

A RESPOSTA DA BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA EM RELAÇÃO À VARIAÇÃO DA ZONA EUFÓTICA E PROFUNDIDADE DA CAMADA DE MISTURA

João Felipe Cardoso dos Santos¹

¹Departamento de Sensoriamento Remoto – INPE
Av. dos Astronautas 1758, Jd. da Granja, São José dos Campos, SP.
{joaofcs@dsr.inpe.br}

Resumo

A biomassa fitoplanctônica é essencial na manutenção da vida aquática e terrestre. Saber quantificá-la significa poder avaliar a produtividade de estoques pesqueiros, do desenvolvimento larval e de peixes juvenis e o sequestro de carbono atmosférico pelo fitoplâncton através da fotossíntese. Para que haja a fotossíntese são necessárias condições ideais de luz e nutrientes. Na Bacia de Santos, região da plataforma sudeste do litoral brasileiro e região oceânica adjacente, a luz não é fator limitante para o crescimento fitoplanctônico. Os nutrientes são os responsáveis pela variação dessa biomassa e estes ficam disponíveis através da mistura de águas subsuperficiais, ricas em nutrientes, para águas superficiais que recebem a radiação solar incidente. Nesse contexto, se avaliou para o período de janeiro de 2011 a dezembro de 2013 a variação na profundidade da camada de mistura da coluna d'água e também da zona eufótica. Além disso, avaliou-se o desempenho de diferentes modelos de estimativas destes produtos. Modelos de profundidade da zona eufótica baseados na concentração de clorofila-*a* apresentam melhor desempenho em regiões oceânicas e modelos baseados nas propriedades ópticas inerentes são mais robustos nas estimativas sobre a plataforma continental. A biomassa encontra as condições ideais de crescimento no período da primavera (sobre a plataforma) e no inverno (em oceano aberto).

1. Introdução

O Sensoriamento Remoto orbital fornece uma visão sinóptica dos oceanos, que associada a medidas *in situ* e modelos numéricos, permite aprimorar a descrição e o entendimento do Oceano Atlântico Sudoeste. As aplicações dos dados orbitais são tão diversas que podemos considerar este meio de aquisição de informações para a oceanografia como um todo – física, química, biológica e geológica – tão eficaz como as informações obtidas por métodos convencionais (KAMPEL, 2002).

Com dados de sensoriamento remoto da cor do oceano, pode-se estimar a concentração de clorofila na superfície do mar (CSM) e utilizá-la como índice de biomassa fitoplanctônica. É possível também, estimar a profundidade da zona eufótica (ZEU), como uma medida da claridade da água e como uma propriedade importante para a produção primária na camada superior do oceano. Estas imagens oferecem uma observação sinóptica de características biológicas de sistemas dinâmicos como as frentes oceânicas, ressurgências e vórtices de mesoescala.

As imagens de satélite oferecem uma oportunidade praticamente única para a comparação bidimensional e simultânea da variabilidade biológica (biomassa fitoplanctônica) e física (profundidade da camada de mistura) na camada superior do oceano.

O ciclo anual da biomassa fitoplanctônica é dominado por uma rápida e intensa explosão populacional, o bloom de primavera (HENSON et. al., 2006). Durante o inverno, ventos fortes e a perda de calor da superfície do mar durante para a atmosfera induz processos convectivos na coluna d'água. A mistura vertical das águas de subsuperfície e superficiais determinam a disponibilidade de nutrientes na zona eufótica que estará disponível para a produção fitoplanctônica na primavera seguinte (KOEVE, 2001), conforme a intensidade luminosa aumenta (HENSON et. al., 2009).

Entretanto, para a região subtropical, a irradiância não é fator limitante no ciclo de crescimento do fitoplâncton. A limitação por nutrientes, relacionada à profundidade da camada de mistura e a zona eufótica são as principais variáveis que podem ser relacionadas com a variação da biomassa fitoplanctônica da região subtropical. Sob estas condições o fitoplâncton cresce rapidamente em um determinado período de

tempo importante para o desenvolvimento do zooplankton, crescimento larval e estoque pesqueiro (PLATT et. al., 2003) e a sazonalidade do consumo de carbono (LUTZ et. al., 2007). A camada de mistura é definida como a região onde a variação da temperatura da água é menor que 0,5°C com relação à temperatura de superfície (KAMPEL e BARBEDO, em fase de elaboração).

Produção primária é o processo de fixação biológica de carbono inorgânico em moléculas orgânicas por meio da fotossíntese (GAETA e BRANDINI, 2006). A fixação total do carbono representa a Produção Primária Bruta (PPB), ao passo que a Produção Primária Líquida (PPL) representa a PPB menos a respiração dos autótrofos. Em ambientes aquáticos naturais é impossível estimar a PPL, uma vez que autótrofos e heterótrofos ocupam as mesmas classes de tamanho, coexistindo nas amostras de água obtidas para os experimentos de fotossíntese.

A absorção seletiva dos comprimentos de onda do azul e verde-azulado pelos pigmentos fotossintéticos, especialmente a clorofila-*a*, permite a quantificação da biomassa fitoplanctônica com base em medidas da cor do oceano. A combinação de dados de clorofila com o conhecimento da temperatura superficial do mar, irradiância solar incidente e profundidade da camada de mistura permite estimar a PPL para qualquer região oceânica (BEHERENFELD e FALKOWSKI, 1997 citado por GAETA e BRANDINI, 2006). Por sua vez, a fixação do carbono pelo fitoplâncton é importante para a retirada deste da atmosfera e sua importação para o fundo do mar, processo chamado de bomba biológica ou sequestro de carbono, essencial na manutenção do calor do planeta (LUTZ et. al., 2007).

A concentração de clorofila é qualitativamente relacionada à disponibilidade de nutrientes de águas subsuperficiais em direção à zona eufótica. A zona eufótica ($Z_{1\%}$) é definida como a região onde a radiação fotossinteticamente ativa é maior que 1% daquela que atinge a superfície do mar (KIRK, 1994). A partir desta profundidade a PPB não supera os gastos com respiração e a energia gerada pelos fotossintetizantes não é suficiente para manter a vida autotrófica (LEE et. al., 2007).

Os campos de superfície gerados a partir dos dados orbitais foram analisados de modo a destacar padrões oceanográficos importantes para a compreensão sobre a variabilidade da biomassa fitoplanctônica.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende a Bacia de Santos, Oceano Atlântico Sudoeste, entre aproximadamente as latitudes de 20°S (Cabo de São Tomé) e 30°S (Cabo de Santa Marta). Observa-se que a plataforma continental pode ser dividida a norte e a sul da Ilha de São Sebastião (Figura 1). Ao norte a plataforma se encurta e há uma quebra na geomorfologia, fazendo com que a costa se prolongue longitudinalmente. Essa formação intensifica processos de ressurgência no local (CASTRO et. al., 2006). Ao sul da Ilha de São Sebastião a plataforma se estende e está influenciada principalmente por processos locais.

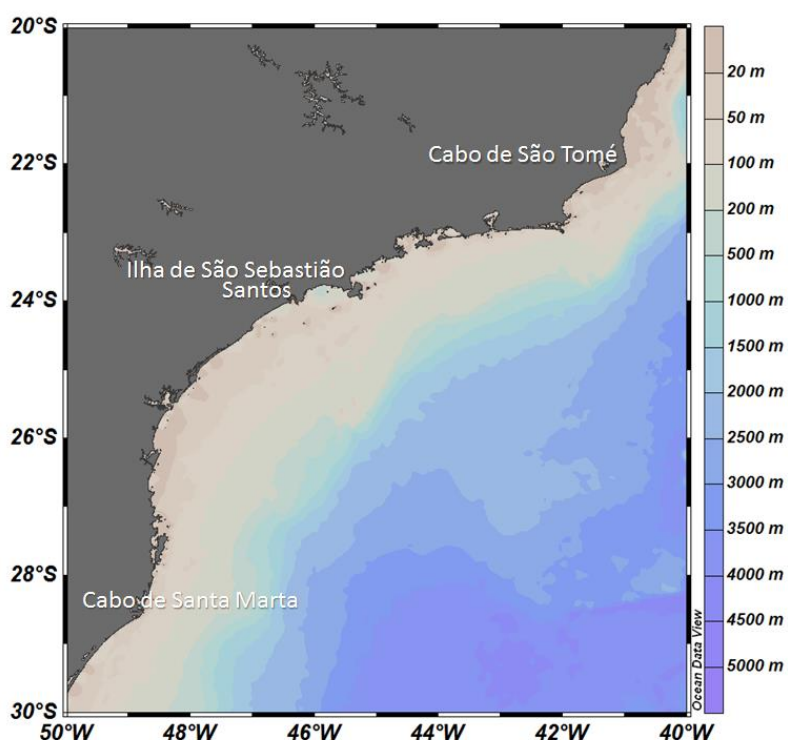


Figura 1: Mapa batimétrico da Bacia de Santos

Na região de estudo a plataforma interna é ocupada pela Água Costeira (AC), a Água Tropical (AT) está presente na plataforma externa e, abaixo desta, existe forte influência da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) nas camadas inferiores. A ACAS é caracterizada por concentrações de nutrientes que, ao alcançarem a zona eufótica, são consumidos pelo fitoplâncton. Para que isso ocorra é necessário que haja o fenômeno de ressurgência, movimento de ascensão de águas de subsuperfície resultante da divergência positiva do transporte horizontal induzido pelo vento na camada superior do oceano (CASTRO et. al., 2006).

2.2. Dados de CSM, ZEU e PCM

Imagens médias mensais de CSM e ZEU foram geradas para a área da Plataforma Continental e Oceânica Sudeste do Brasil, a partir de dados do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo do satélite EOS-AQUA. Foram utilizados dados em formato HDF, referência geodésica DATUM WGS84, com resolução espacial de 4 km. Foram obtidos do *Ocean Biology Processing Group* (OBPG), do *Goddard Space Flight Center* (GSFC), NASA, compreendendo o período entre janeiro de 2011 e dezembro de 2013. As imagens e manipulação dos dados foram feitas no software *SeaWiFS Data Analysis System* (SeaDAS) versão 7.02.

As concentrações de clorofila (mg m^{-3}) foram estimadas com o emprego da versão mais recente do algoritmo padrão da NASA, OC3Mv6, reprocessamento R2010.0 concluído em 2011 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/WIKI/OCReproc.html>). O algoritmo operacional para estimativa da CSM (O'REILLY et. al., 2000) foi atualizado com base em dados *in situ* NOMAD v2. O NOMAD é uma base global de dados bio-ópticos representativa de diferentes tipos de água, incluindo regiões costeiras e *offshore*.

A zona eufótica foi estimada utilizando os modelos propostos por Morel et. al., (2007), baseada em massas de água nas quais as propriedades ópticas inerentes podem ser descritas adequadamente pela concentração de clorofila-a. Também foi avaliada a estimativa da ZEU descrita por Lee et. al., (2007), baseado em regiões onde há dependência de outros constituintes opticamente ativos na água.

Médias mensais da profundidade da camada de mistura - MLD (do inglês Mixed Layer Depth), para o período de estudo, foram calculadas a partir de dados gerados pelo o modelo *Thermodynamic Ocean Prediction System* (TOPS), do *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC), da marinha americana (CLANCY e SADLER, 1992). A MLD também foi avaliada com o HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), baseada no Ocean General Circulation Model (OGCM) com uma resolução mais fina em regiões costeiras (<https://hycom.org/hycom/overview>).

