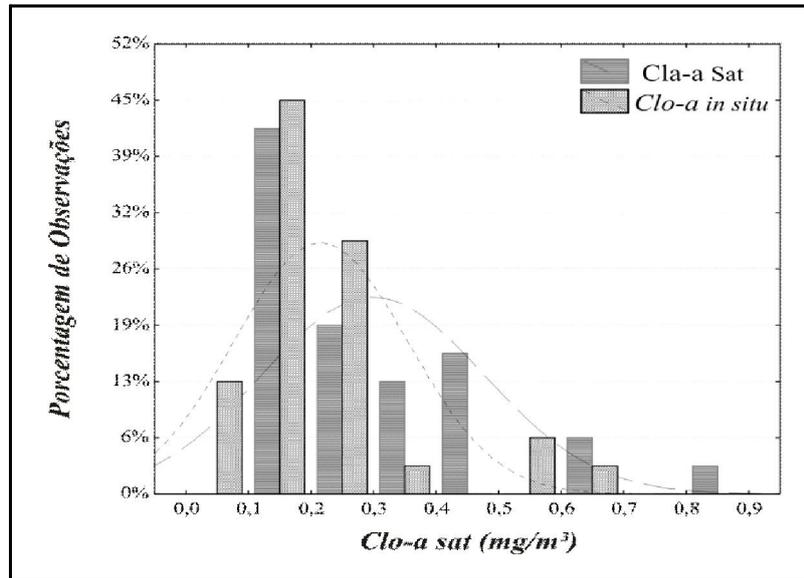


Fig. 4: - Histograma de frequências dos valores de concentração de clorofila-a in situ (Clo-a in situ) e os adquiridos pelo AQUA-MODIS (Clo-a Sat).

Tab. 2 - Valores mínimos, máximos e médios de clorofila-a para os anos de 2009 e 2010.

Ano	Plataforma Continental			Talude Continental		
	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média
2009	0,10	5,63	0,84	0,03	1,13	0,17
2010	0,07	2,27	0,77	0,03	1,05	0,11

Para a área da plataforma continental os maiores valores estiveram em torno de 0,5-1,0 mg/m³ no ano de 2009 e 0,2-0,4 mg/m³ para o ano de 2010, enquanto que para a região do talude continental as observações com maiores frequências estiveram entre 0,0-0,10 mg/m³ para ambos os anos (Fig. 4). Os valores com maior porcentagem de observações estão relacionados às áreas mais profundas e distantes da costa, ou seja, além da quebra da plataforma continental após 60 metros de profundidade. As menores porcentagens de observações, com valores de concentração mais altos, foram nas águas mais rasas da plataforma continental interna e com o aporte de águas continentais nas desembocaduras dos principais estuários.

A imagem AQUA-MODIS com a média de clorofila-a para todo o ano de 2009 sugere uma estreita relação entre a descarga dos estuários Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu com os maiores valores de clorofila-a na região (setas verdes na Fig

5-A). Para o ano de 2010, a imagem mostra que os valores de clorofila-a entre 1,2-1,9 mg/m³ (cores em tons esverdeados na Fig. 5-B) aparecem ao longo de toda a zona costeira até aproximadamente a isóbata de 10 metros. Para a região do talude continental, as imagens de 2009 e 2010 apontaram valores de clorofila-a entre 0,3-0,7 mg/m³, na área adjacente a região do Alto Estrutural de Touros (seta preta na Fig. 5-A e B). Para a plataforma continental em todo o ano de 2009 (Fig. 6-A), a imagem AQUA-MODIS indicou que a TSM média ficou em torno de 28,3°C, variando entre o mínimo de 26,8°C e um máximo de 30,5°C. Para a região do talude continental, a TSM média esteve em torno de 28°C e variando entre 26,6-30,2°C. A imagem AQUA-MODIS para o ano de 2010 (Fig. 3.4-B) ressaltou uma TSM média em torno de 28,5°C, variando entre o mínimo de 26,2°C e o máximo de 32,4°C, em toda a área da plataforma continental (Tab. 3). Para a região de talude continental esses valores foram de 28,3°C em média, com uma variação de 26,3-30,3°C (Tab. 3).

