Camilla Bonatto Bellini

Variabilidade de alta frequência temporal da clorofila-*a* e sua relação com o campo de ventos e marés no canal de São Sebastião/SP

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Biológica

Orientador: Prof.ª Dr.ª Áurea Maria Ciotti

São Paulo

2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

Variabilidade de alta frequência temporal da clorofila-*a* e sua relação com o campo de ventos e marés no canal de São Sebastião/SP

CAMILLA BONATTO BELLINI

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Biológica.

Julgada em ____/____/____

_____	_____
Prof[a]. Dr.[a] Áurea Maria Ciotti	Conceito
_____	_____
Prof(a). Dr(a).	Conceito
_____	_____
Prof(a). Dr(a).	Conceito

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS IV
LISTA DE TABELAS IX
LISTA DE APÊNDICES X
LISTA DE ANEXOS XI
AGRADECIMENTOS XIII
RESUMO XVI
ABSTRACT XVII
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVOS 5
2 ÁREA DE ESTUDO E HIPÓTESES 6
3 MATERIAL E MÉTODOS 9
3.1 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS 9
3.2 PROCESSAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS 11
3.3 CORREÇÃO DOS VALORES DE FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA-*A* 13
3.3.1 Correção pelo MODC 13
3.3.2 Correção pela temperatura 16
3.3.3 Correção pela irradiância 18
3.4 QUALIDADE ÓTICA DA ÁGUA 19
3.5 VARIAÇÃO MENSAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*A* 20
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 20
4 RESULTADOS 23
4.1 CONSISTÊNCIA DOS DADOS DA BOIA SIMCOSTA 23
4.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL 26
4.2.1 Variáveis meteoceanográficas 27
4.2.2 Variação da concentração de clorofila-*a* 33
4.2.3 Variação da turbidez 37
4.2.4 Análise dos dados de ventos 40
4.2.5 Análise dos dados de marés 53
4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES ÓTICAS INERENTES 58
4.3.1 Contribuição relativa na absorção de luz por cada componente ótico 59
4.3.2 Magnitude da absorção da luz pelos componentes óticos 61
4.3.3 Comportamento espectral dos componentes óticos 67

4.3.4 Relação dos componentes óticos com variáveis ambientais 71
4.4 VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*A* AO LONGO DO ANO...77
5 DISCUSSÃO 82
5.1 VARIABILIDADE DA CLOROFILA-*A* COM AS MARÉS.....82
5.2 RELAÇÕES ENTRE OS COMPONENTES ÓTICOS E OS VENTOS.....84
5.3 EVENTOS DE ACÚMULO E DIMINUIÇÃO DA BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA 86
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 89
REFERÊNCIAS.....90
APÊNDICES 100
ANEXOS 113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da costa sudeste brasileira e da localização do Canal de São Sebastião, onde se encontra fundeada a boia meteoceanográfica SiMCosta 6
Figura 2 – Boia meteoceanográfica SiMCosta fundeada no Canal de São Sebastião 9
Figura 3 – Razões entre as concentrações de clorofila-a medidas da boia SiMCosta, CTD, AU e Trilogy. 13
Figura 4 – Relação entre a absorção de luz pelo material orgânico dissolvido colorido (aMODC_443nm) medido no WPI e pelo branco da fluorescência natural medido no AU. Equação da reta e coeficiente de correlação no gráfico.....15
Figura 5 – Correlação entre as concentrações de clorofila-*a* (mg/m³) medidas no Trilogy (eixo x) e as fluorescências de clorofila-*a* medidas na boia SiMCosta (eixo y) 16
Figura 6 – Regressão linear da temperatura da água (eixo x) e da razão entre as fluorescências de clorofila-*a* (medidas na boia SiMCosta e no fluorímetro de bancada AU) (eixo y) 17
Figura 7 – Observações horárias da fluorescência da clorofila-*a* medida na boia SiMCosta (UR) (eixo y) com o respectivo valor de PAR (µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$) (eixo x) a um metro de profundidade 19
Figura 8 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): temperatura da água (T°) 23
Figura 9 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): salinidade.....24
Figura 10 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): turbidez (NTU) 25
Figura 11 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): fluorescência de clorofila-a (µg/l).....26
Figura 12 – Radiação solar média diária (Wm²) no primeiro bloco analisado 28
Figura 13 – Radiação solar média diária (Wm²) no segundo bloco analisado 28
Figura 14 – Precipitação pluviométrica (mm/h) média no primeiro bloco analisado..29
Figura 15 – Precipitação pluviométrica (mm/h) média no segundo bloco analisado.29
Figura 16 – Temperatura média diária da água do mar (°C) no primeiro bloco analisado 30

Figura 17 – Temperatura média diária da água do mar (°C) no segundo bloco analisado 31
Figura 18 – Salinidade média diária da água do mar no primeiro bloco analisado ... 32
Figura 19 – Salinidade média diária da água do mar no segundo bloco analisado .. 32
Figura 20 – Médias diárias de temperatura e salinidade (Diagrama TS) para os dois blocos analisados 33
Figura 21 – Relação entre os valores da concentração de clorofila-*a* extraída (mg/m^{-3}) e a fluorescência de clorofila-*a* da boia SiMCosta (µg/l) 34
Figura 22 – Concentração média horária da clorofila-*a* (mg/m^{-3}) no primeiro bloco analisado 35
Figura 23 – Concentração média horária da clorofila-*a* (mg/m^{-3}) no segundo bloco analisado 35
Figura 24 – Análise espectral da concentração média horária de clorofila-a no primeiro bloco analisado 36
Figura 25 – Análise espectral da concentração média horária de clorofila-a no segundo bloco analisado 37
Figura 26 – Turbidez média horária (NTU) no primeiro bloco analisado 38
Figura 27 – Turbidez média horária (NTU) no segundo bloco analisado 38
Figura 28 – Análise espectral da turbidez média horária do primeiro bloco analisado 39
Figura 29 – Análise espectral da turbidez média horária do segundo bloco analisado 40
Figura 30 – Velocidade (Km/h), direção (0-360°) e frequência de ocorrência (círculos pontilhados) dos ventos no primeiro bloco analisado 41
Figura 31 – Velocidade (Km/h), direção (0-360°) e frequência de ocorrência (círculos pontilhados) dos ventos no segundo bloco analisado 42
Figura 32 – Correlação entre a velocidade (Km/h) e direção (°) média horária do vento no primeiro bloco analisado 43
Figura 33 – Correlação entre a velocidade (Km/h) e direção (°) média horária do vento no segundo bloco analisado 43
Figura 34 – Análise espectral da magnitude média horária da velocidade do vento (W) do primeiro bloco analisado 44
Figura 35 – Análise espectral da magnitude média horária da velocidade do vento (W) do segundo bloco analisado 45

Figura 36 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da velocidade do vento e concentração de clorofila-*a* do primeiro bloco analisado.....46
Figura 37 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da velocidade do vento e concentração de clorofila-*a* do segundo bloco analisado.....47
Figura 38 – Componente u (zonal) do vento do primeiro bloco analisado 48
Figura 39 – Componente v (meridional) do vento do primeiro bloco analisado.....48
Figura 40 – Componente u (zonal) do vento do segundo bloco analisado.....49
Figura 41 – Componente v (meridional) do vento do segundo bloco analisado.....49
Figura 42 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente zonal e da concentração de clorofila-*a* durante o primeiro bloco analisado.....50
Figura 43 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente meridional e da concentração de clorofila-*a* durante o primeiro bloco analisado 51
Figura 44 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente zonal e da concentração de clorofila-*a* durante o segundo bloco analisado.....52
Figura 45 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente meridional e da concentração de clorofila-a durante o segundo bloco analisado 53
Figura 46 – Altura da maré (m) no primeiro bloco analisado.....54
Figura 47 – Altura da maré (m) no segundo bloco analisado.....55
Figura 48 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da altura da maré e da concentração de clorofila-*a* do primeiro bloco analisado.....56
Figura 49 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da altura da maré e da concentração de clorofila-*a* do segundo bloco analisado.....57
Figura 50 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da altura da maré e da concentração de clorofila-*a* do dia 21 de dezembro de 2014 a 28 de dezembro de 2015 58
Figura 51 – Contribuições óticas em cada dia do primeiro bloco de dados analisados 59
Figura 52 – Contribuições óticas integradas do primeiro bloco de dados analisados 60
Figura 53 – Contribuições óticas em cada dia do segundo bloco de dados analisados 60
Figura 54– Contribuições óticas integradas do segundo bloco de dados analisados61
Figura 55 – Variação temporal da absorção do material particulado, a_p (443), durante o primeiro bloco analisado 62