A grade produzida pelos TOPS/FNMOC e HYCOM/OGCM tem resolução média de 10 km e foram obtidas de (<http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.-monthly.hdf.mld.{fnmoc,hycom}.php>).

2.3. Série Temporal e Divisão Espacial

Para alcançar os objetivos seguiu-se o modelo OMT-G (*Object Modelling Technique – Geographic*) descrito na Figura 2.

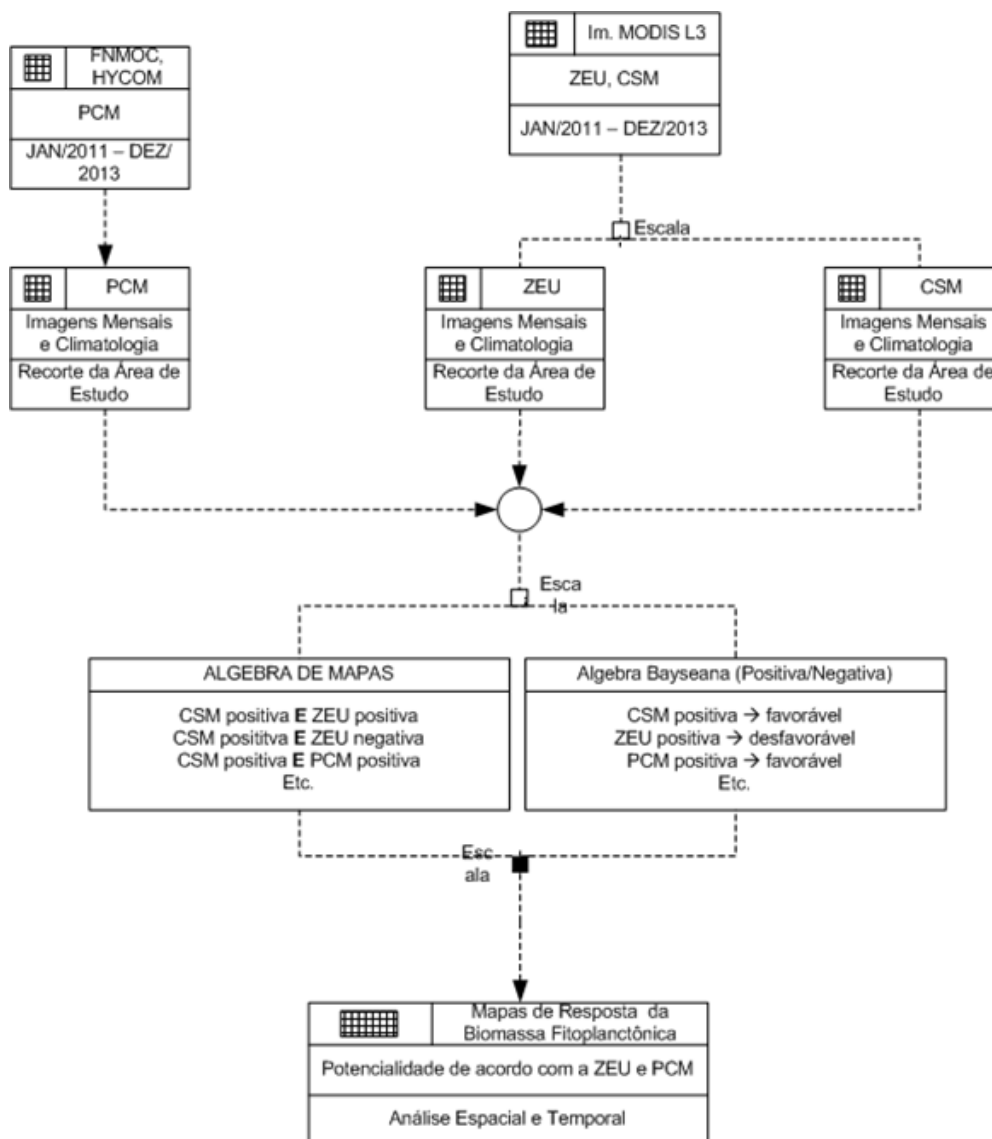


Figura 2: Modelo OMT-G com as etapas do pré-processamento e álgebra de mapas realizadas no trabalho.

Foram extraídas as séries temporais de valores médios mensais de CSM, ZEU, FNMOC e HYCOM (Figura 3A) para os domínios de "plataforma" e "oceano" na Bacia de Santos no período considerado. O mesmo procedimento foi adotado, utilizando todas as imagens, para o cálculo da climatologia (Figura 3B). As anomalias foram calculadas pela diferença entre cada média mensal e a média "climatológica" (Figura 3C).

A fim de identificar espacialmente a variação da biomassa fitoplanctônica foi gerada imagens condicionantes como, por exemplo, o aumento da clorofila responde ao

aumento a diminuição da zona eufótica (Figura 3D). Essa lógica também foi realizada com relações entre a CSM e imagens da profundidade da camada de mistura.

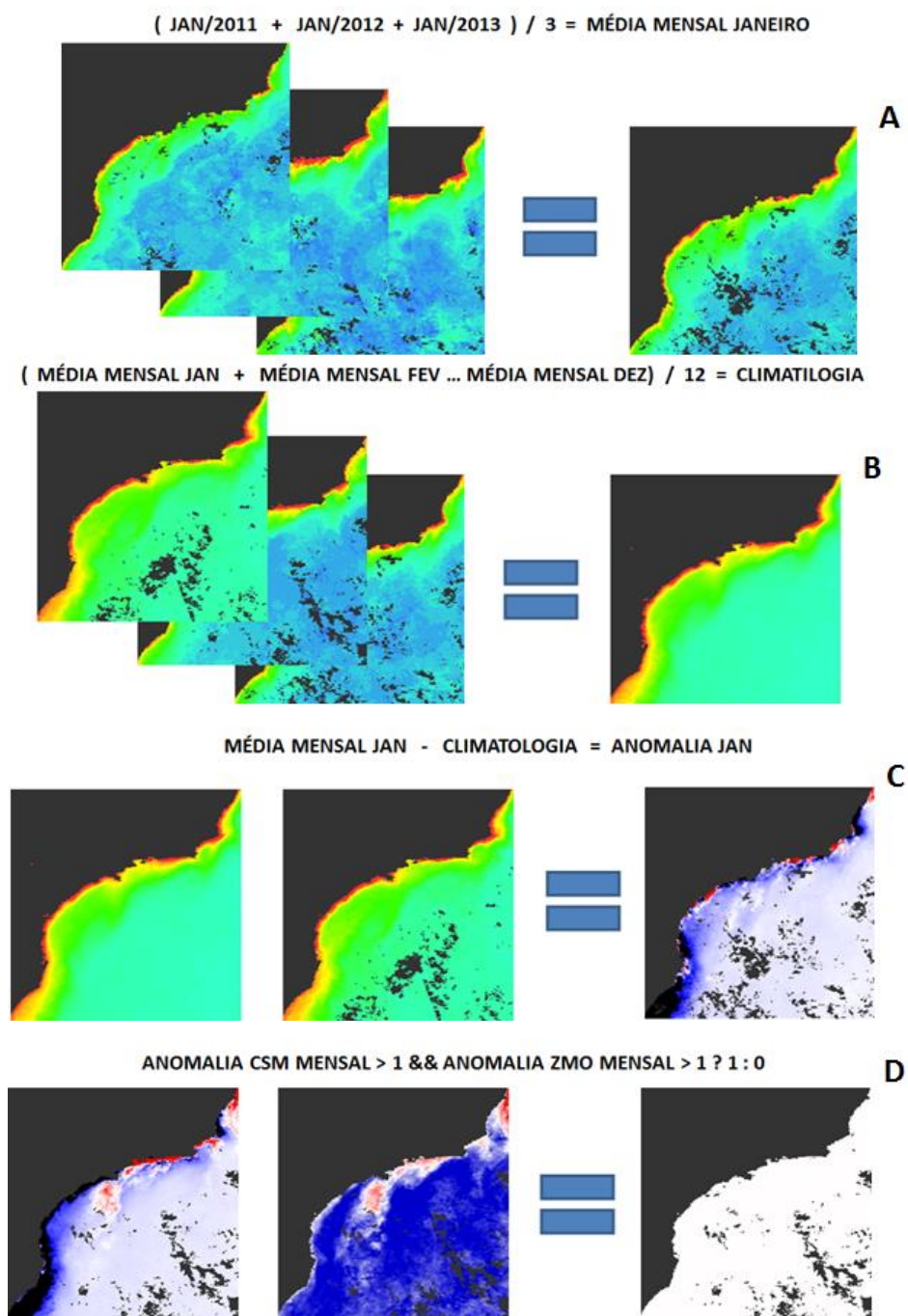


Figura 3: Pré-processamento dos produtos A) médias mensais, B) climatologia, C) anomalia, D) condicionante, utilizados nas análises.

De acordo com as características geomorfológicas e processos físicos que ocorrem na área de estudo, a Bacia de Santos foi dividida em quatro regiões poligonizadas (Figura 4):

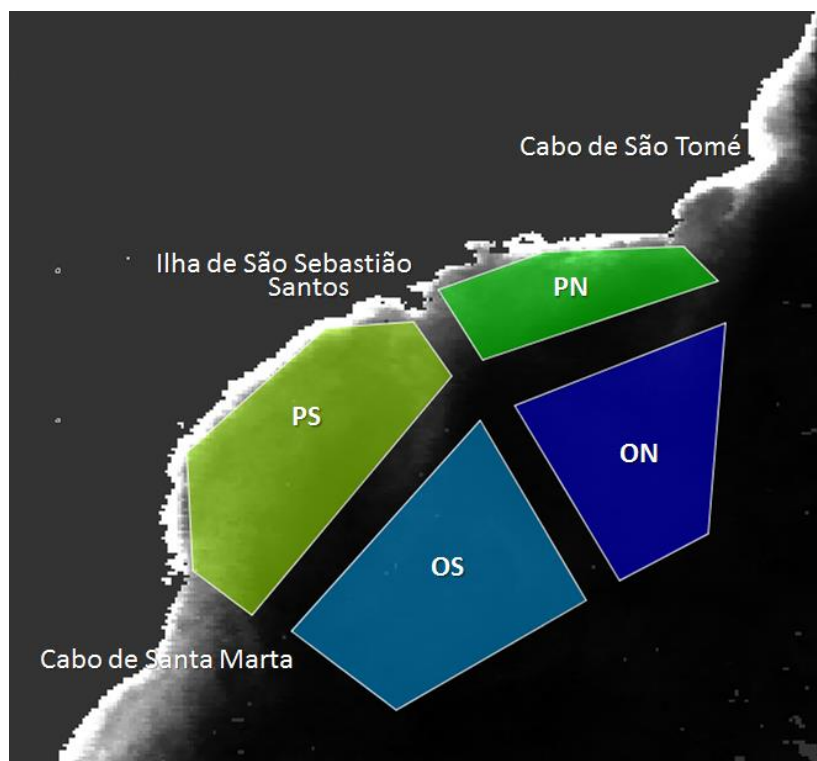


Figura 4: Divisão da área de estudo em quatro regiões, de acordo com os processos oceanográficos locais.