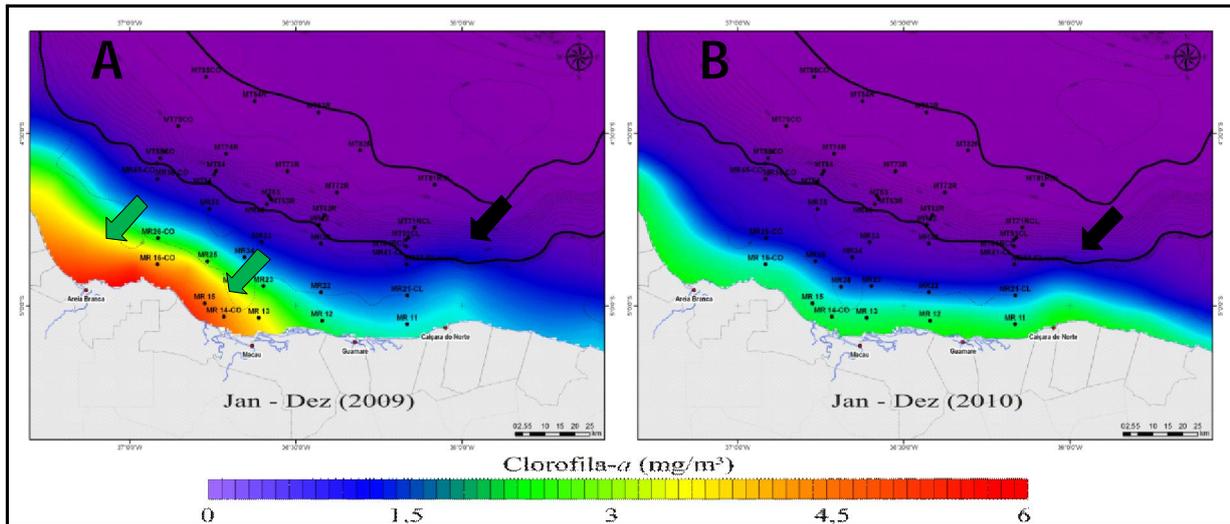


Fig. 5 - Imagem do sensor AQUA-MODIS da média diária de clorofila-a para os meses dos anos de (A) 2009 e (B) 2010. As linhas mais espessas em preto demarcam os limites do talude continental, aproximadamente entre as isóbatas de 60-2000 m. As setas indicam feições descritas no corpo do texto.

As imagens da Figura 6 (A e B) indicaram aquecimento relativo das águas de 2009 para 2010, com uma diferença média de 0,2°C para a região da plataforma continental e de 0,3°C para a área do talude continental. As mesmas imagens mostraram que águas mais frias (marcadas em tons azulados) estiveram presentes principalmente no ano de 2009, com as mais quentes (tons amarelados na Fig. 6-A) dominando o ano de 2010.

Valores de TSM de 28,25°C aparecem acompanhando o alinhamento da quebra da plataforma continental por cerca de 40 km em direção a oeste, a partir da estação marcada seta preta na Figura 6-A. As temperaturas médias de 29°C aparecem em cores de tons avermelhados na Figura 6-B, provavelmente influenciadas pela pluma de sedimentos despejadas pelos estuários Apodi-Mossoró, Piranhas-Açu e de Galinhos (setas azul, verde e rosa, respectivamente, na Fig. 6-B).