Figura 56 – Variação temporal da absorção do material particulado, a_p (443), durante o segundo bloco analisado 62
Figura 57 – Variação temporal do coeficente de absorção de luz do fitoplâncton médio entre 400 e 700 nm, <aph>, durante o primeiro bloco analisado 63
Figura 58 – Variação temporal do coeficente de absorção de luz do fitoplâncton médio entre 400 e 700 nm, <aph>, durante o segundo bloco analisado 64
Figura 59 – Variação temporal do coeficente de absorção de luz dos detritos, adet (443), durante o primeiro bloco analisado 65
Figura 60 – Variação temporal da absorção dos detritos, adet (443), durante o segundo bloco analisado 65
Figura 61 – Variação temporal da absorção do material orgânico dissolvido colorido (a_{MODC} (443)) durante o primeiro bloco analisado 66
Figura 62 – Variação temporal da absorção do material orgânico dissolvido colorido (a_{MODC} (443)) durante o segundo bloco analisado 67
Figura 63 – Variação espectral da absorção de luz pelo MODC no primeiro bloco analisado 68
Figura 64 – Variação espectral da absorção de luz pelo MODC no segundo bloco analisado 68
Figura 65 – Variação espectral da absorção de luz pelos detritos no primeiro bloco analisado 69
Figura 66 – Variação espectral da absorção de luz pelos detritos no segundo bloco analisado 69
Figura 67 – Variação espectral da absorção de luz pelo fitoplâncton no primeiro bloco analisado 70
Figura 68 – Variação espectral da absorção de luz pelo fitoplâncton no segundo bloco analisado 71
Figura 69 − Relação entre a magnitude da absorção de luz pelo material particulado, a_p (443), com o componente zonal do vento 72
Figura 70 − Relação entre a magnitude da absorção de luz pelo material particulado, a_p (443), com o componente meridional do vento 72
Figura 71 − Relação entre a magnitude da absorção de luz detritos, a_{det} (443), com o componente zonal do vento 73
Figura 72 − Relação entre a magnitude da absorção de luz detritos, a_{det} (443), com o componente meridional do vento 73

Figura 73 – Relação entre a magnitude da absorção de luz do MODC, a_{MODC} (443), com o componente zonal do vento.....74
Figura 74 – Relação entre a magnitude da absorção de luz do MODC, a_{MODC} (443), com o componente meridional do vento.....75
Figura 75 – Relação entre a magnitude da absorção de luz fitoplâncton, <aph>, com o componente zonal do vento 76
Figura 76 – Relação entre a magnitude da absorção de luz fitoplâncton, <aph>, com o componente meridional do vento 76
Figura 77 – Relação entre a magnitude da absorção de luz pelo MODC e a salinidade 77
Figura 78 – Série temporal da média horária noturna da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* (mg/m-3) entre abril e dezembro de 2015.....78
Figura 79 – Análise espectral da média horária noturna da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* entre abril e dezembro de 2015.....79
Figura 80 – Série temporal da média horária da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* entre abril e dezembro de 2015, com destaque para o valor da mediana e para os eventos de aumento e de diminuição da biomassa fitoplanctônica. 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística descritiva das variáveis meteorológicas e oceanográficas diárias dos dois blocos analisados. Diferenças significativas estão indicadas em negrito....27
Tabela 2 − Médias mensais da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* (mg/m^{-3}) entre os meses de abril e novembro de 2015 considerando a série original (1ª coluna), excluindo os eventos acima de 1,50 mg/m^{-3} (2ª coluna) e excluindo os eventos abaixo de 0,50 mg/m^{-3} (3ª coluna) 81

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Relação entre a absorção de luz pelo material orgânico dissolvido colorido (aMODC_443nm) medido no WPI e MODC medido na boia SiMCosta 101

Apêndice B – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da turbidez e concentração de clorofila-*a* durante uma semana com maré de sizígia.....102

Apêndice C – Perfil vertical de CTD com a profundidade mostrando um aumento da corofila-a em subsuperfície.....103

Apêndice D – Análise espectral da temperatura da água (°C) horária medida por meio da boia SiMCosta (Figura A) e dos tidbits presos à corrente da boia em seis metros (Figura B) e em oito metros (Figura C).....104

Apêndice E – Box-plots comparando as diferentes concentrações médias horárias de clorofila-*a* obtidas pela boia SiMCosta durante dezembro de 2014 a abril de 2015, e as marés de sizígia e quadratura (p=0,000).....107

Apêndice F – Implicações para o Monitoramento Marinho 108

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Projeto SiMCosta 115

À minha mãe, que, apesar de todas as dificuldades, nunca me deixou faltar o essencial, e à memória de meu pai, que, mesmo não sendo um homem muito afetivo, sempre me apontou passinhos…

AGRADECIMENTOS

Há uma frase em latim que explica muita coisa, *Vincit, qui se vincit*, e que traduzida seria algo como: vence quem se vence. Eu não venceria essa etapa sem a ajuda de cada uma dessas pessoas. A ajuda de vocês vai muito além desta dissertação.

Agradeço ao CNPq pela bolsa concedida, ao IO da Universidade de São Paulo e aos seus funcionários, que, mesmo distantes, me auxiliaram.

Ao CEBIMar que me abrigou e me ofereceu toda a estrutura física e humana para a elaboração do meu trabalho, permitindo minha integração em um centro de estudos de qualidade, que cada dia mais contribui para minha formação acadêmica e científica.

Aos funcionários do CEBIMar, que estiveram presentes e se mostraram solícitos a nos ajudar. Aos técnicos dessa instituição, principalmente ao Elso e Zé, que possuem aquele conhecimento sobre o mar que vai muito além dos livros de oceanografia e meteorologia, meu eterno reconhecimento e obrigada por sempre passarem segurança durante as saídas de campo. ‘Chefe’ Elso, sua hospitalidade com a gente foi tocante: obrigada pelas conversas e pelo amparo.

À orientação da Áurea Ciotti, expresso meu profundo reconhecimento pela paciência, pela orientação e pelo apoio incondicional que muito elevaram meu desejo de querer, sempre, aprender mais, somado à vontade constante de fazer o melhor.

A toda a equipe Aquarela, que me ofereceu abrigo e me fez lar. Monte, dupla de muitos mergulhos, obrigada pelos ensinamentos, pela paciência com quem estava começando e pela amizade que se formou. Independentemente da distância, o laboratório Aquarela ainda carrega um tanto da sua essência. Pedro Serrão, obrigada pelo auxílio durante as coletas e pelo companheirismo fora da água. Bibi, seu apoio foi imensurável durante esse período, obrigada por se fazer presente mesmo distante, dando amparo e força, principalmente na pior fase das nossas vidas. Bis, companheira de copo e de cruz, sempre à esquerda me ensinando a endurecer sem perder a ternura. Caju, obrigada por compartilhar sua popularidade, seu conhecimento e suas histórias engraçadas, sua presença sempre foi contagiante. Alê, obrigada pela sua solicitude e pelos abraços, pelas ajudas intelectuais e pela presença durante os momentos difíceis. Sebastian, obrigada pela indispensável ajuda nas análises pesadas. E, por fim, a Amabile, que muitas vezes serviu de leme, estando sempre presente para me colocar de volta ao rumo, muito obrigada pelo suporte, pela

mansidão, pela ajuda sem fim e pela amizade: espero um dia retribuir à altura tudo o que fez por mim.

Aos amigos do CEBIMar, obrigada por tornarem os dias mais leves e a rotina menos dura: Rafael Duarte, Paula Kasten, Karine Nascimento, Andréia Barbosa, Aurore de Gioux, Mariana Frias, Bruna Luz, Soledad e Serginho. Agradeço aos amigos de fora que contribuíram com trabalho: Vera Azevedo, Matheus Chuqui e Juliana Marson. E pela ternura, pelo suporte e pela força a mim prestados, agradeço a: Nathalia Ramos, Daniela Frohlich, Natália Braun, Vitória Chaves, Laura Tomé, Aninha Domingos, Cristina Yokaichiya, Daniel Arbix, Mônica Dranger, Carlos Dranger e a tantos outros que me lembram de que quem tem um amigo, não importando onde se encontre, por mais que a saudade muitas vezes nos castigue, jamais estará só.