- Plataforma Norte (PN)
- Oceano Norte (ON)
- Plataforma Sul (PS)
- Oceano Sul (OS)

3. Resultados e Discussões

3.1. Clorofila-*a* na Superfície do Mar

As imagens da série temporal mensal de CSM estão apresentadas na Figura 5.

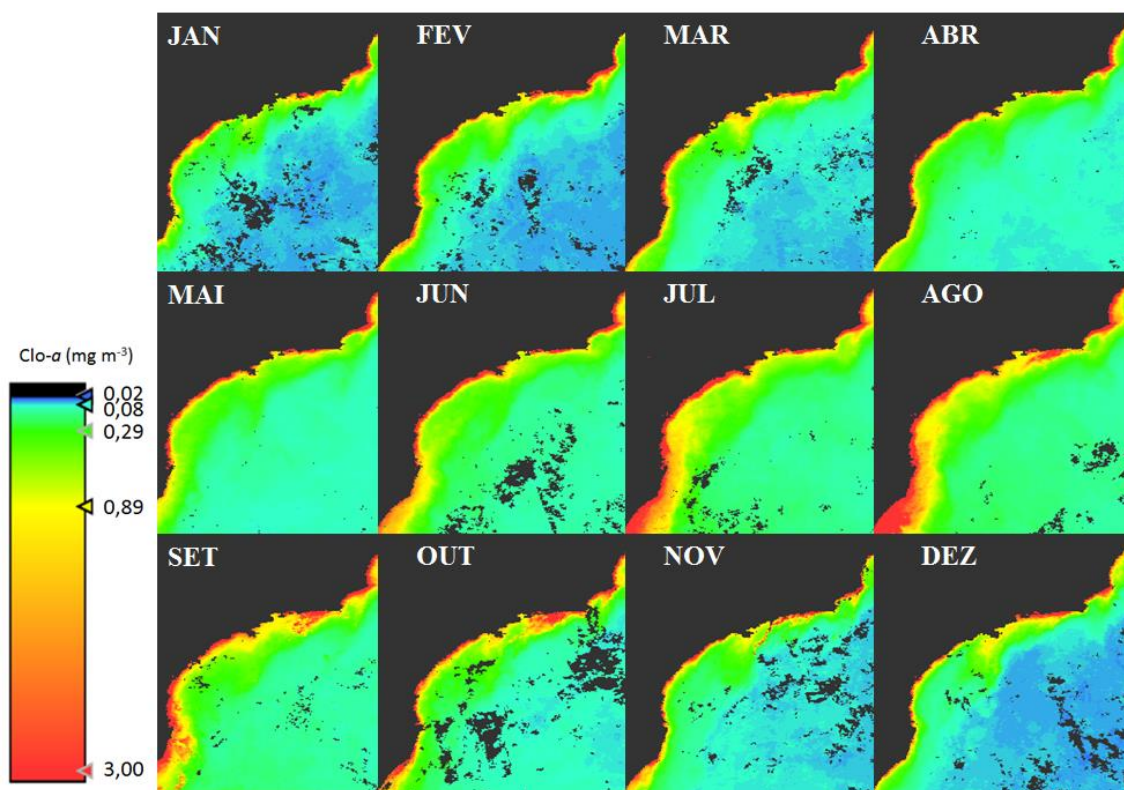


Figura 5: Médias mensais "climatológicas" de concentração de clorofila na superfície do mar para a região da Baía de Santos e adjacências.

Na Plataforma Norte (PN) observam-se as maiores médias anuais de clorofila-*a* na primavera e as menores no outono, sendo respectivamente $0,732 \text{ mg m}^{-3}$ e $0,290 \text{ mg m}^{-3}$. Esta região é, também, o local com os maiores valores de biomassa fitoplanctônica, maiores que $3,00 \text{ mg m}^{-3}$, geralmente associados ao aporte continental ou à ressuspensão de nutrientes provenientes da ressurgência de Cabo Frio. A Plataforma Sul (PS) também apresenta valores altos de clorofila-*a* (Tabela 1), porém o tempo de resposta do potencial fitoplanctônico é antecipado em relação à PN (Figura 6). O pico de biomassa fitoplanctônica na PS ocorre no final do inverno (julho, agosto) enquanto na PN ocorre no meio da primavera (setembro, outubro).

Na região oceânica, a biomassa fitoplanctônica começa a crescer em abril, com máximos médios nos meses de julho ($0,152 \text{ mg m}^{-3}$) na região Oceano Norte (ON) e

agosto (0,166 mg m⁻³) na região Oceano Sul (OS). A partir de outubro a biomassa decresce em ambas as regiões até níveis mínimos de 0,031 mg m⁻³ no verão.

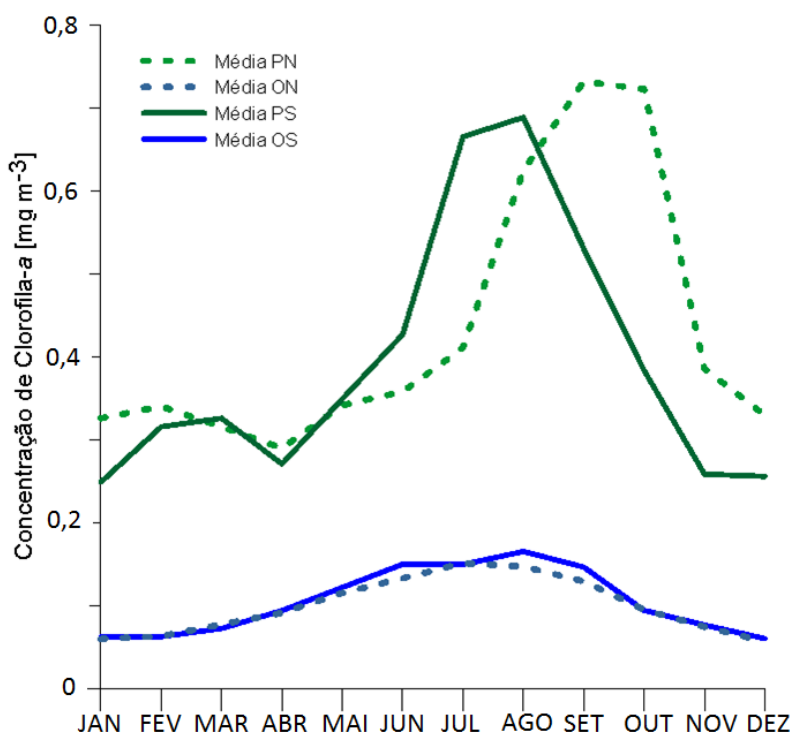


Figura 6: Média mensal climatológica de clorofila-a nas quatro regiões poligonizadas definidas dentro da Baía de Santos.

Tabela 1: Valores médios mensais e estatísticos de clorofila-a ao longo do período compreendido entre jan/2011 e dez/2013.

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Oceano Sul (OS)	MINIMO	0.039	0.041	0.052	0.074	0.088	0.094	0.115	0.131	0.114	0.064	0.052	0.045
	MAXIMO	0.107	0.118	0.247	0.132	0.169	0.282	0.272	0.234	0.232	0.155	0.101	0.131
	MEDIA	0.063	0.063	0.073	0.095	0.122	0.150	0.150	0.166	0.147	0.095	0.077	0.061
	DESVIO	0.009	0.010	0.010	0.011	0.014	0.021	0.014	0.013	0.012	0.011	0.007	0.009
Plataforma Norte (PN)	MINIMO	0.080	0.083	0.098	0.102	0.117	0.146	0.174	0.179	0.153	0.109	0.062	0.058
	MAXIMO	6.679	3.001	2.661	0.851	1.089	1.033	1.040	5.251	4.733	6.331	8.668	2.672
	MEDIA	0.326	0.341	0.316	0.290	0.342	0.358	0.411	0.625	0.732	0.723	0.386	0.330
	DESVIO	0.393	0.306	0.266	0.140	0.162	0.176	0.172	0.636	0.663	0.906	0.657	0.331
Oceano Norte (ON)	MINIMO	0.031	0.045	0.057	0.070	0.090	0.105	0.125	0.111	0.101	0.066	0.056	0.038
	MAXIMO	0.093	0.111	0.110	0.132	0.194	0.182	0.184	0.192	0.344	0.143	0.110	0.084
	MEDIA	0.060	0.064	0.078	0.092	0.116	0.133	0.152	0.148	0.130	0.096	0.075	0.057
	DESVIO	0.008	0.009	0.007	0.008	0.012	0.011	0.011	0.013	0.019	0.011	0.006	0.006
Plataforma Sul (PS)	MINIMO	0.072	0.070	0.100	0.107	0.129	0.188	0.230	0.202	0.173	0.117	0.100	0.081
	MAXIMO	1.917	1.466	2.269	1.367	1.509	3.215	4.606	2.731	3.744	2.442	6.445	1.283
	MEDIA	0.249	0.316	0.326	0.271	0.350	0.427	0.665	0.689	0.531	0.384	0.259	0.256
	DESVIO	0.163	0.175	0.227	0.136	0.154	0.192	0.370	0.374	0.386	0.243	0.177	0.183

3.2. Comparação dos Produtos ZEU e PCM

3.2.1. ZEU

A zona eufótica foi avaliada de acordo com os modelos propostos por Lee et al., (2007), chamado a partir de agora de ZEU_{Lee} , e por Morel et. al., (2007), chamado de ZEU_{Morel} , apresentados nas Figuras 7 e 8.

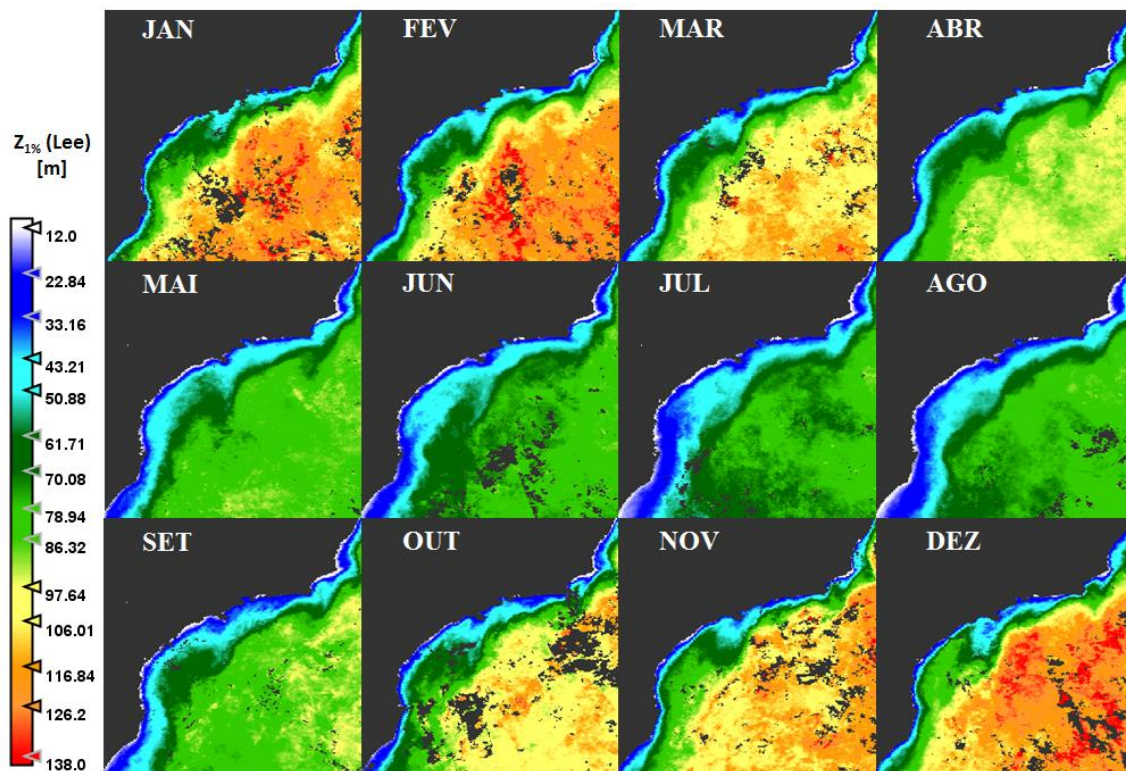


Figura 7: Zona eufótica estimada pelo modelo ZEU_{Lee} .