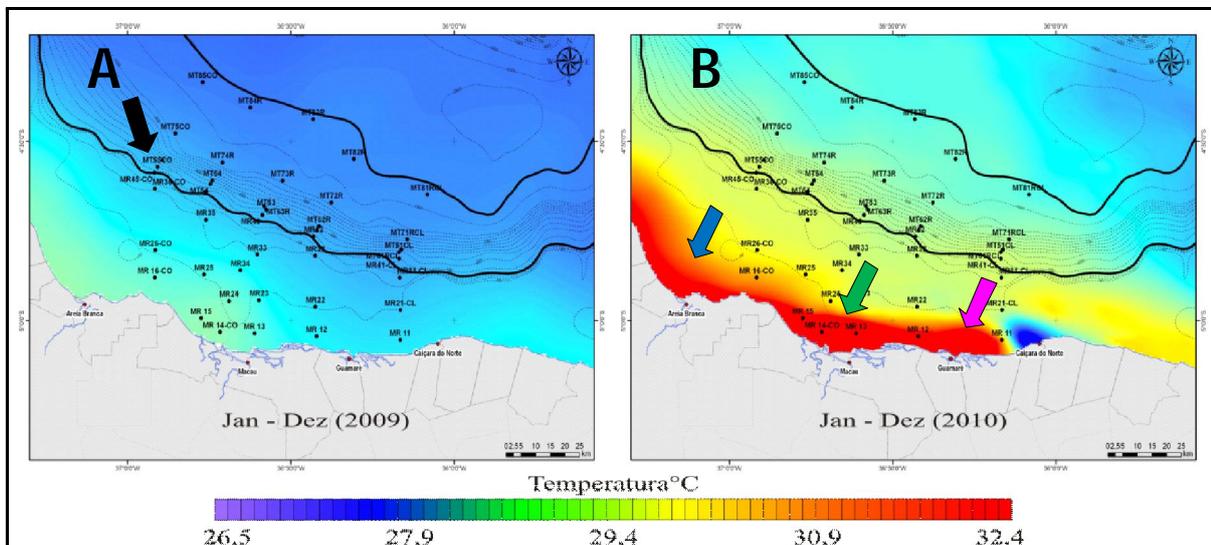


Fig. 6 - Imagem do sensor AQUA-MODIS da média diária de TSM para todos os anos de (A) 2009 e (B) 2010. As linhas mais espessas em preto demarcam os limites do talude continental, aproximadamente entre as isóbatas de 60-2000 m. As setas coloridas indicam feições descritas no corpo do texto.

Tab. 3 - Valores mínimos, máximos e médios de TSM para os anos de 2009 e 2010.

Valores de TSM (°C)						
Ano	Plataforma Continental			Talude Continental		
	Mín.	Máx.	Média	Mín.	Máx.	Média
2009	26,8	30,5	28,3	26,6	30,2	28,0
2010	26,2	32,4	28,5	26,3	30,3	28,3

4.2. Imagens AQUA-MODIS das médias sazonais e manesais 2009 e 2010.

A Figura 7-A indica que as chuvas para o ano de 2009 acompanharam a normal climatológica, medida para a região desde 1961-1990 na Estação Meteorológica de Macau/RN. No mesmo diagrama é possível evidenciar, nas barras verticais, que as chuvas acumuladas mensais se restringiram ao período entre janeiro - agosto (período chuvoso) com destaque para os meses de abril e maio, enquanto de setembro - dezembro há estiagem (período seco). Para o ano de 2010 o mês de abril foi o único mês representativamente chuvoso para a região (Fig. 7-B).

Destaca-se que as chuvas acumuladas da Figura 7 (A e B) correlacionam-se com as anomalias de TSM no Oceano Pacífico Central em 2009 e 2010, responsáveis pelo surgimento de fenômenos climáticos El Niño e La Niña (Fig. 8).

Quando anomalias negativas da TSM, denominadas de La Niña (seta branca na Fig. 8) são observadas nessa porção do Oceano Pacífico, ocorre um aumento da precipitação e da vazão dos rios na região Nordeste do Brasil, fato esse constatado em 2009 pela quantidade de chuva acumulada acima da normal regional (Fig. 7-A). Ao contrário disso, o aumento das anomalias de TSM (seta preta na Fig. 8) provoca escassez de chuvas na região Nordeste do Brasil. O efeito desses fenômenos climáticos na área de estudo entre 2009 e 2010 se apresentou por meio de uma diferença média de clorofila-*a* entre os períodos chuvoso e seco de 2009 em torno de $-0,31 \text{ mg/m}^3$ e $-0,05 \text{ mg/m}^3$ para as áreas de plataforma e talude continental, respectivamente (Tab. 4). Para 2010 os valores alcançaram uma diferença pouco significativa de $0,01 \text{ mg/m}^3$ e $-0,02 \text{ mg/m}^3$ para os mesmos setores (Tab. 4).