Às meninas superpoderosas do SiMCosta: Marília Wally, Nayara Bucair e especialmente à Ella Pereira, com quem aprendi a ser mais forte. Obrigada por estar presente nos momentos mais difíceis e pelos mantras de que ‘tudo vai dar certo, você não está sozinha’; você não imagina o poder que essas palavras fizeram. Agradeço, também, a oportunidade oferecida de me acolher na equipe SiMCosta. Reconheço, com gratidão, não só a confiança que em mim depositou desde o início, mas também o sentido de responsabilidade que me persuadiu em todas as fases do Projeto, com o qual espero continuar por mais uns bons tempos.

À minha mãe Inês e à minha irmã Karina, por serem a base de tudo e por sempre apoiarem minhas escolhas, mesmo que a grande maioria delas impliquem ausências. Encontramos ainda mais união e força no último ano, após nossa maior perda. A força e coragem que carrego vem da segurança do amor que vocês me dão.

À Júlia Dranger, por ser meu porto seguro durante anos e ter sido a melhor companhia que eu poderia ter tido em tantas aventuras e histórias. Grande parte do que sou, devo a ti. Obrigada por estar sempre ao meu lado lutando comigo e nunca me concedendo descansar, me dando abrigo, conforto, carinho, atenção, serenidade, paz e amor. Quando olho para trás eu não conto os anos, simplesmente vejo os momentos importantes e parece que você sempre esteve, de alguma forma, por perto. Desde sempre e para sempre.

"É do buscar e não achar que nasce o que eu não conhecia ".

A Paixão Segundo G. H. – Clarice Lispector

RESUMO

Em ambientes costeiros, a variabilidade da biomassa de fitoplâncton é dirigida por forçantes físicas locais que apresentam distintas escalas temporais em ocorrência, intensidade e durabilidade. No canal de São Sebastião, ambiente advectivo, parte-se do pressuposto de que qualquer adição da biomassa de fitoplâncton não se deve ao crescimento local, mas ao transporte de células fitoplanctônicas movidas pelas correntes guiadas a ventos e marés. Dessa maneira, o objetivo central deste trabalho é analisar a variabilidade em alta frequência das variações da biomassa fitoplanctônica e investigar suas relações temporais com a intensidade e direção dos ventos e a amplitude das marés. Em média, o acúmulo de clorofila é estável no tempo, com curtos episódios de lento aumento e diminuições bruscas da biomassa fitoplanctônica, sendo os valores encontrados relativamente baixos, característicos de ambientes oligomesotróficos. Análises espectrais da série temporal da concentração de clorofila-*a* e da altura da maré revelaram alta correlação entre as duas séries durante as marés de sizígia, com periodicidades de aproximadamente 12 e 24 horas. Em relação à direção e intensidade do vento, o espectro cruzado de ondaletas apresentou áreas de forte correlação com a clorofila-*a* e periodicidades dominantes de três dias. Além disso, observou-se que ventos vindos do quadrante norte/nordeste carregam águas com maiores concentrações de materiais particulados ou detritos.

Palavras-chave: fluorescência de clorofila-*a*, variabilidade de curta escala temporal, ambiente advectivo, ventos, marés, canal de São Sebastião, Projeto SiMCosta.

ABSTRACT

In coastal environments, the dynamics of phytoplankton biomass is driven by local physical forcings that have different time scales in occurrence, intensity and durability. For being an advective environment, it is normally assumed that any positive change in phytoplankton biomass in the São Sebastião Channel is not due to local growth, but to the transport of phytoplankton cells moved by currents associated with winds and tides. Thus, the main objective of this project is to analyze the variability in high-frequency variations of the phytoplankton biomass and investigate their temporal relationships with intensity and direction of winds and high tides. On average, the chlorophyll accumulation is stable over time, with short episodes of slow rise and sudden decreases of phytoplankton biomass and relatively low values, characteristic of oligo-mesotrophic environments. Spectral analysis of the time series of chlorophyll a concentration and tide height showed a high correlation between the two series during the spring tides, and dominant periodicities of about 12 to 24 hours. Regarding direction and intensity of the wind, the cross wavelet spectrum presented strong correlation areas with chlorophyll a and dominant periodicities of 3 days. In addition, it was observed that winds from the north/northeast quadrant carry water with higher concentrations of particulate matter or debris.

Keywords: chlorophyll-*a* fluorescence, short-time scale variability, coastal waters, advective environment, winds, tides, São Sebastião channel, SiMCosta Project.

1 INTRODUÇÃO

O entendimento sobre o funcionamento dos ecossistemas marinhos começa com aquele sobre o fitoplâncton, devido ao seu papel fundamental como produtor primário na teia alimentar marinha, além de sua importante contribuição no ciclo do carbono global. Nesse sentido, compreender a variabilidade temporal da biomassa e a composição da comunidade de fitoplâncton tem sido um dos focos centrais na ecologia marinha (STEELE; HENDERSON, 1981), todavia, para investigar tal variabilidade, o tempo de geração dos organismos deve ser considerado em relação às escalas de tempo das flutuações ambientais (HARRIS, 1986; WANG; HSU; KUO, 2004).

Em regiões costeiras, alterações na composição de espécies e fisiologia das comunidades de fitoplâncton podem ocorrer em escalas reduzidas de tempo, em resposta às variações de fatores físicos como temperatura e salinidade, à injeção de nutrientes e a alterações na disponibilidade de luz (HAYS; RICHARDSON; ROBINSON, 2005). Enquanto o ciclo de marés e a velocidade e direção do vento local impõem variabilidade ao fitoplâncton em escala de horas a dias (e.g., ABREU et al., 2010; BRICEÑO; BOYER, 2010), vazão de rios, taxas de precipitação e eutrofização controlam as alterações que ocorrem em longo prazo, sejam mensais, sazonais ou interanuais (CLOERN, 1996; HARDING; PERRY, 1997; JASSBY; CLOERN; COLE, 2002). Portanto, entender a variabilidade do acúmulo e perda da biomassa fitoplanctônica em pequenas escalas temporais, assim como as causas e consequências dessa variabilidade, é a chave para buscar uma melhor compreensão sobre o funcionamento de um ambiente tão dinâmico como as regiões costeiras marinhas.

Uma série de processos biológicos tem sido reportados como dependentes da variabilidade de biomassa do fitoplâncton em ambientes costeiros, como por exemplo, em costões rochosos, onde as comunidades marinhas que ali habitam são afetadas por processos oceanográficos. Esses processos influenciam as interações ecológicas, como as taxas de recrutamento, a qual, por sua vez, regulam a variabilidade dessas comunidades marinhas. Mazzuco (2015) destacou a importância dos fenômenos oceano-climáticos na previsão de tendências espaço-temporais do recrutamento de larvas de invertebrados em costões rochosos no sudeste do Brasil. A autora concluiu que processos oceanográficos impulsionados pelos ventos podem

afetar a abundância de larvas de cracas em águas costeiras, tendo consequência na variabilidade do recrutamento, mostrando que flutuações climáticas podem ter efeitos contrastantes nas comunidades de costões rochosos, por exemplo.

A maior parte do entendimento acerca da dinâmica fitoplanctônica (i.e., a variabilidade em biomassa e composição específica) em águas costeiras derivou do monitoramento, por décadas, de estuários e ambientes temperados no hemisfério norte (e.g., CLOERN; JASSBY, 2010; ZINGONE; PHLIPS; HARRISON, 2010). Em regiões temperadas, espera-se um padrão sazonal regular e suficientemente previsível de aumento da biomassa fitoplanctônica durante a primavera (CLOERN, 1996), ocasionado por ciclos anuais de temperatura e irradiância (SINCLAIR; SUBBA RAO; COUTURE, 1981), sendo a variabilidade sazonal na descarga de rios (MALONE, 1988) importante em alguns locais. Já em ambientes subtropicais e tropicais, os fatores que controlam o acúmulo e perda da biomassa de fitoplâncton não apresentam um padrão previsível no tempo (LONGHURST, 1998). Nesses ambientes, a dinâmica do fitoplâncton é dirigida por forçantes físicas locais que apresentam distintas escalas temporais de ocorrência, intensidade e durabilidade (e.g., SINCLAIR; SUBBA RAO; COUTURE, 1981; CLOERN, 1996; ABREU et al., 2010); por sua vez, a amplitude da variabilidade de curta escala de tempo pode se assemelhar àquela ocorrida em longas escalas, como semanal e mensal (HARRIS, 1986).