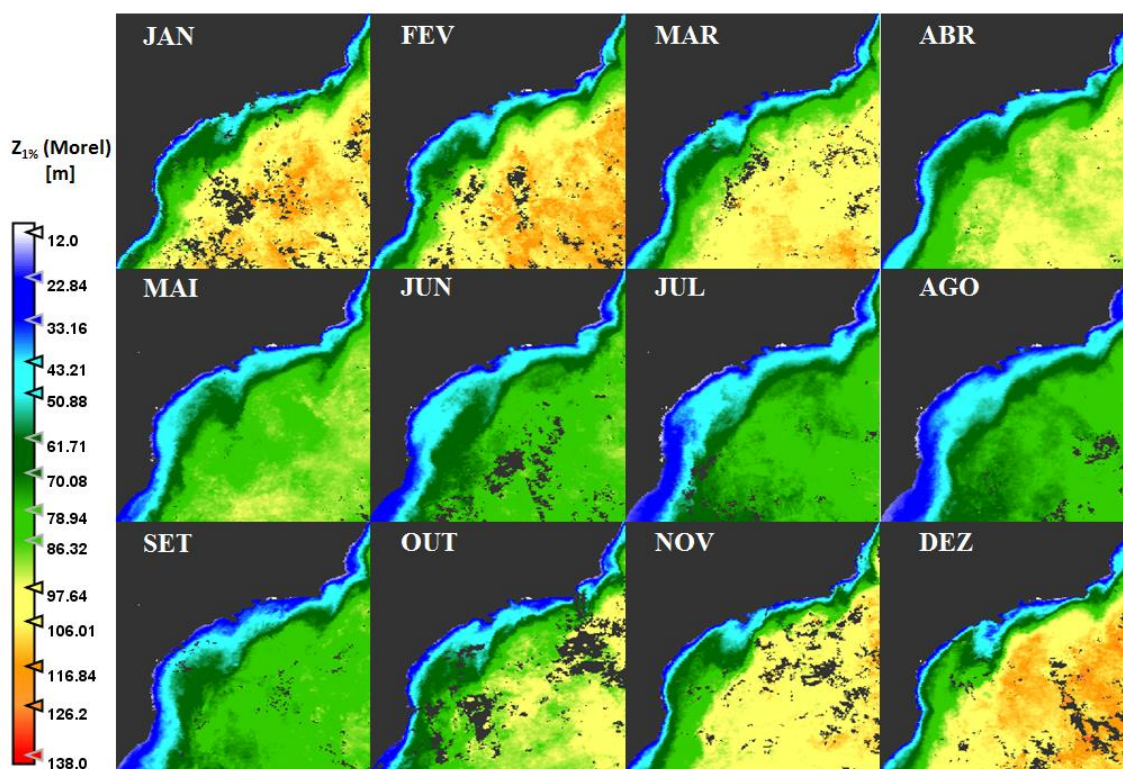


Figura 8: Zona eufótica estimada pelo modelo ZEU_{Morel} .

Os valores do modelo ZEU_{Lee} e ZEU_{Morel} foram máximos na região Oceano Norte e Sul durante o verão (138 e 118 metros, respectivamente). A ZEU_{Lee} apresentou profundidades maiores que a ZEU_{Morel} (FIGURA 9) principalmente nos meses de verão e profundidades menores nos meses de inverno. Como o algoritmo ZEU_{Morel} utiliza as concentrações de clorofila-*a* para estimar a profundidade eufótica, possivelmente, os menores valores de ZEU_{Morel} em relação à ZEU_{Lee} , no inverno, estão relacionados com o aumento da CSM principalmente nas regiões PN e PS, onde os constituintes opticamente ativos costeiros interferem na pureza do sinal medido. No verão ocorre o inverso, principalmente sobre a plataforma onde a maior concentração de constituintes opticamente ativos favorece a diminuição das estimativas do algoritmo ZEU_{Lee} e as águas oligotróficas do oceano aberto aumentam os valores medidos com o modelo ZEU_{Lee} (FIGURA 10).

Portanto, o algoritmo ZEU_{Lee} apresentou valores maiores para o oceano aberto, com diferenças de até 10,0 metros nas estimativas para as regiões ON e OS, e

apresentou profundidades menores na PN e PS de até 5,0 metros a menos de profundidade da zona eufótica (Figura 11).

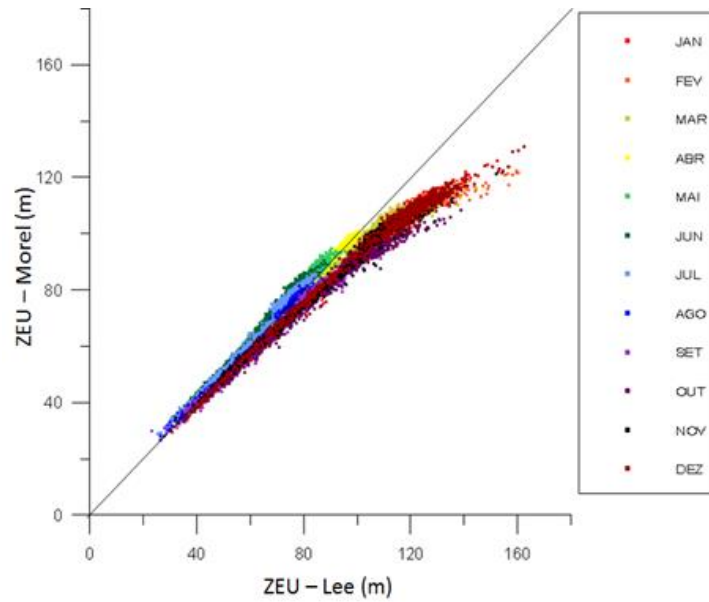


Figura 9: Correlação entre os dados de profundidade da zona eufótica estimados pelos algoritmos ZEU_{Lee} e ZEU_{Morel} . As cores estão associadas a diferentes meses do ano. Os valores plotados são as somas de todos os obtidos dos quatro polígonos definidos a priori.

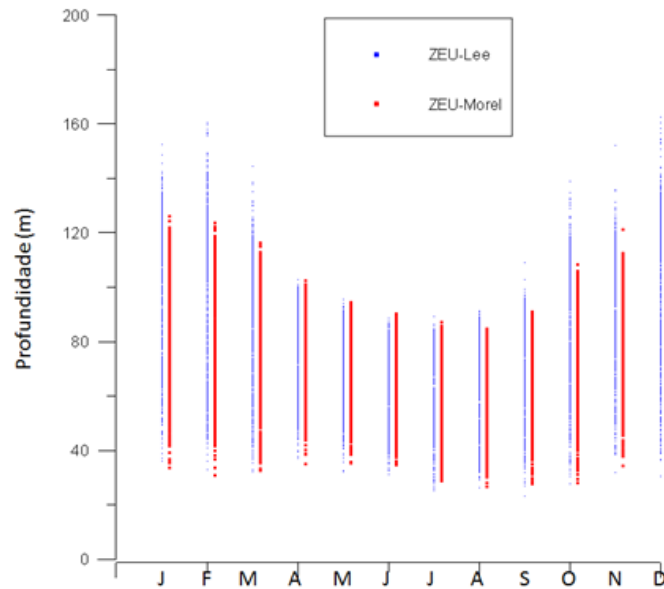


Figura 10: Distribuição temporal dos valores de ZEU_{Lee} e ZEU_{Morel} considerando os dados dentro dos 4 polígonos definidos a priori.

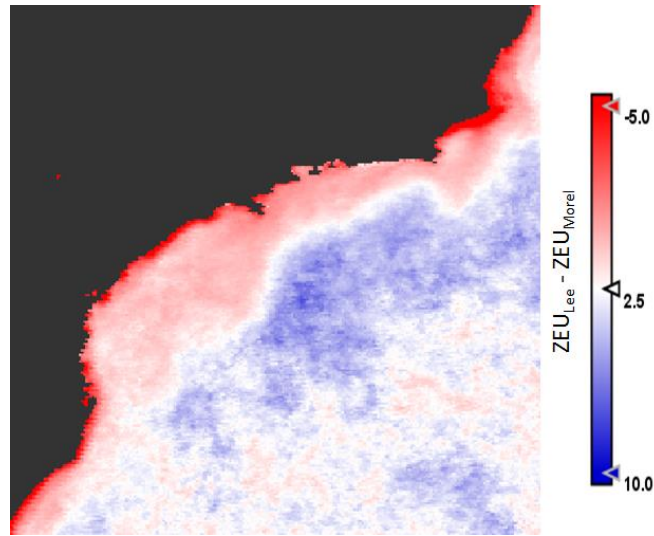


Figura 11: Diferença entre as profundidades da zona eufótica estimadas pelo modelo de Lee et al., (2007) e Morel et. al., (2007). Regiões em azul a ZEU_{Lee} é maior que a ZEU_{Morel} . Regiões em vermelho a ZEU_{Lee} é menor que a ZEU_{Morel} .

3.2.2. Profundidade da Camada de Mistura

A variação espacial e temporal anual da profundidade da camada de mistura na Bacia de Santos é mostrada nas Figuras 12 e 13, respectivamente para as análises utilizando dados FNMOC e HYCOM.