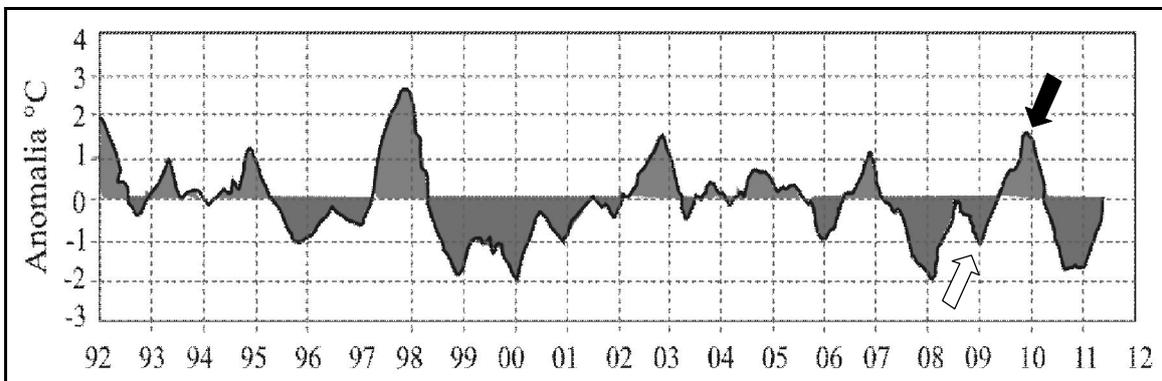


Fig. 8 - Evolução da anomalia de TSM desde 1992 na região central do Oceano Pacífico, que define o fenômeno La Niña em 2009 (seta branca) e El Niño em 2010 (seta preta). Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2012).

Nas imagens AQUA-MODIS das Figuras 9-A foi possível constatar que as chuvas influenciaram no aumento de clorofila-*a* durante a

estação chuvosa de 2009, principalmente na região adjacente as fozes dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu (setas preta e azul, respectivamente

na imagem da Fig. 9-A) onde os valores médios de clorofila foram de 3,6 mg/m³. A Figura 9-B para a estação seca mostra uma queda de cerca de 50% nos valores de clorofila-*a* nessa mesma região da plataforma continental, com valores médios em torno de 1,8 mg/m³ na área próxima ao estuário do rio Mossoró (seta vermelha nas Figs. 9-B). As imagens da Figura 9-C e 9-D mostraram que entre as estações chuvosa (Fig. 9-C) e seca (Fig. 9-D) do ano 2010, a pluma de clorofila-*a* (cores em tons de verde) segue um padrão semelhante em ambas as estações margeando a zona costeira até aproximadamente a isóbata de 5 metros no período chuvoso (Fig. 9-C) e até a isóbata de 10 metros no período seco (Fig. 9-D). No período sem chuvas do ano de 2010 as áreas com maiores concentrações de clorofila-*a*, cerca de 1,24-1,27 mg/m³, estão localizadas próximo a foz do rio Apodi-Mossoró, estuários de Galinhos e na área próximo a Caiçara do Norte (setas verde, amarela e laranja respectivamente na Fig. 9-D).

No que se refere à TSM observou-se um aumento de cerca de 0,7°C e < 0,5°C, respectivamente, nas áreas da plataforma e do talude

continental nos períodos chuvosos e secos de 2010 (Fig. 10 D e E), respectivamente, em relação ao ano de 2009 (Fig. 10 A e B). A diferença média entre o período chuvoso e seco de 2009 (Tab. 4) foi de cerca de -1°C para as áreas de plataforma e talude continental, enquanto que em 2010 esses valores alcançaram cerca de -1,9°C de diferença entre essas duas estações (Tab. 4). Áreas como as fozes dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu estiveram mais quentes durante o ano de 2009, com temperaturas variando em torno de 29°C na época chuvosa e de 28°C no período seco (setas preta e vermelha, respectivamente na imagem da Fig. 10-A e B).

Provavelmente essas temperaturas tenham sido influenciadas pelos sedimentos carreados durante esse ano. Enquanto que na região do talude, essas temperaturas estiveram em torno de 28°C e 27°C respectivamente nos períodos chuvoso e seco de 2009.

Para o ano de 2010, o período chuvoso apresentou as maiores temperaturas em relação ao ano de 2009, com um aumento de cerca de 2,0°C nas áreas de plataforma e talude continental.

Tab. 4 - Diferença entre o período seco-chuvoso dos anos 2009 e 2010 para os valores médios de Clorofila-*a* e TSM na plataforma e talude continental.