Em regiões costeiras mesoligotróficas e oligotróficas, a diminuição e acúmulo de biomassa de fitoplâncton ainda é insuficientemente explorada na literatura (LESTER et al., 2000; HEIL et al., 2001; CARLSON; DUCKLOW; SLEETER, 1996) e pouco compreendida. Estudos prévios realizados na área de estudo do presente trabalho mostraram baixas concentrações de nutrientes inorgânicos dissolvidos, devido ao reduzido escoamento continental somado às características das massas de água que entram no Canal de São Sebastião (CSS), caracterizando a região como mesoligotrófica (SALDANHA-CORRÊA; GIANESELLA, 2008) durante algumas campanhas de campo, relativamente espaçadas no tempo. A dinâmica da biomassa fitoplanctônica varia com forçantes físicas locais, sendo as metodologias tradicionais de coletas sistemáticas de dados, com uma periodicidade definida, insuficientes para acompanhar as variações em pequenas escalas temporais, como, por exemplo, em

horas e dias, das comunidades de fitoplâncton (e.g., SINCLAIR; SUBBA RAO; COUTURE, 1981; CLOERN; JASSBY, 2010; ZINGONE et al., 2010).

Na verdade, acompanhar o acúmulo e a diminuição da biomassa de fitoplâncton em pequenas escalas temporais não é algo trivial, principalmente pela dificuldade logística de analisar amostras de fitoplâncton em intervalos de tempo dentro dos quais as alterações ainda estejam ocorrendo. Em águas oligotróficas, comumente observadas em ambientes oceânicos subtropicais e tropicais, geralmente existe um acoplamento entre o aumento da população fitoplanctônica e da herbivoria sobre esta população (BANSE, 1998), resultando em baixas taxas de acréscimo em biomassa (EPPLEY, 1980; CULLEN et al., 2002; MARAÑÓN, 2005). A manutenção dos acúmulos fitoplanctônicos depende, assim, da taxa líquida de produção de biomassa ser maior do que as taxas de perda devido à respiração, à pastagem, ao transporte horizontal e aos processos difusivos turbulentos (RILEY et al., 1949; MILLS, 1989; CLOERN, 1996; FRANKS, 2002).

A clorofila-*a* é o principal pigmento fitoplanctônico e, devido à sua função direta na fotossíntese, encontra-se presente em todos os grupos de fitoplâncton, exceto no gênero *Prochlorococcus*, onde a divinil clorofila-*a* é seu equivalente fotossintético (WATERBURY et al., 1986). Pela praticidade de medir sua concentração, a clorofila-*a* permanece ainda hoje como um dos indicadores mais utilizados de biomassa de fitoplâncton nos oceanos (e.g., NEVEUX et al., 2009, HOUT et al., 2007). Vale lembrar que a concentração de clorofila-*a* não é diretamente convertida em concentração de carbono celular (biomassa real), já que uma série de outros fatores, como o estresse fisiológico, a intensidade luminosa, a temperatura e o grupo taxonômico, podem alterar as proporções entre carbono e clorofila-*a* em mais de duas ordens de magnitude (CULLEN, 1982). Como alternativa para medidas convencionais de biomassa fitoplanctônica, via estimativas da concentração de clorofila-a em tempo real, muitos trabalhos propõem a utilização de técnicas de fluorescência estimulada *in situ* (e.g., LORENZEN, 1966; YENTSCH; MENZEL, 1963; HOLM-HANSEN et al., 1965; KIEFER, 1973), que pode ser estipulada em diferentes comprimentos de onda. Nesse sentido, ressaltam-se os fluorímetros submersíveis, equipados com diferentes bandas de comprimento de onda de luz de excitação de fluorescência como ferramentas importantes para a obtenção de informações *in vivo*, *in situ* e de alta resolução temporal no estudo da variabilidade da biomassa fitoplanctônica (e.g.,

BEUTLER et al., 2002; VAN BEUSEKOM et al., 2009; RICHARDSON; LAWRENZ; PINCKNEY, 2010).

É importante destacar que amostragens em baixa frequência, usualmente empregadas nos programas de monitoramento devido a questões logísticas e à necessidade de diminuir custos, podem caracterizar incorretamente valores máximos e mínimos, médias e tendências em longo prazo. A utilização de séries temporais de clorofila-*a* já ocorre em vários programas de monitoramento mundialmente, e essas visam identificar padrões de variabilidade em várias escalas de tempo, bem como criar possíveis cenários causados por efeitos naturais e/ou antrópicos (LOHRENZ et al., 1992; KARL; LUKAS, 1996; PHILIPPART et al., 2010; KROMKAMP; VAN ENGELAND, 2010).

Existem, contudo, algumas limitações no uso da fluorimetria como estimativa da biomassa fitoplanctônica (PROCTOR; ROESLER, 2010), sendo uma delas a presença do material orgânico dissolvido colorido (MODC − em inglês: *colored dissolved organic matter*), que tende a ser importante em águas costeiras uma vez que os continentes são a sua principal origem. Quando MODC está presente, as medidas de fluorescência da clorofila-*a*, podem ser superestimadas, pois esse material apresenta certo grau de fluorescência em resposta à excitação ao redor de 470nm, comprimento de onda no qual a maioria dos sensores de fluorescência da clorofila-*a* atuam (ROESLER et al., 2006). Assim, é primordial estabelecer a contribuição do MODC sobre o sinal da fluorescência atribuído à clorofila-*a* em monitoramentos que utilizam a fluorescência como indicador de biomassa do fitoplâncton em ambientes costeiros. A intensidade da irradiância solar, que na faixa da luz visível é definida como a radiação fotossinteticamente ativa (PAR – em inglês: *photosynthetically active radiation*), é outra variável que pode causar alterações na fluorescência medida. Acima de certo limite, incrementos da irradiância solar resultam em um decréscimo no rendimento quântico da fluorescência, em virtude de um efeito chamado “quenching não fotoquímico” (FALKOWSKI; RAVEN, 1997). Tal fenômeno faz com que as células fitoplanctônicas apresentem uma redução da fluorescência por unidade de clorofila-a, e assim, este efeito deve ser eliminado ou contabilizado para evitar uma subestimação da estimativa da clorofila durante períodos com alta irradiância na superfície da água. Por fim, outro fator que pode causar a subestimação da concentração de clorofila-*a* é a temperatura, pois detectores de diodo presentes nos fluorímetros disponíveis comercialmente apresentam um sinal eletrônico de base

que é independente da luz e depende da temperatura (ROESLER; BOSS, 2008), podendo afetar a estimativa final dos valores de fluorescência (PROCTOR; ROESLER, 2010).

Além da fluorescência da clorofila-a, medidas óticas têm sido utilizadas com sucesso em sistemas de observação costeiros, com o objetivo de monitorar variáveis que inferem a qualidade da água (BABIN et al., 2003; REYNOLDS; Stramski; Mitchell, 2001; NELSON; GUARDA, 1995; GALLEGOS; CORREL; PIERCE, 1990), e podem trazer informações complementares a concentração de clorofila-a. São ferramentas úteis na descrição da dinâmica das partículas e materiais dissolvidos, que em conjunto determinam a disponibilidade e qualidade da luz na coluna de água. Um dos principais descritores da qualidade ótica das medidas são geradas por meio de medições do coeficiente de absorção espectral da luz na água do mar, a(λ) (m-1), o qual é determinado de forma aditiva pela própria água, fitoplâncton, outras partículas vivas e não vivas (definidas como “detritos”) e MODC (Kirk, 1994). Em regiões costeiras, as variações nas contribuições relativas desses componentes no tempo e espaço auxiliam na interpretação da dinâmica do fitoplâncton em resposta aos fatores ambientais e na variabilidade das massas de água presentes.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo central deste estudo é analisar a variabilidade em alta frequência da biomassa fitoplanctônica em um sistema advectivo localizado em uma região costeira subtropical, e investigar suas relações temporais com a intensidade e direção dos ventos e a amplitude das marés. Especificamente, os objetivos são:

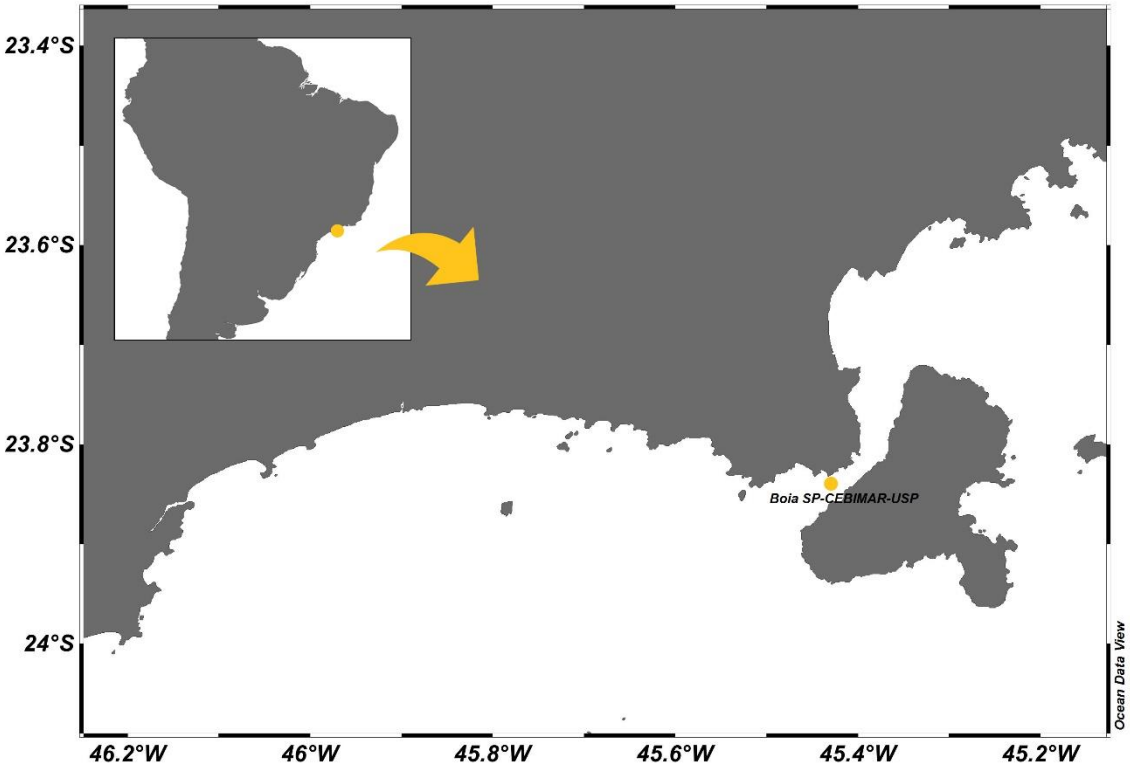
a) Decompor a série temporal, a fim de analisar a frequência e o tempo em que ocorrem as flutuações da biomassa fitoplanctônica;

b) Caracterizar a qualidade ótica da água do mar por meio dos coeficientes de absorção da luz pelo fitoplâncton, pelos detritos e MODC.

2 ÁREA DE ESTUDO E HIPÓTESES

O canal de São Sebastião está situado no litoral norte do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 23°43'S e 23°54'S de latitude e 45°28'W e 45°20'W de longitude, separando o continente da Ilha de São Sebastião (Ilhabela). Estende-se no sentido sudoeste-nordeste e compreende aproximadamente 25 km de extensão, possuindo entre 6 e 7 km nas entradas norte e sul, respectivamente (Figura 1). Apresenta um estreitamento de até 2 km em sua porção central, e suas maiores profundidades encontram-se ao longo de seu eixo, deslocados em direção a Ilhabela (Furtado et al, 1996).

Figura 1 – Mapa da costa sudeste brasileira e da localização do Canal de São Sebastião, onde se encontra fundeada a boia meteoceanográfica SiMCosta



Fonte: Ocean Data View.

A hidrografia da plataforma continental adjacente ao canal de São Sebastião (CSS) é controlada principalmente por ventos remotos, sistemas frontais e eventos localizados de ressurgência costeira (CIOTTI; MAHIQUES; MOLLER, 2014 e

referências). Em escalas menores de tempo, as correntes no CSS são controladas principalmente pelo cisalhamento dos ventos e das marés (MIRANDA; CASTRO, 1995). A circulação induzida pelo vento é intensa, com correntes superficiais apresentando velocidades médias entre 0,5 e 1,0 m s^{-1} (FONTES, 1995). A climatologia do campo de ventos apresenta predomínio do quadrante nordeste durante o verão e do quadrante sudoeste no inverno (CASTRO FILHO, 1996). O regime de maré é do tipo micromarés, semidiurna (MESQUITA, 1995), com variações de amplitude entre 0,25 e 1,2 metros (VILLAMARIN, 2014).

As principais massas de água presentes na plataforma interna sudeste do Brasil são a Água Tropical (AT), a Água Costeira (AC) e a Água Central do Atlântico Sul (ACAS). A AT foi definida por Emilson (1961) e caracteriza-se por ocupar a superfície do oceano Atlântico Sul e por apresentar temperaturas maiores que 20°C e salinidades maiores que 36.4 (MIRANDA, 1982), sendo resultante da intensa radiação solar e do excesso de evaporação. A AC, caracterizada por Miranda (1982) como uma massa de água marinha que se mistura com a água doce oriunda do continente, apresenta temperatura superior a 26ºC e salinidade menor ou igual a 34. Uma caracterização sazonal da AC na região de estudo ainda se faz necessária (KRIEGER et al., dados não publicados). Já a ACAS, caracterizada por Miranda (1985) como uma massa de água de nível picnoclínico, tem temperaturas maiores que 6°C e menores que 20°C.

As baixas concentrações anuais de nutrientes no CSS são modificadas por intrusões da ACAS durante eventos de ressurgência costeira induzidos por ventos constantes do nordeste (Gaeta et al. 1990, Gianesella-Galvão et al. 1997, 1999, Peres 2013), principalmente na primavera e no verão, similar ao observado para a região de Ubatuba, que se localiza ao norte do CSS (CASTRO FILHO, 2014). A ACAS exerce influência nas taxas de produtividade primária na região por meio da entrada de nutrientes (SALDANHA-CORRÊA; GIANESELLA, 2008). No entanto, estudos recentes mostraram que os efeitos da ACAS na região central do CSS parecem estar limitados às camadas profundas (DOTTORI; SIEGLE; CASTRO, 2015) e que os enriquecimentos episódicos de nutrientes acontecem durante passagem de sistemas frontais (PERES, 2013).

A análise de nutrientes na região de estudo revelou baixas concentrações de nitrato, resultando, geralmente, em uma razão N:P inferior a 16:1, mesmo em águas profundas sob a influência da ACAS (SALDANHA-CORRÊA, 1993; GAETA et al.,

1999; GIANESELLA et al., 1999; PERES, 2013). Nesses estudos, as concentrações médias de nitrato, fosfato e silicato estavam abaixo de 10 µmol/L, 1 µmol/L e 10 µmol/L, respectivamente. A limitação por nitrato no CSS tem sido igualmente reportada para macroalgas (Flores et al., 2015).

Paixão (2008) registrou no CSS, em julho, outubro e dezembro de 2006, um padrão de circulação em duas camadas: a superficial, em direção ao sul, como resposta a ventos dominantes; e a de profundidade, em sentido norte, como resposta à intrusão da massa de água mais densa e fria. Variações nos padrões das correntes irão advectar, transportando horizontalmente material dissolvido e particulado, incluindo organismos planctônicos, em sentido norte e sul, no interior do CSS.