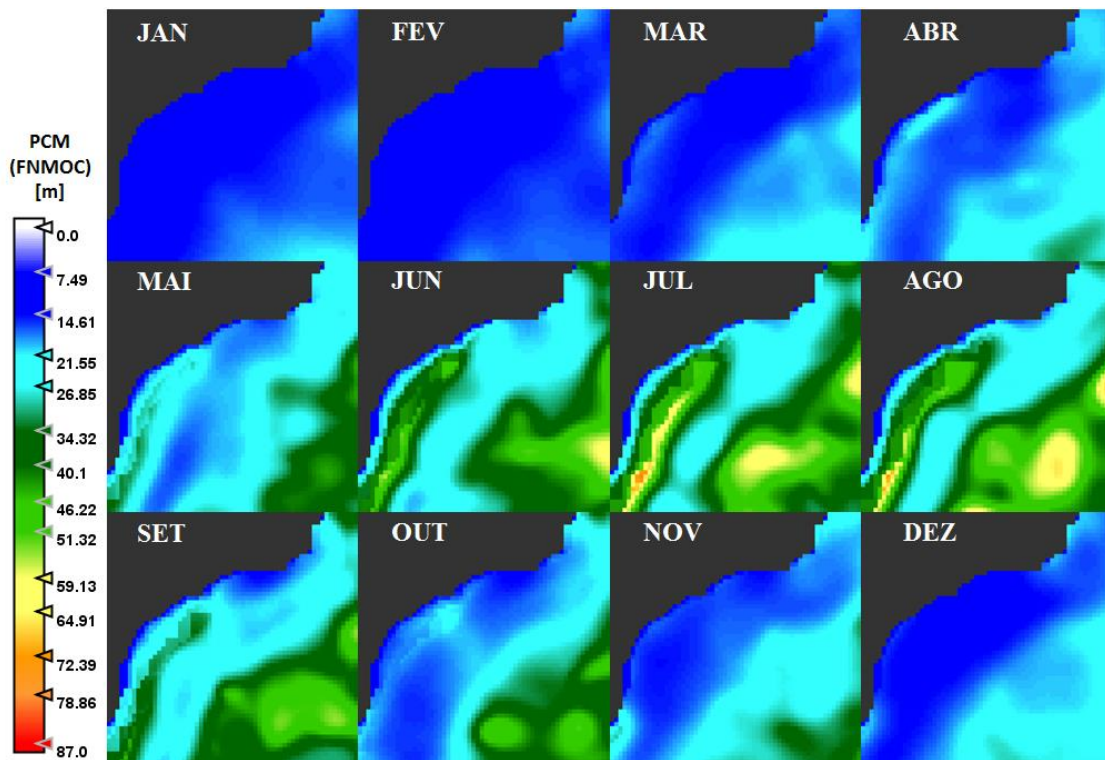


Figura 12: Profundidade da camada de mistura estimada pelo modelo FNMOC.

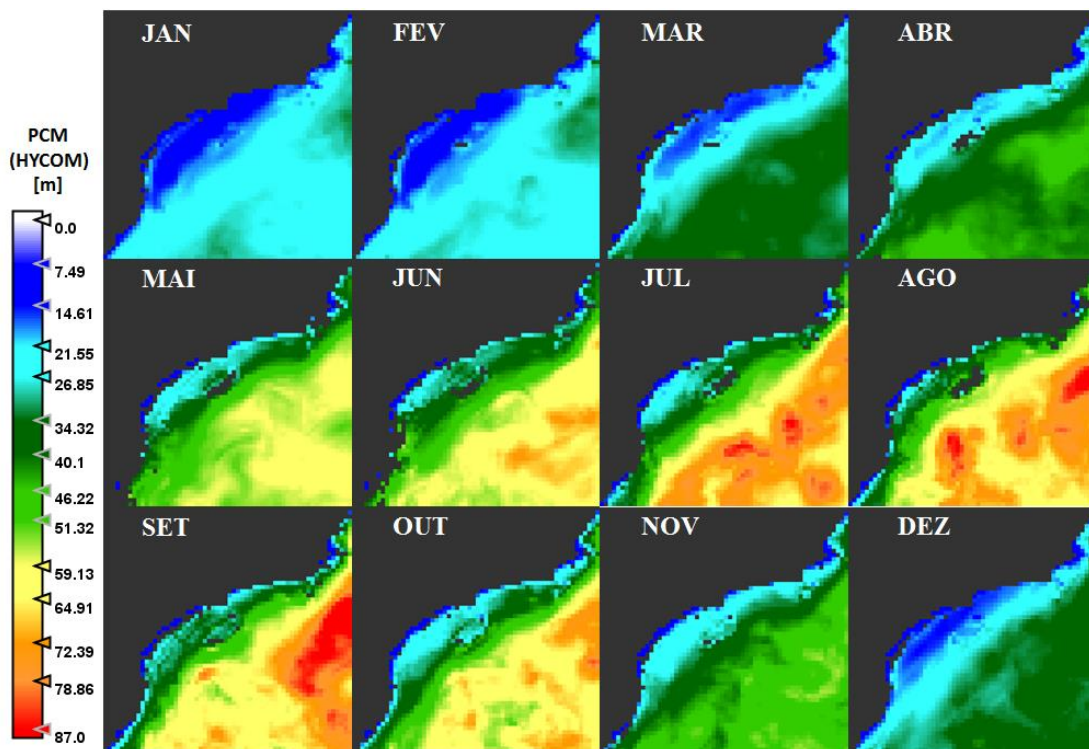


Figura 13: Profundidade da camada de mistura estimada pelo modelo HYCOM.

De maneira geral, os modelos de PCM apresentam uma variação espacial e temporal muito discrepante entre si. A correlação entre os dois algoritmos mostrou que a PCM estimada pelo modelo HYCOM é mais profunda que a estimada pelo FNMOC (Figura 14), com exceção para algumas regiões ao longo do inverno, relacionadas a pluma do rio da Plata que só foi identificada pelo FNMOC.

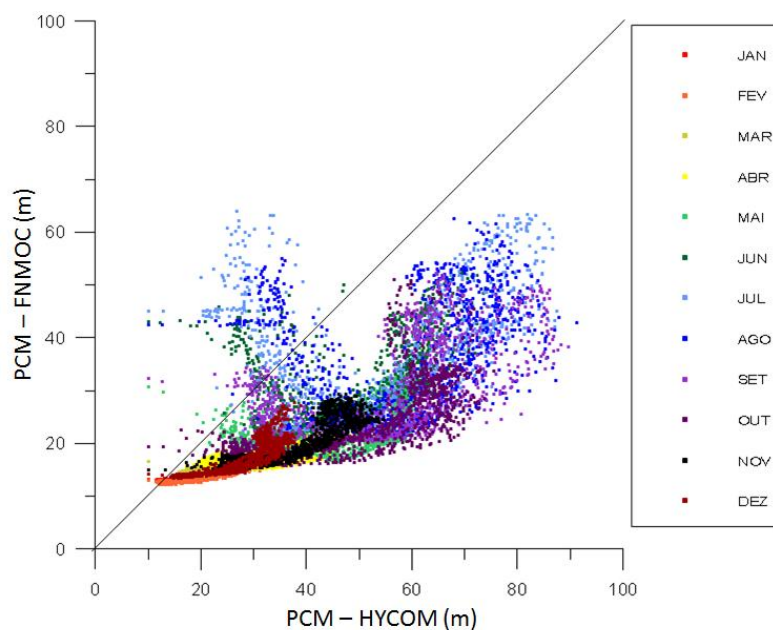


Figura 14: Correlação dos dados de PCM para os modelos FNMOC e HYCOM. As cores estão associadas a diferentes meses do ano. Os valores plotados são as somas de todos os obtidos dos quatro polígonos definidos a priori.

A PN no modelo FNMOC é menos profunda e não ultrapassa 15 metros. No modelo HYCOM a PCM, nesta mesma região, alcança a profundidade de até 40 metros nos meses de maio a outubro. A diferença entre a PCM do modelo HYCOM e FNMOC foi de até 50 metros em setembro na região ON e -25 metros em junho na PS (Figura 15).

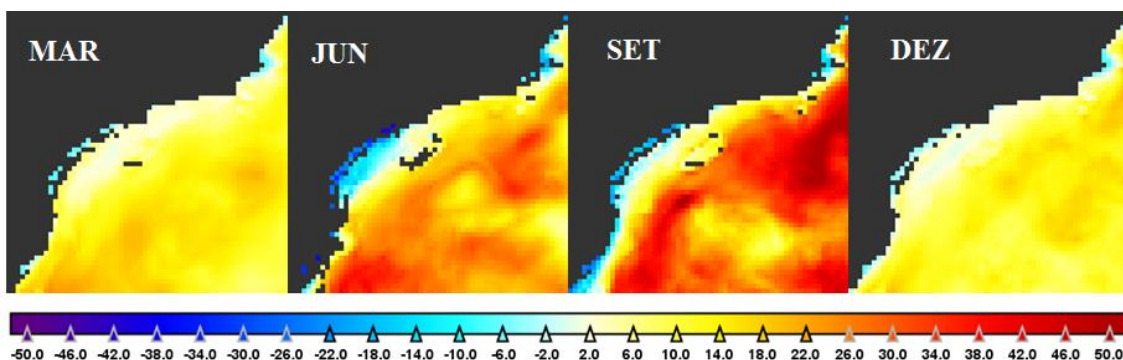


Figura 15: Diferença entre a PCM do modelo HYCOM e FNMOC. Valores positivos indicam uma PCM mais profunda do modelo HYCOM. Valores negativos indicam uma PCM mais profunda do modelo FNMOC.

Santos (2011) observou nesta região momentos de inverno com camadas de mistura de 35 a 40 metros conforme os dados do HYCOM. A PS no modelo HYCOM sofre um processo de influência do aumento da camada de mistura no OS, que não é observado pelo FNMOC. Porém a PCM pelo modelo FNMOC distingue a chegada da pluma do rio La Plata na costa sul da Bacia de Santos (Figura 16).

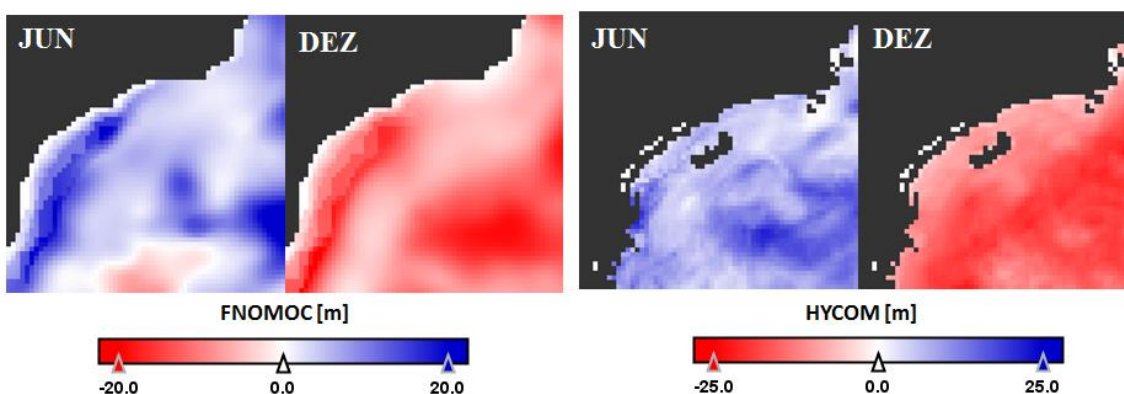


Figura 16: Anomalias da PCM para os modelos FNMOC (esquerda) e HYCOM (direita).

Na Figura 16, podemos observar que a presença da pluma nos dados FNMOC podem prejudicar uma análise temporal longa ou que se utilize de variações climatológicas. Isso porque o sinal da pluma é forte o bastante no inverno para ser percebido na climatologia e interferir na álgebra das anomalias. Portanto uma análise de

variação que se utilize de climatologias ou médias anuais estará inferindo um fator de erro em todos os meses de análises, sendo que este fator só aparece nos meses de inverno.