ANOS	2009		2010	
LOCAIS	Plataforma Continental	Talude Continental	Plataforma Continental	Talude Continental
Clorofila- <i>a</i> (mg/m ³)	-0,31	-0,05	0,01	-0,02
TSM (°C)	-0,96	-1,11	-1,90	-1,92

As áreas adjacentes aos canais de maré entre Macau e Diogo Lopes (seta azul na Fig. 10-C e 10-D) apresentaram as maiores temperaturas em ambos os períodos, com 29,3°C na estação chuvosa e 27,4°C na estação seca.

3. Conclusões

A partir da análise comparativa das imagens multitemporais AQUA-MODIS para clorofila-*a* e

a TSM na região *offshore* da Bacia Potiguar foi possível observar que, de modo geral, no decorrer dos anos de 2009 e 2010, a concentração média de clorofila-*a* ficou em torno de 0,8 mg/m³ na área de plataforma e 0,07 na região de talude continental variando entre 0,02 mg/m³ (dezembro/2009) e 5,6 mg/m³ (junho/2009). Os valores de concentração mais elevados de clorofila-*a* ocorrem nas águas mais rasas da plataforma continental interna, até

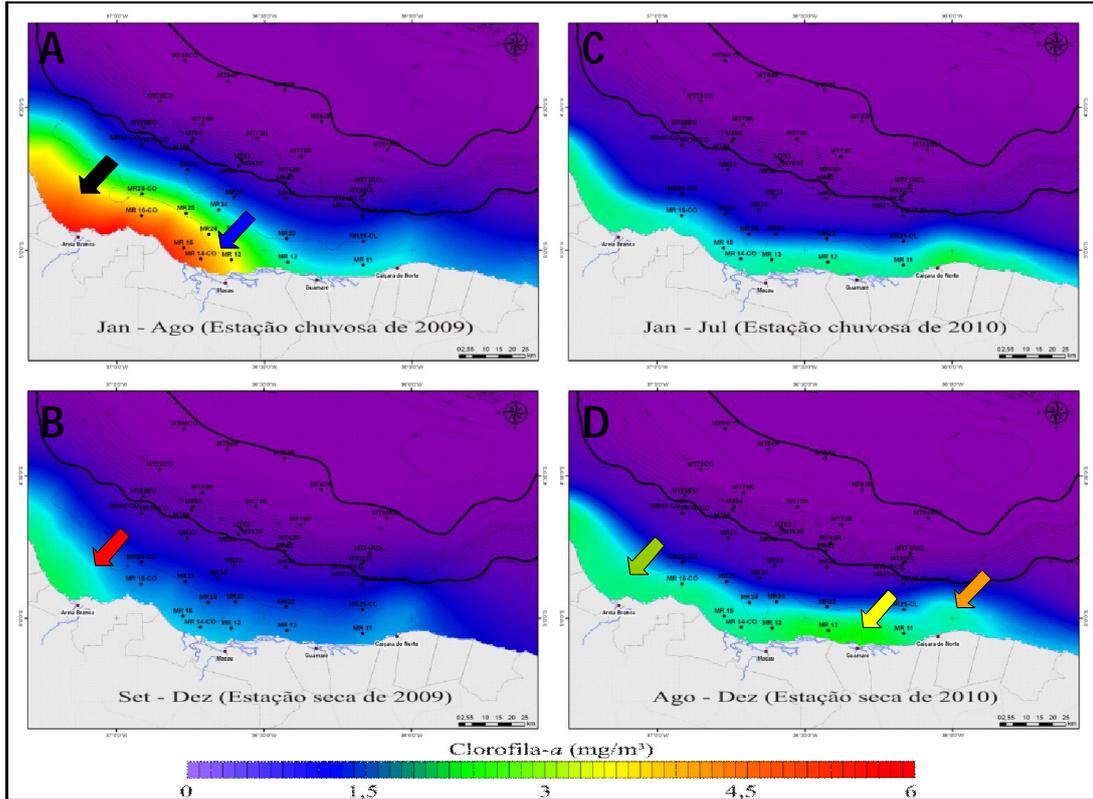


Fig. 9 - Imagens AQUA-MODIS com os valores médios entre os períodos (A) chuvoso e (B) seco de 2009, e (C) chuvoso e (D) seco de 2010 para a clorofila-a para a toda a área da plataforma continental (isóbatas de 0-60 m) e área do talude continental (isóbatas de 60-2000 m).