Séries temporais sobre variações da dinâmica fitoplanctônica no CSS ainda são escassas, em longas escalas de tempo, e inexistentes, em curtas escalas para quase toda a costa brasileira. Por se tratar de um ambiente advectivo, parte-se do pressuposto de que qualquer variação positiva da biomassa de fitoplâncton não se deve ao crescimento local, mas ao transporte de células fitoplanctônicas movidas pelas correntes associadas a ventos e marés. Pela direção dos ventos predominantes, que acompanham a orientação da linha de costa do CSS, diferentes componentes do vento transportam massas de água com qualidades distintas, isto é, ventos vindos do leste e norte transportam águas com características mais continentais dada a influência da baía de Caraguatatuba, enquanto ventos vindos do oeste e sul transportam águas de natureza mais oceânica, essas últimas caracterizadas por apresentarem menor quantidade de materiais dissolvidos e particulados. Assim, este trabalho pretende testar as seguintes hipóteses:

1) As amplitudes de maré explicam a variabilidade da concentração de clorofila-*a* no CSS em escalas de horas;
2) A intensidade e a direção dos ventos explicam a variabilidade da concentração de clorofila-*a* no CSS em escalas de horas a dias;
3) Ventos do quadrante norte/nordeste transportam águas com maiores concentrações dos seguintes componentes óticos: fitoplâncton, detritos e MODC;

A partir disso, pretende-se verificar qual é o impacto das observações de alta frequência na contabilização geral da biomassa do fitoplâncton em maiores escalas de tempo (e.g., mensal).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS

Foram analisados dados horários de temperatura e salinidade da água do mar, fluorescência de clorofila-*a* e turbidez, obtidos entre dezembro de 2014 e abril de 2015 e, em um segundo momento, dados de fluorescência de clorofila-*a* entre abril e dezembro de 2015, por meio da boia meteoceanográfica do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta, ver maiores detalhes no Anexo A) (Figura 2), fundeada no CSS, entre as coordenadas 23˚49'50.1"S de latitude e 45˚25'19.8"W de longitude, a cerca de 300 metros da Praia do Segredo, onde se localiza o Centro de Biologia Marinha (CEBIMar) da Universidade de São Paulo (USP). As variáveis em questão foram medidas por meio do sensor WET Labs WQMx, localizado abaixo da boia a uma profundidade de aproximadamente um metro. A transmissão dos dados oceanográficos registrados pelo sistema para os servidores do projeto SiMCosta foi realizada por meio de telefonia GSM.

Figura 2 – Boia meteoceanográfica SiMCosta fundeada no Canal de São Sebastião

Fonte: fotografia de Camilla Bellini

Dados da intensidade e direção do vento, irradiância solar e pluviosidade foram obtidos da estação meteorológica do CEBIMar (Estação Davis – Precision Weather

Station, Vantage Pro 2) que efetua medições a cada 10 minutos. A estação está localizada em 23º49'25"S de latitude e 45º25'18"W de longitude, a uma altitude de 18 metros e a cerca de 200 metros da boia SIMCOSTA. Já os dados relativos aos ventos foram integrados em 36 horas antes da medida adquirida, pois foram aqueles que apresentaram melhores relações com a clorofila-*a* e outros componentes óticos, quando comparados com ventos integrados em 12h, 24h e 48h. Por último, os dados de nível do mar foram estimados por meio de um sensor de pressão, instalado no fundo da desembocadura da Baía do Araçá, região mais estreita e central do CSS, nas coordenadas 23°49'02.04"S de latitude e 45°24'06.00"W de longitude, a uma profundidade local de 10 metros e a cerca de 2,8 quilômetro da boia do SIMCOSTA. Esses dados foram adquiridos pela equipe do Módulo Hidrodinâmico do Projeto Temático Biota/Araçá e gentilmente cedidos pelo Prof. Dr. Eduardo Siegle. A fim de remover o sinal da maré meteorológica, ajustou-se um conjunto de funções harmônicas utilizando o método dos mínimos quadrados do tipo ‘$A * \sin(\Omega * t + \Phi)$’, para obter a amplitude (A) e a fase (Φ) para cada frequência de maré (Ω) (KRIEGER et al., dados não publicados).

A fim de constatar possíveis variações nas medições realizadas pelo SiMCosta devido à deriva de instrumentos e, portanto, investigar sua consistência ao longo do tempo, foram planejadas 30 visitas à boia para realização de medidas de validação durante dezembro de 2014 a abril de 2015. As saídas foram sempre realizadas às 9 horas da manhã, com o intuito de eliminar possíveis alterações nas medições da fluorescência de clorofila-*a* em função das altas irradiâncias. Durante cada uma dessas visitas, foram realizados perfis verticais, desde a superfície até próximo ao fundo, de temperatura, salinidade, turbidez e fluorescência de clorofila-*a* com o auxílio de um sensor multiparamétrico CTD (AAQ-RINKO 127). Para a validação das medidas da boia, consideraram-se as médias das medidas do sensor multiparamétrico entre 0,3 e 0,9 metros de profundidade – faixa de profundidade registrada pelo sensor de pressão da boia SiMCosta ao longo da série temporal. Em cada instante, o valor médio de cada variável foi calculado e comparado com as medidas da boia.

Além da validação dos sensores da boia, ao longo das 30 saídas para o sítio SiMCosta, coletaram-se amostras de água, por meio de três lançamentos (réplicas) de garrafa Van Dorn, na mesma profundidade onde se localizam os sensores. Tais amostras seguiram imediatamente para o laboratório, onde foram coletadas alíquotas destinadas às medições de fluorescência da clorofila-*a*, por meio do fluorímetro 10-

AU Turner Designs. A fim de proceder a essas leituras, as amostras foram mantidas em frascos escuros por 30 minutos para a fotoaclimatação, procedimento que permite que todos os fotossistemas fiquem disponíveis para a captação de fótons, isto é, atinjam um ótimo de eficiência fotoquímica e nenhuma supressão da fluorescência devido a irradiância local no momento da leitura (LAZAR, 1999; MAXWELL; JOHNSON, 2000). Alíquotas destinadas às medidas de turbidez foram lidas com o auxílio de um fluorímetro de campo modelo AquaFluor (Turner Designs).

As amostras de água destinadas à quantificação da concentração de clorofila-*a in vitro* também foram processadas em laboratório. Para cada réplica diária, foram filtrados 500mL de água, utilizando filtros de fibras de vidro GF/F de 25 mm de diâmetro (Whatman, poro de 0,7 µm). Imediatamente após a filtragem, esses filtros foram colocados em tubos criogênicos, para serem armazenados em nitrogênio líquido por algumas horas e posteriormente em Ultrafreezer (-80°C) até o momento da extração. Em laboratório, ao abrigo da luz, os filtros recém-tirados do Ultrafreezer foram então transferidos para frascos contendo uma solução pré-resfriada de acetona 90% e óxido de dimetil sulfato − 6:4 em volume, conforme indicam Shoaf e Lium (1976), onde foram deixados em freezer e ao abrigo da luz por pelo menos 24 horas. Após a extração, as fluorescências dos extratos foram lidas em um fluorímetro de bancada (Turner Designs modelo Trilogy), equipado com filtros e lâmpadas, seguindo o método de Welschmeyer (1994).

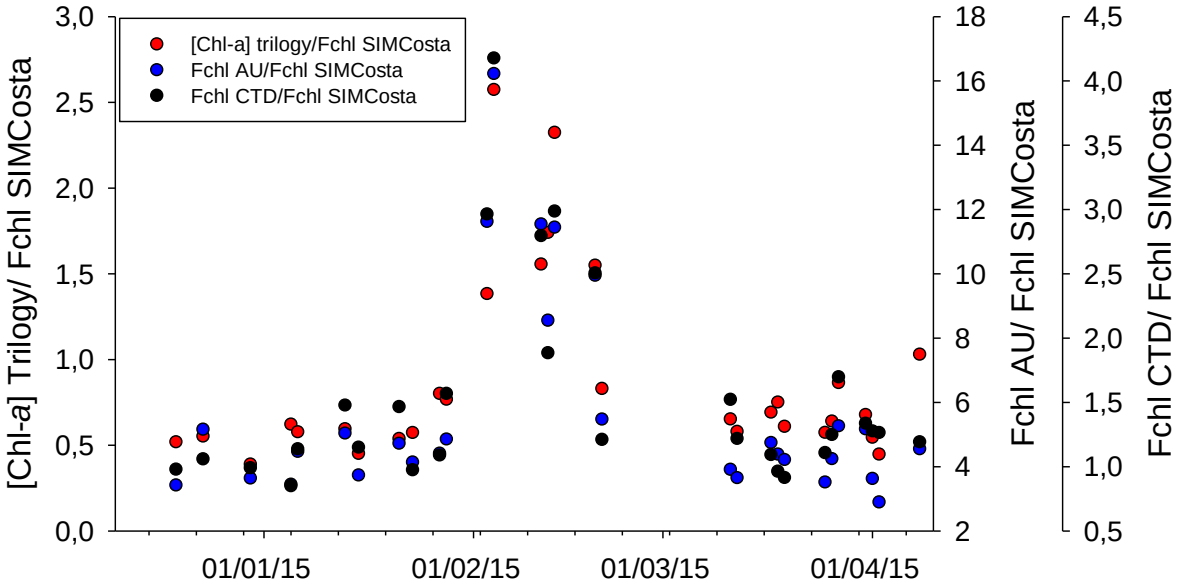
3.2 PROCESSAMENTO E CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS

A boia do projeto SiMCosta foi programada para fazer 20 medidas horárias numa frequência de 1 Hz (uma medida por segundo). A partir destes dados, construíram-se séries temporais horárias para as variáveis de interesse. O primeiro passo foi verificar a distribuição das medidas dos sensores, calculando o histograma e a função densidade de probabilidade dos dados brutos de temperatura e salinidade da água do mar, turbidez e fluorescência de clorofila-*a*. Para a normalização das séries temporais de cada uma das variáveis, o valor médio foi calculado e dividido pelo respectivo desvio padrão. Foram consideradas medidas válidas aquelas situadas entre três desvios padrão do valor médio – médias além deste limite foram consideradas espúrias. Consideraram-se válidas mais de 97% das medidas de cada variável. Por fim, as séries temporais horárias foram calculadas por meio de médias

em caixa. Neste caso, calculou-se o valor médio para cada medida considerando medidas dentro do intervalo de dois desvios padrão a partir da média dos dados brutos.

As séries temporais apresentaram lacunas nas medidas e, apesar da remoção de dados espúrios, mostraram algumas inconsistências, principalmente em relação a medidas de fluorescência de clorofila-*a* e turbidez, que foram afetadas pela bioincrustação no sensor ótico, que coincidiu com valores notavelmente maiores dos demais. Diante disso, os dados afetados pela bioincrustação foram calculados verificando a razão entre os valores de fluorescência de clorofila-*a* da boia SiMCosta com o CTD RINKO ao longo das 30 validações. Esse controle foi verificado de outras duas maneiras independentes pelo cálculo da razão da fluorescência de clorofila-*a* da boia com o valor da fluorescência de clorofila-*a* *in vivo* medida no AU e com a concentração de clorofila-*a* extraída e medida no Trilogy. Com isso, notou-se que as razões que fugiam à tendência apareciam entre os dias 03 de fevereiro de 2015 e 19 de fevereiro de 2015 (Figura 3). Dessa maneira, optou-se por trabalhar com duas séries temporais contínuas e com pelo menos um ciclo completo de maré presente; o primeiro bloco de dados compreendeu o período de 13 de dezembro de 2014 a 28 de janeiro de 2015, e o segundo bloco englobou o período de 10 de março de 2015 a 08 de abril de 2015.

Figura 3 – Razões entre as concentrações de clorofila-*a* medidas da boia SiMCosta, CTD, AU e Trilogy.



Legenda: pontos vermelhos – razões da fluorescência de clorofila-*a* medida no Trilogy pela fluorescência de clorofila-*a* medida na boia SiMCosta ao longo do tempo; pontos azuis – razões da fluorescência de clorofila-*a* medida no fluorímetro de bancada AU pela fluorescência de clorofila-*a* medida na boia SiMCosta ao longo do tempo; e pontos pretos – razões da fluorescência de clorofila-*a* medida no sensor CTD pela fluorescência de clorofila-*a* medida na boia SiMCosta.

3.3 CORREÇÃO DOS VALORES DE FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA-*A* *MEDIDAS PELA BOIA SIMCOSTA*

Os cálculos da correção dos valores de fluorescência foram adaptados do protocolo de Proctor e Roesler (2010), que visou eliminar ou reduzir as fontes de incertezas na quantificação da concentração de clorofila a partir da sua fluorescência *in vivo*.

3.3.1 Correção pelo MODC

A fim de estabelecer uma potencial contribuição do MODC para o sinal de fluorescência da clorofila-*a* e, dessa forma, verificar se houve interferência, avaliou-se a magnitude da concentração do MODC ao longo das 30 saídas para o sítio SiMCosta, com base nas amostras de água coletadas.

Amostras filtradas (150 ml) foram utilizadas para medidas do branco da fluorescência natural e do coeficiente de absorção da luz pelo MODC. A alíquota utilizada para essas análises do MODC e brancos passou por um filtro de cápsula de nylon (Polycap) de 0,2 µm de poro. Os espectros de absorção de luz pelo MODC foram obtidos por meio da leitura de absorbância da água filtrada em um espectrofotômetro Ultrapath, WPI, com caminho óptico de 50 cm. Apenas os valores entre 350 aos 600nm foram usados no ajuste exponencial, conforme indicam Babin et al. (2003), resultando em dois parâmetros para cada curva: a magnitude de absorção de luz do MODC em 443nm (aMODC(443)) e o exponente, que não será discutido no presente trabalho. Já a amostra do branco da fluorescência natural foi lida no fluorímetro 10-AU Turner Designs, o que significa que essa alíquota representa o que seria o MODC interferindo na leitura da fluorescência de clorofila-*a*. Isso porque os filtros de emissão e excitação em ambos os instrumentos apresentam comprimento de onda de excitação entre 340 e 500 nm e emissão de 680 nm.

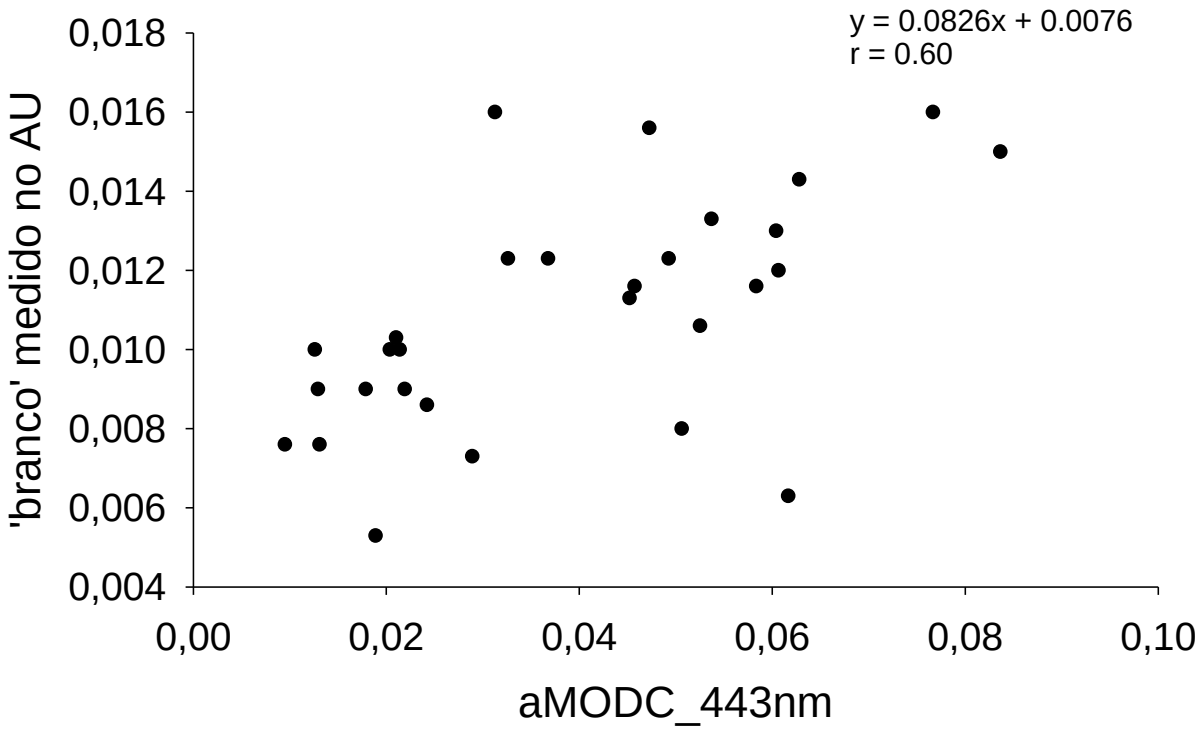
Os dados da fluorescência de MODC da boia SiMCosta não foram utilizados no presente estudo pois não passaram confiabilidade devido ao elevado ruído causado pelas baixas concentrações no CSS. A figura referente a absorção de MODC pelo WPI e a fluorescência de MODC medida na boia está representada no Apêndice A.