Kampel (2003) analisou dados *in situ* coletados durante o projeto DEPROAS, nas regiões de plataforma e talude do Rio de Janeiro e litoral norte de São Paulo. Na plataforma, a profundidade média da zona eufótica foi de 40,0 m no verão e 39,0 m no inverno. No talude, os valores médios de ZEU no verão e no inverno foram 64,0 m e 63,0 m, respectivamente. No verão a profundidade da camada de mistura foi estimada em 16,0 m na plataforma e 37,0 m no talude. No inverno, as profundidades estimadas na plataforma e no talude foram 40,0 m e 60,0 m, respectivamente.

3.3. Variação da Clorofila-*a* em função da ZEU e PCM

A clorofila mostrou uma correlação negativa com decaimento exponencial com relação a ZEU (Figura 17).

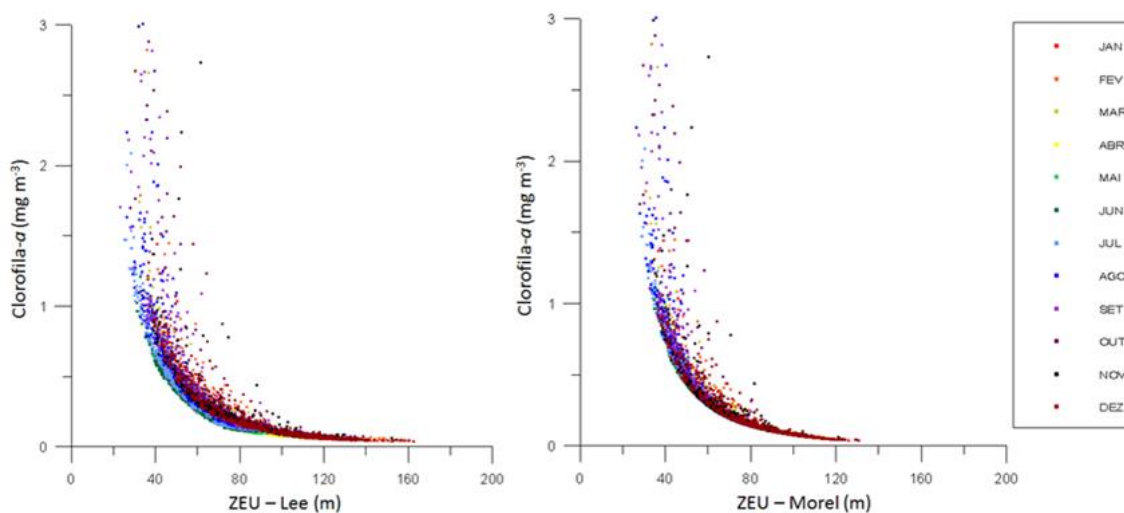


Figura 17: Correlação da CSM em função da ZEU. As cores estão associadas a diferentes meses do ano. Os valores plotados são as somas de todos os obtidos dos quatro polígonos definidos a priori.

A utilização dos modelos baseados na temporalidade, não mostrou uma preferência ao longo do ano indicando que para uma tomada de decisão deve-se dar atenção em relação à região de estudo (plataforma ou oceano). A Figura 18 mostra que ao longo dos meses a variação da CSM em relação à zona eufótica manteve-se inversamente proporcional ao longo de todo ano. Mesmo assim pode-se observar uma pequena variação na CSM em resposta à ZEU_{Lee} , principalmente nos meses de inverno. Isso significa que a mudança da ZEU_{Lee} teve respostas mais claras na variação da CSM, apresentando um desempenho pouco melhor para a série temporal.

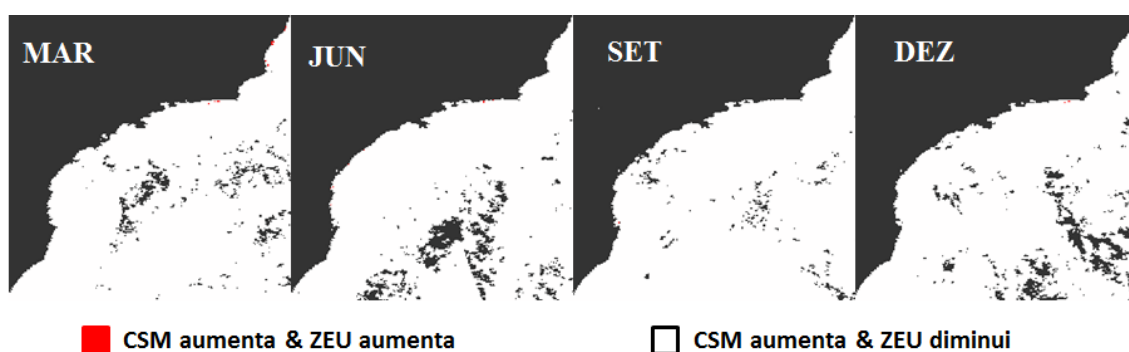


Figura 18: Correlação entre a CSM e a ZEU_{Morel} . Valores em vermelho são correlações positivas (aumento da CSM e aumento da ZEU). Regiões em branco são correlações negativas (aumento da CSM diminuição da ZEU).

Nos dados de PCM (Figura 19), se observa também que este decréscimo é exponencial na CSM com o aumento da PCM. Desconsiderando a interferência da pluma do Plata a CSM responde melhor às variações de PCM observadas pelo HYCOM. No FNMOC o aumento da clorofila está relacionado a divisão espacial (amostras sobre a plataforma ou sobre o oceano), do que necessariamente ao aumento e diminuição da PCM.

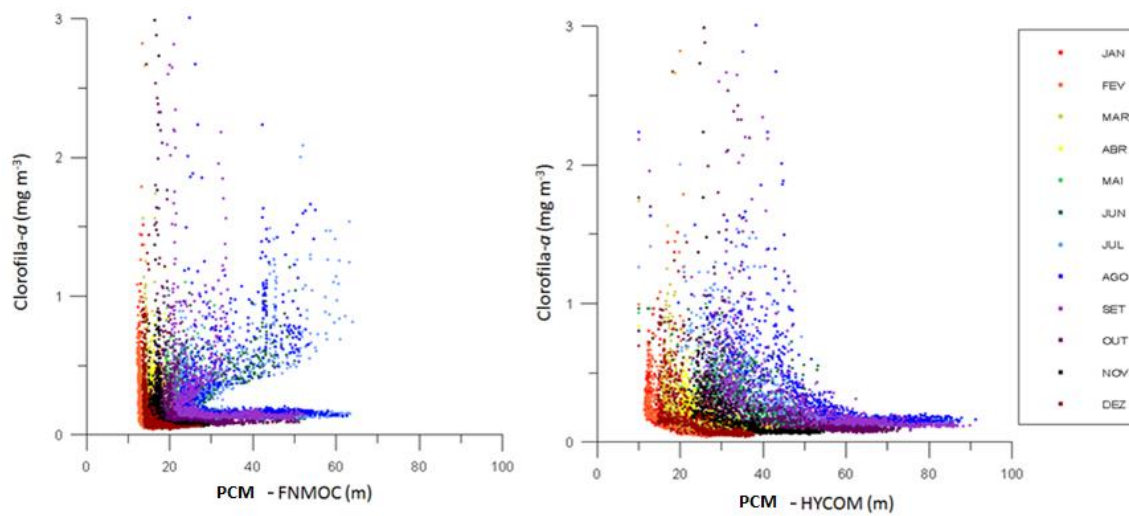


Figura 19: Correlação da CSM em função da PCM. As cores estão associadas a diferentes meses do ano. Os valores plotados são as somas de todos os obtidos dos quatro polígonos definidos a priori.

Dessa forma o aumento da biomassa fitoplanctônica está relacionada, como é sabido de trabalhos pretéritos, a um período ideal de ZEU e PCM. Dessa forma a Figura 20 ilustra o período em que as duas condições se satisfazem no aumento da CSM.

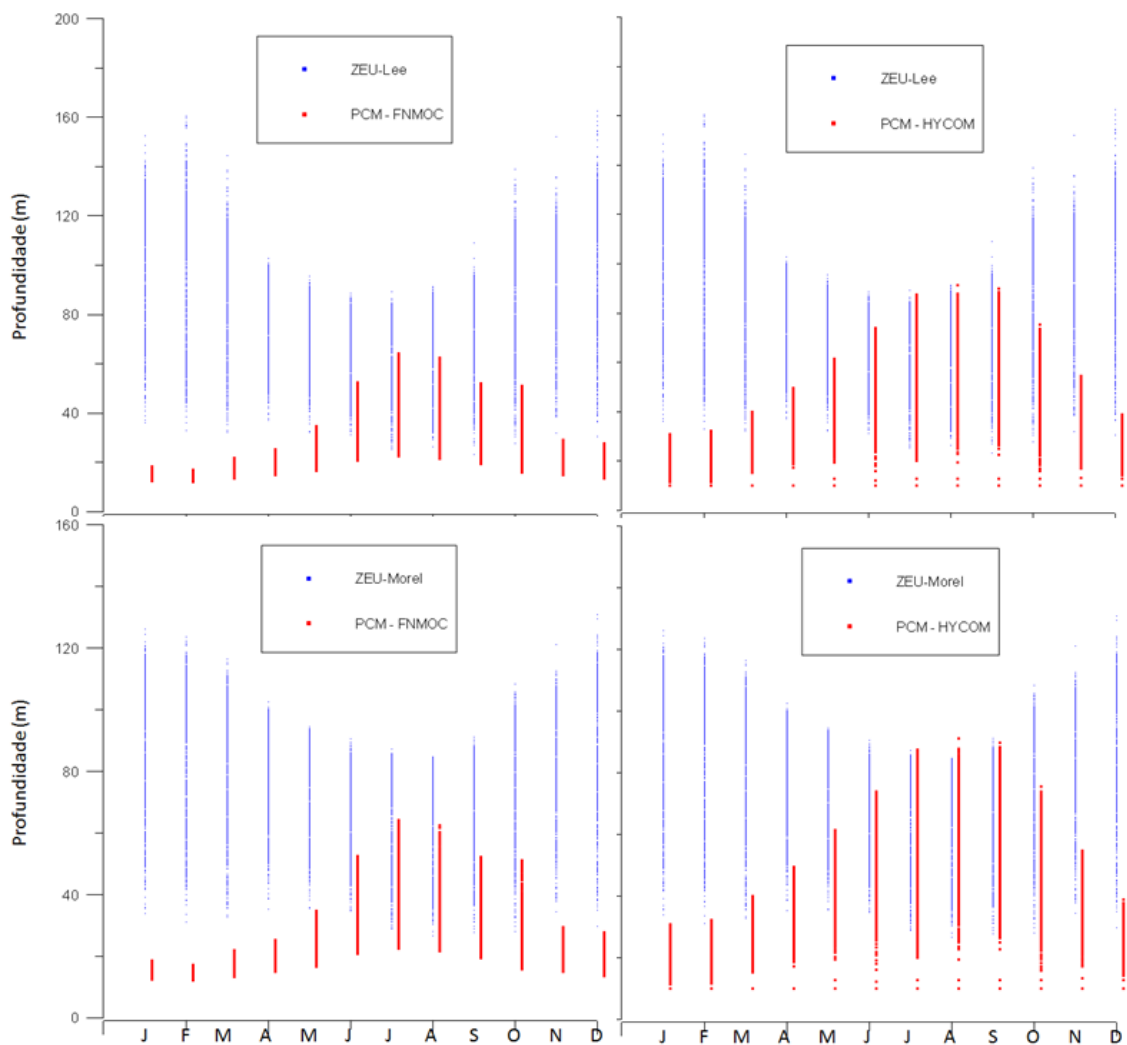


Figura 20: Identificação do período ideal das combinações entre os modelos de ZEU e PCM na variação da biomassa fitoplanctônica.