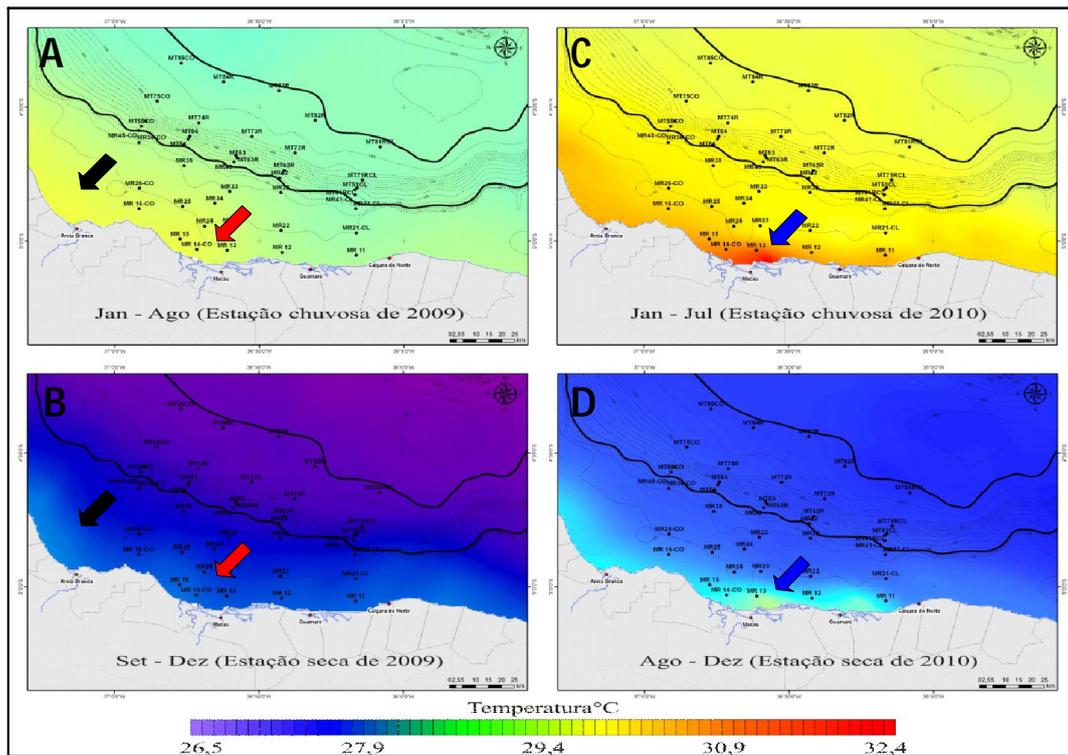


Fig. 10 - Imagens AQUA-MODIS com os valores médios entre os períodos (A) chuvoso e (B) seco de 2009, e (C) chuvoso e (D) seco de 2010 para os parâmetros de temperatura da superfície do mar (TSM) para a toda a área da plataforma continental (isóbatas de 0-60 m) e área do talude continental (isóbatas de 60-2000 m).

aproximadamente a isóbata de 10 metros, devido ao aporte de águas com nutrientes continentais nas desembocaduras dos principais estuários.

O efeito da atuação dos fenômenos climáticos La Niña em 2009 e El Niño em 2010 se mostrou claramente na estação chuvosa de 2009, quando a quantidade de chuva acumulada foi acima da normal regional influenciando o aumento de clorofila - onde os valores médios de clorofila foram de 3,6 mg/m³, com destaque para os setores adjacentes às fozes dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu. Em 2010 não houve variação significativa das concentrações de clorofila - entre os períodos seco e chuvoso.

Para a TSM observou-se que, tanto para a região da plataforma continental quanto para o talude, a média da temperatura esteve em torno de 28°C em ambos os anos. As imagens do AQUA-MODIS indicaram aquecimento relativo das águas de 2009 para 2010, com uma diferença média de 0,2°C para a região da plataforma continental e de 0,3°C para a área do talude continental. A maior temperatura ocorreu em março de 2010 com valor de 30,3°C, enquanto valores de TSM mais baixos foram no mês de agosto de 2010 com 26,2°C. Para ambos os anos, as temperaturas médias mais elevadas ocorrem nos trechos influenciados pelas águas continentais carreando plumas de sedimentos despejadas pelos estuários Apodi-Mossoró, Piranhas-Açu e de Galinhos-Guamaré na plataforma continental.

As diferenças sazonais mais marcantes entre esses parâmetros mostraram que do período chuvoso de 2009 (janeiro-agosto) para o período seco (setembro-dezembro) a clorofila - teve uma redução média de cerca de -0,31 mg/m³ para toda a área da plataforma continental, enquanto no talude essa diferença foi de cerca de -0,05 mg/m³. Para o ano de 2010, essas diferenças sazonais mostraram que do período chuvoso de 2010 (janeiro-julho) para o período seco (agosto-dezembro) a clorofila

- teve um acréscimo médio de cerca de 0,01 mg/m³ para toda a área da plataforma continental, enquanto no talude essa diferença foi quase insignificante, cerca de -0,02 mg/m³. Para a TSM a diferença média entre o período chuvoso e seco de 2009 foi de cerca de -1°C para as áreas de plataforma e talude continental, enquanto que em 2010 a diferença entre essas duas estações alcançaram cerca de -2,0°C. O período chuvoso de 2010 apresentou as maiores temperaturas em relação ao ano de 2009, com um aumento de cerca de 2,0°C nas áreas de plataforma e talude continental, enquanto as áreas adjacentes aos canais de maré entre Macau e Diogo Lopes apresentaram as maiores temperaturas em ambos os períodos, com 29,3°C na estação chuvosa e 27,4°C na estação seca.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio técnico e financeiro do Projeto Monitoramento Ambiental Regional da Bacia Potiguar (PETROBRAS) e da REDE 05 PETROMAR, através dos Projetos Cooperativos HIDROSEMA e MOLECO. Ao apoio operacional das equipes do laboratório GEOPRO/UFRN e do laboratório GGMMA/UFRN ambos do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da UFRN (PPGG/UFRN). Em especial Márcia de França Rocha e Mirim Cunha do Nascimento (PETROBRAS/UO-UN-CE) pelo suporte a publicação

Referências Bibliográficas

- Araújo, M.; Vital, H.; Amaro, V.E.; Silva, M.A. 2004. Caracterização das forçantes hidrodinâmicas - Correntes, ondas e marés - na região costeira de Guamaré-RN: Proceedings of the Second Workshop PETRORISCO, Belém-Brasil.
- Barnier, B.; Reynaud, T.; Beckmann, A.; Böning, C.; Molines, J.-M.; Barnard, S. & Gjia, Y. 2001. On the seasonal variability and eddies in North Brazil Current: insights from model intercomparison experiments. Progress in Oceanography, 48:195-230.