Pela figura podemos observar que o HYCOM apresenta um melhor desempenho, pois o FNMOC não se correlaciona tão bem quanto HYCOM no inverno com as mesmas profundidades e no verão o FNMOC não alcança a ZEU. Como analisado na Figura 17, a resposta do CSM com relação ao ZEU_{Lee} é relativamente melhor. Dessa forma propõe-se que numa análise global, utilizar o algoritmo ZEU_{Lee} e o HYCOM se obterá resultados mais robustos.

A Figura 21 mostra o acoplamento dos dados de variação da biomassa fitoplanctônica com relação a ZEU_{Lee} e HYCOM.

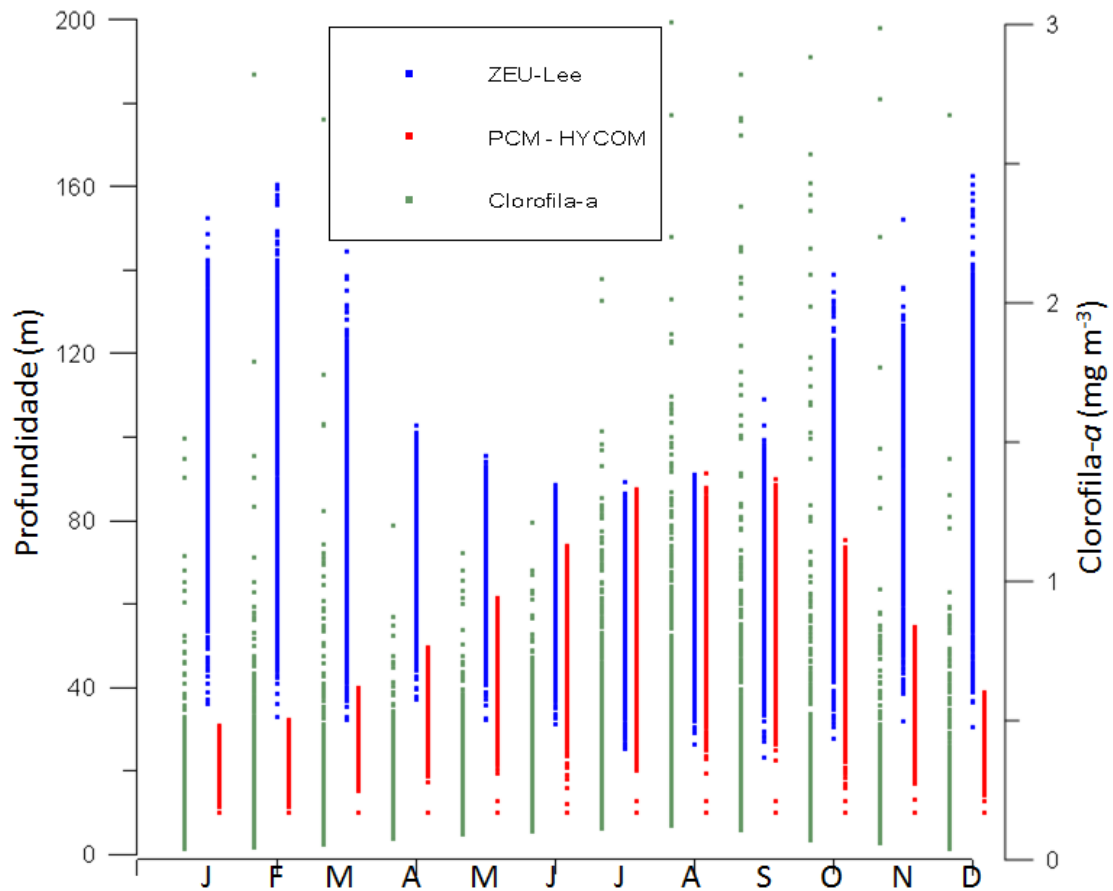


Figura 21: Relação temporal entre a CSM e os modelos de ZEU e PCM que obtiveram os melhores resultados na Baía de Santos.

3.4. Análise AHP - Analytic Hierarchy Process

Foi realizado um suporte a decisão baseado nos resultados de desempenho dos atributos sobre a variação da biomassa fitoplanctônica. Para isso utilizou-se dos valores climatológicos de ZEU e PCM e do método de comparação pareada (AHP) considerando os seguintes aspectos (Tabela 2).

Tabela 2: Critérios avaliados na comparação AHP e os respectivos pesos atribuídos aos critérios de variabilidade fitoplanctônica.

Critério	Peso		Critério
PCM HYCOM	3	Algo Melhor	PCM FNMOC
ZEULee	2	Um Pouco Melhor	ZEUMorel
Razão de consistência = 0,08			

A atribuição dos pesos nas imagens climatológicas foi baseada nas correlações obtidas na seção 3.3 deste capítulo. A razão de consistência entre as comparações foi de 0,08 e foi um fator limitante para não impor maiores pesos sobre cada critério. A análise AHP gerou os seguintes pesos para cada critério (Tabela 3).

Tabela 3: Pesos atribuídos a cada critério pelo método AHP.

Pesos a ser aplicados	
PCM HYCOM	0,325
PCM FNMOC	0,186
ZEULee	0,285
ZEUMorel	0,203

3.5. Potencialidade da Biomassa Fitoplanctônica

Utilizando dos pesos da Tabela 3 aplicados para a imagem climatológica de cada atributo foi gerada uma grade e imagem de potencialidade da biomassa fitoplanctônica. A primeira foi gerada utilizando os 4 critérios e respectivos pesos (Figura 22) e a segunda foi criada utilizando somente as imagens climatológicas de PCM HYCOM e ZEULee (Figura 23).

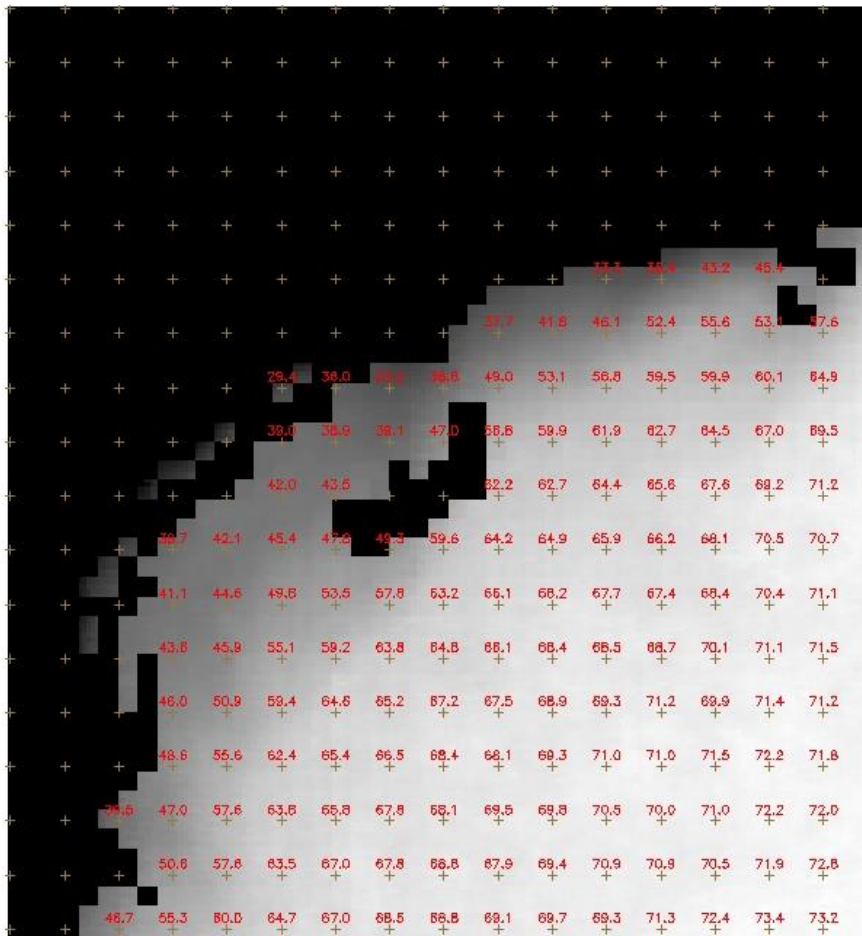


Figura 22: Grade gerada da potencialidade da biomassa fitoplanctônica baseada na soma de todos os critérios (HYCOM, FNMOC, ZEU_{Lev} , ZEU_{Morel}) e respectivos pesos.

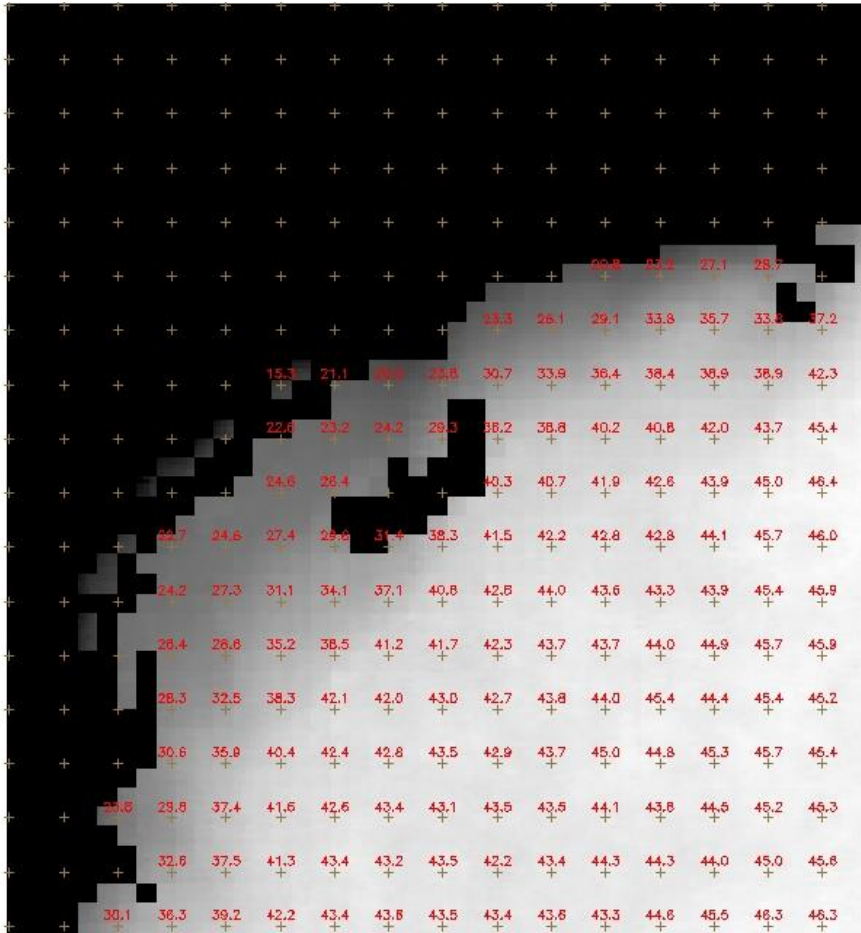


Figura 23: Grade gerada da potencialidade da biomassa fitoplanctônica baseada na soma dos atributos considerados mais influentes (HYCOM, ZEU_{Lee}) e respectivos pesos.

Pelas Figuras 22 e 23, pode-se observar os menores valores na PS, como era esperado pela influência da pluma do rio da Plata na região. Em seguida os valores da grade indicam que a região da PN tem a biomassa fitoplanctônica mais influenciada pela PCM e ZEU com valores intermediários. Esta dispersão pode estar relacionada à intrusão e ressurgência da ACAS nesta região da PN.

Os maiores valores de potencialidade baseados na PCM e ZEU estão na região oceânica, que depende exclusivamente da PCM para a disponibilidade de nutrientes na zona eufótica.

Estas ponderações podem ser acrescentadas a algoritmos locais e auxiliar no monitoramento da Bacia de Santos.

4. Conclusões

A maior riqueza planctônica ocorre na zona costeira da região. A ACAS, quando atinge a superfície, tem pouco fitoplâncton, mas logo os nutrientes e a luz proporcionam o desenvolvimento desses organismos.

Na região de oceano aberto, a profundidade da camada eufótica é maior, mas os nutrientes estão disponíveis em massas de água mais profundas e frias, posicionadas a 200-300 m de profundidade na região. Dessa forma, ao longo do verão a estratificação da coluna d'água e a indisponibilidade de nutrientes onde a luz penetra diminui o potencial de produção primária e, conseqüentemente, a biomassa fitoplanctônica. Ao longo do inverno e meses mais frios, a queda na temperatura e os eventos mais extremos disponibilizam os nutrientes do fundo para regiões mais superficiais, onde a camada eufótica favorece o aumento da biomassa fitoplanctônica. Esses eventos de mistura estão relacionados ao aumento da profundidade da camada de mistura.

Cabe questionar se as estimativas de CSM por satélite são confiáveis na área de interesse. Trabalhos anteriores realizaram comparações com medidas *in situ*.

Segundo estudos realizados por outros autores (BRANDINI,1990; AIDAR et al., 1993; GAETA, 1999; KAMPEL, 2003), a biomassa fitoplanctônica na superfície em termos de clorofila-*a* é comparativamente maior no inverno do que no verão. Porém, este efeito só pode ocorrer quando a área oceânica, oligotrófica no inverno, por meio da PCM recebe nutrientes suficientes provenientes de processos de convergência de massas de água.

Apesar das diferenças de magnitude entre os valores de clorofila na plataforma e no talude, as respectivas séries temporais apresentam evidente sazonalidade e correlação, isto é, variam em fase. De modo geral, os valores de CSM são mais altos na região de plataforma, como esperado.

Trabalhos anteriores sugeriram uma influência da pluma do rio de La Plata sobre a plataforma continental, com o aporte de nutrientes e o incremento na biomassa fitoplanctônica durante o inverno (PIOLA et al., 2008; MOLLER et al., 2008). Entretanto, esta influência pode apresentar variabilidade na PCM observada somente pelo modelo FNMOC de relativa importância no potencial fitoplanctônico. Portanto, a

escolha correta do modelo de PCM na região da Plataforma Sul deve ser vista com mais detalhe. De uma forma geral, os valores estimados pelo HYCOM para a região oceânica e plataforma parecem correlacionarem melhor com valores de campo.

As concentrações de clorofila-*a* na plataforma são variáveis e aparentemente independentes da estação do ano (GAETA, 1999). Estão relacionadas com mudanças locais no vento, principalmente na região norte da plataforma sudeste próximo a Cabo Frio. Conforme avançamos à plataforma externa e oceano aberto observamos a profundidade da camada de mistura ponderando o crescimento da biomassa do fitoplâncton.

Nos meses de inverno a ZEU_{Lee} diminuiu e alcançou valores inferiores que os observados pela ZEU_{Morel} . Isso pode estar relacionado ao fato da presença do rio La Plata na plataforma e região adjacente em oceano aberto que disponibiliza maiores concentrações de constituintes ópticos utilizados no modelo ZEU_{Lee} . Também, por este motivo das variáveis utilizadas nos modelos, em águas oligotróficas o ZEU_{Lee} estima profundidades eufóticas além das observadas em trabalhos com medidas *in situ*. As variações mensais da ZEU são similares na plataforma e no talude. A mesma similaridade entre plataforma e talude também ocorre inversamente na variabilidade da PCM. Analisando conjuntamente com a variação anual média da CSM, percebe-se uma associação entre o período de máxima clorofila com o aprofundamento da camada de mistura, ao mesmo tempo em que se observa uma diminuição da profundidade da zona eufótica.

Sugere-se, com base nos resultados preliminares deste trabalho, que se utilize os dados de zona eufótica baseados em Lee et al., (2007), para a região oceânica, Morel et al., (2007) para região da plataforma. Para as estimativas de profundidade da camada de mistura o HYCOM apresentou melhor resultado com excessão na região PN, onde o algoritmo FNMOS observou a pluma do rio da Plata e o HYCOM não observou. Estudos direcionados para esta região de estudo deve-se basear nos dados FNMOC. Para uma análise global, utilizar o algoritmo ZEU_{Lee} e o HYCOM se obterá resultados mais robustos.

As análises de PCM e Zeu são o início de uma tentativa de alcançar um desafio maior na oceanografia biológica que consiste em tentar compreender a estrutura e o

funcionamento do ecossistema marinho no espaço tridimensional do meio aquático. Dessa forma acrescentar à modelos de cor do oceano uma componente bio-física.

A avaliação da ponderação e distribuição espacial na Bacia de Santos mostraram uma boa relação com a literatura e a utilização desde procedimento pode auxiliar no desempenho de algoritmos regionais de biomassa fitoplanctônica.

5. Perspectivas Futuras

Este trabalho foi uma introdução ao tema com o uso de alguns processamentos de banco de dados. Seus resultados serão mais consistentes quando possível avaliar dados in situ com as estimativas orbitais. Com o aumento da série de dados poderá se aperfeiçoar as técnicas de avaliação e acrescentar novos produtos “secundários” desta teoria que são a temperatura da superfície do mar e a radiação fotossinteticamente ativa.

Poder refinar as malhas e melhorar a resolução espacial dos dados de PCM, juntamente com a intrusão de valores em locais onde há vazios na imagem.

6. Referências Bibliográficas

- AIDAR, E.; GAETA, S. A.; GIANESELLA-GALVÃO, S. M. F.; KUTNER, M. B. B.; TEIXEIRA, C. Ecossistema costeiro subtropical: nutrientes dissolvidos, fitoplâncton e clorofila-a e suas relações com as condições oceanográficas na região de Ubatuba, SP. 1993. **Publicação Esp. Inst. Oceanogr., S Paulo.** v.10, p.9-43.
- BRANDINI, F. P. Hydrography and characteristics of the phytoplankton in shelf and oceanic waters off southeastern Brazil during winter (July/August 1982) and summer (February/March 1984). 1990. **Hydrobiologia.** v.196, p.111-148.
- CASTRO, B. D.; LORENZZETTI, J. A.; SILVEIRA, I. D.; MIRANDA, L. D. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). 2006. In: ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. D. B.; MADUREIRA, L. (eds.), O ambiente oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil, p.11-120, **São Paulo, EDUSP,** 466p.
- CLANCY, R. M.; SADLER, W. D. The Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center suite of oceanographic models and products. 1992. **Weather and Forecasting.** v.7, p.307-27.
- GAETA, S. A. Produção primária na região oeste do Atlântico Sul. 1999. **Tese de Livre Docência.** Instituto Oceanográfico. São Paulo, Univ. São Paulo. 140p.

- GAETA, S. A.; BRANDINI, F. P. 2006. Produção primária do fitoplâncton marinho na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: ROSSI-WONGTSCHOWSKI, C. L. B.; MADUREIRA, L. S.P. (org.), O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do Talude na Região Sudeste-Sul do Brasil, p.219-264, São Paulo, EDUSP, p.465.
- HENSON, S. A.; ROBINSON, I.; ALLEN, J. T.; WANIEK, J. Effect of meteorological conditions on interannual variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Irminger Basin, North Atlantic. 2006. **Deep-Sea Research**. v.53, p.1601-1615.
- HENSON, S. A.; DUNNE, J. P.; SARMIENTO, J. L. Decadal variability in North Atlantic phytoplankton blooms. 2009. **J. Geophys. Res.**, v.114, C04013.
- Kampel, M. 2002. Sensoriamento remoto aplicado à oceanografia. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/capitulo_6.pdf> Acesso em: 10 de junho de 2012.
- KAMPEL, M. Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados in situ na costa sudeste brasileira. 2003. **Tese de Doutorado do Instituto Oceanográfico**, Universidade de São Paulo, p.311.
- KIRK, J. T. O. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. 1994. **Cambridge Univ. Press**, New York.
- KOEVE, W. Wintertime nutrients in the North Atlantic – New approaches and implications for new production estimates. 2001. **Mar. Chem.**, v.74, p.245-260.
- LEE, Z.; WEIDEMANN, A.; KINDLE, J.; ARMONE, R.; CARDER, K. L.; DAVIS, C. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing. 2007. **J. Geophys. Res.** v.112, C03009.
- LUTZ, M. J.; CALDEIRA, K.; DUNBAR, R.B.; BEHRENFELD, M. J. Seasonal rhythms of net primary production and particulate organic carbon flux to depth describe the efficiency of biological pump in the global ocean. 2007. **J. Geophys. Res.**, v.112, C10011.
- MOLLER, O. O.; PIOLA, A. R.; FREITAS, A. C., CAMPOS, E. J. D. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. 2008. **Continental Shelf Research**. v.28, n.13, p.1607-1624.
- MOREL, A.; HUOT, Y.; GENTILI, B.; WERDELL, P. J.; HOOKER, S. B.; FRANZ, B. A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. 2007. **Remote Sensing of Environment**, v.111(1), p.69-88.
- O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; O'BRIEN, M. C.; SIEGEL, D. A.; TOOLE, D.; MENZIES, D.; SMITH, R. C.; MUELLER, J. L.; MITCHELL, B. G.; KAHRU, M.; CARDER, K. L.; HARDING, L.; MAGNUSON, A.; PHINNEY, D.; CULVER, M. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part3, v.11. 2000. **NASA Technical Memorandum-SeaWiFS Postlaunch Technical Report Series**, p.1-49.
- PIOLA, A. R.; ROMERO, S. I.; ZAJACZKOVSKI, U. Space-time variability of the Plata plume inferred from ocean color. 2008. **Continental Shelf Research**. v.28, n.13, p.1556-1567.

PLATT, T.; FUENTES-YACO, C.; FRANK, K. T. Spring algal bloom and larval fish survival. 2003. **Nature**, v.423, p.398-399.

SANTOS, J. F. C. Análise da reflectância marinha na região costeira de Ubatuba, litoral norte de São Paulo. 2011. **Relatório de Iniciação Científica CNPQ/PIBIQ – INPE**.