- Dall'Olmo, G.; Gitelson, A. A.; Rundquist, D. C.; Leavitt, B.; Barrowb, T.; Holz, J. C. 2005. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 96:176-187.
- Ferreira, A.T.S. 2009. Geoprocessamento de dados meteorológico-oceanográficos (cor do oceano e temperatura da superfície do mar) aplicado ao monitoramento ambiental na costa setentrional do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado, PPGG, UFRN, Natal/RN, 105p.
- Gordon, H.R.; Wang, M. 1994. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical Thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Applied Optics*, 33:443-452.
- Hu, C.; Chen, Z.; Clayton, T. D.; Swarzenski, P.; Brock J. C.; Muller-Karger, F. E. 2004. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 93(3):423-441.
- INMET. 2012. Instituto Nacional de Meteorologia. Observações. Chuva acumulada para 2009 e 2010. Consulta técnica ao INMET. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sim/>. Acesso em Jan. 2012.
- Kiage, L.M.; Walker, N.D. 2008. Using NDVI from MODIS to Monitor Duckweed Bloom in Lake Maracaibo, Venezuela. *Water Resource Management*, 23:1125-1135.
- Knoppers, B.; Ekau, W.; Figueiredo, A.G., 1999. The coast and Shelf of east and northeast Brazil and material transport. *Geo-Marine Letters*, 19(3):171-178.
- Lambin, E.F.; Turner, B.L.; Geist, H.J.; Agbola S.B.; Angelsen, A.; Bruce, J.W.; Coomes O.T.; Dirzo, R.; Fischer, G.; Folke, C.; George, P.S.; Homewood, K.; Imbernon, J.; Leemans, R.; Li, X.; Moran, E.F.; Mortimore, M.; Ramakrishnan, P.S.; Richards, J.F.; Skanes, H.; Steffen, W.; Stone, G.D.; Svedin, U.; Veldkamp, T.A.; Vogel, C.; Xu, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11: 261-269.
- Miller, R. L.; Mckee, B. A. 2004. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 93:259-266.
- Mironga, J.M. 2004. Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing in the management of shallow tropical lakes. *Applied Ecology and Environment Research*, 2:83-103.
- Montres-Hugo, M.A.; Vernet, M.; Smith, R.; Carders, K. 2008. Phytoplankton Size-Structure on the Western Shelf of the Antarctic Peninsula: A Remote Sensing Approach, *International Journal of Remote Sensing*, 29(3-4): 801-829.
- Muhairi, A.A.; Ghedira, H. Al-Ahmad, H.; Ali Dawood, A.; Al-Mualla. M. 2009. Exploring the potential of MODIS visible and thermal channels in monitoring and assessing the impact of desalination plant discharges in the Arabian Gulf. *IEEE, IGARSS III*:357-360.
- Nezlin, N. P. Remote-sensing studies of seasonal variations of surface chlorophyll-*a* concentration in the Black Sea. In *Satellites, Oceanography and Society*. Edited by David Halpern, Elsevier Oceanography Series, 63, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, USA, 257-271.
- NOAA. 2012. *National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA Operational El Niño / Southern Oscillation (ENSO) Observing System*. Disponível em: http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino/noaa/enso.html. Acesso em Jan. 2012.
- O'Reilly, J. E.; Maritorena, S.; Siegel, D. A.; O'brien, M. C.; Toole, D.; Mitchell, B. G.; Kahru, M.; Chavez, F. P.; Strutton, P.; Cota, G. F.; Hooker, S. B.; Mcclain, C. R.; Carder, K. L.; Müller-Karger, F.; Harding, L.; Magnuson, A.; Phinney, D.; Moore, G. F.; Aiken, J.; Arrigo, K. R.; Letelier, R.; Culver, M. 2000. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: Hooker, S. B.; Firestone, E. R., eds., *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3*, NASA Technical Memorandum, v. 11: Greenbelt, NASA Goddard Space Center, p. 9 – 27.
- Papastergiadou, E.S.; Retalis, A.; Apostolakis, A.; Georgiadis, Th. 2008. Environmental monitoring of spatio-temporal changes using remote sensing and GIS in a Mediterranean Wetland of Northern Greece. *Water Resource Management*, 22:579-594.
- Pattiaratchi, C.; Lavery, P.; Wyllie, A; Hick, P. 1994. Estimates of water quality in coastal waters using multi date Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 1571-1584.
- Romm, J. 2007. *Hell and High Waters – Global Warning – The Solutions and the Politics and What We Should Do*. New York, William Morrow.
- Schott, F.A.; Stramma, L.; Fischer, J. 1998. Transports and pathways of the upper layer circulation in the western tropical Atlantic. *Journal Physical Oceanography*, 28:1904-1928.
- Silva, C.G. 1991. Holocene stratigraphy and evolution of the Açu River Delta, Rio Grande do Norte State, Northeastern Brazil. Duke University, United States, Doctor Philosophy Theses, 359p.
- Stramma, L.; Schott, F.A. 1999. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research II*, 46:279-303.
- Trondalen, M. 2009. Climate Changes, Water Security and Possible Remedies for the Middle East. The United Nations World Water Assessment Programme, UNESCO, Paris, Report 3, 34p.

- Vellozo, T.G.; Alves, A.R. 2006. Características gerais do fenômeno da maré no Brasil. *Anais* Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, Tomo LXI.
- Vital, H.; Statterger, K, Amaro, V.E; Schwarzer, K.; Frazão, E.P., Tabosa, W.F. 2008. Inner continental shelf off Northern Rio Grande do Norte, NE Brazil: A Modern high-energy siliciclastic-carbonate platform. In: Hampson G, Dalrymple R (eds). Recent Advances in Shoreline – shelf Stratigraphy. *SEPM* Special Issue 90:175-188.
- Wang, M.; Shi, W. 2008. Satellite-observed algae blooms in China's Lake Taihu. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, 89:201–202.
- Zar, J.H. 1996. *Biostatistical Analysis*. Third Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 662p.