Com base no gráfico de dispersão (Figura 4), ao plotar, no eixo das abcissas, os valores de absorção do MODC e, no eixo das ordenadas, o branco da fluorescência natural, obtiveram-se um coeficiente de correlação de Pearson (ρ) de 0,6 e a equação da reta y=0,0826x + 0,0076. Por fim, aplicou-se a seguinte equação de correção (Equação 1):

*Clorofila corrigida pelo MODC = Fchl da boia SiMCosta - (MODC da boia SiMCosta * fator de correção (0.0826)*

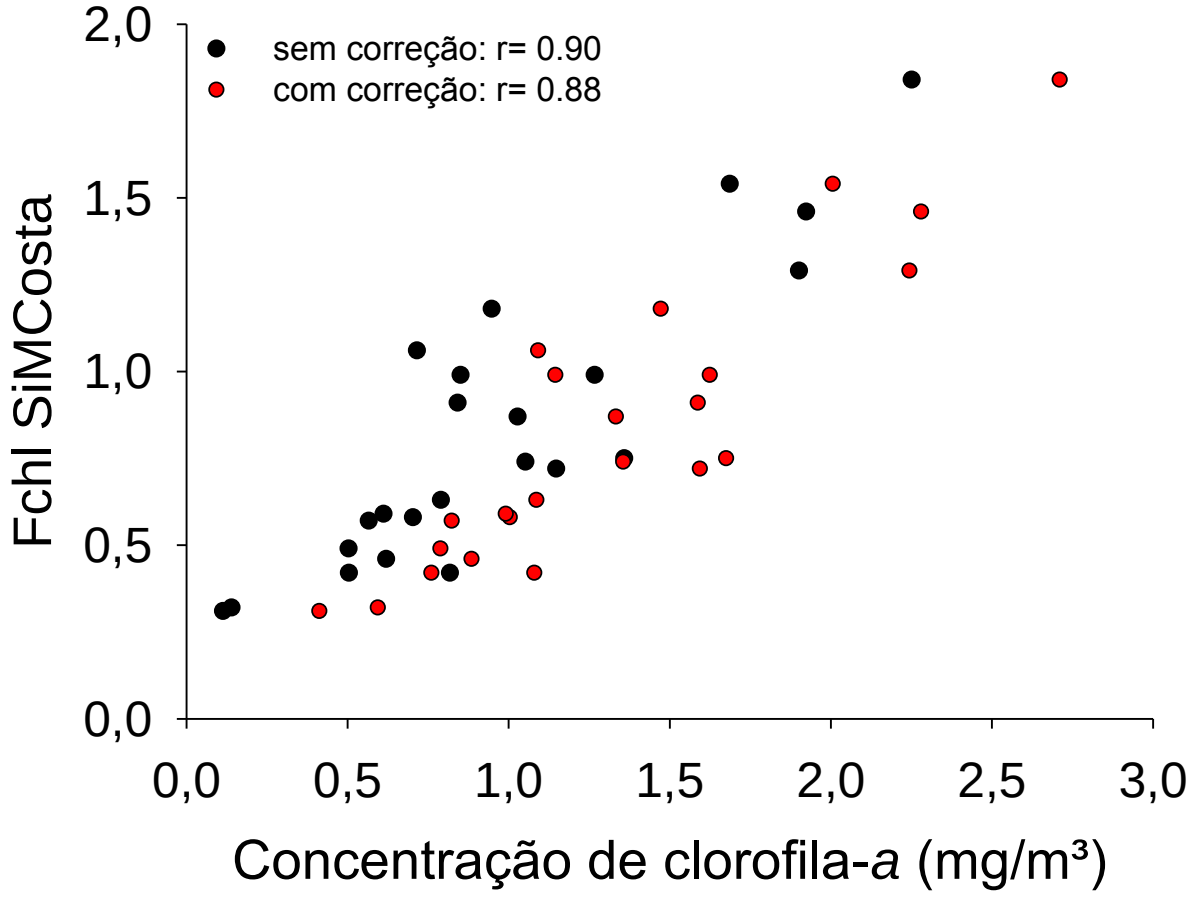
(1)

Figura 4 – Relação entre a absorção de luz pelo material orgânico dissolvido colorido (aMODC_443nm) medido no WPI e pelo branco da fluorescência natural medido no AU. Equação da reta e coeficiente de correlação no gráfico



O coeficiente de correlação linear entre os valores da concentração de clorofila-*a* medidos no Trilogy e os valores da fluorescência de clorofila-*a* medidos na boia SiMCosta diminuiu depois da aplicação do fator de correção, devido ao aumento do ruído na relação linear entre os parâmetros (Figura 5). Esse gráfico é sugestivo de um pequeno ‘offset’ por MODC, não sendo significativo. Ademais, com a correção, o ‘offset’ ficou negativo e portanto, é evidente que a influência de MODC pode ser descartada para esse período de tempo. Dessa maneira, não foi necessária a correção da fluorescência pelo MODC.

Figura 5 – Correlação entre as concentrações de clorofila-*a* (mg/m³) medidas no Trilogy (eixo x) e as fluorescências de clorofila-*a* medidas na boia SiMCosta (eixo y)



Legenda: pontos em preto – correlação sem a correção pelo MODC; e pontos em vermelho – correlação com a correção pelo MODC.

3.3.2 Correção pela temperatura

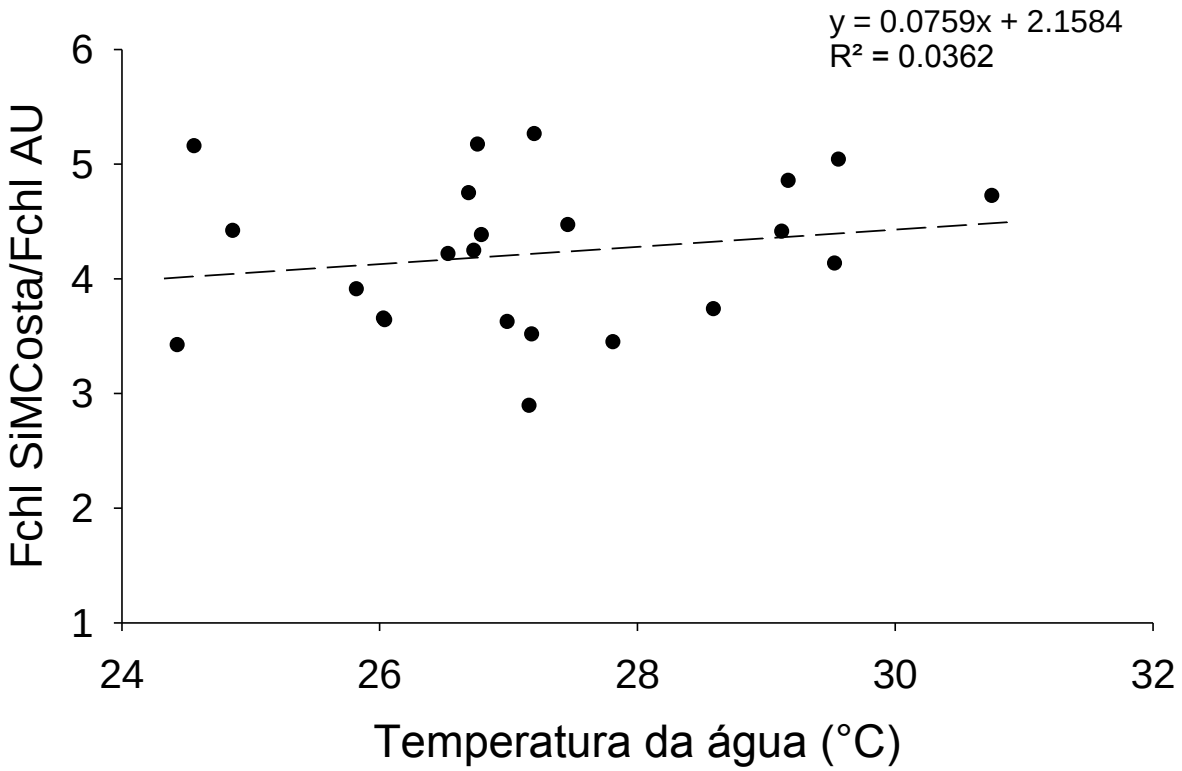
Propriedades óticas da água do mar são dependentes da temperatura (e.g., MOREL, 1974; PEGAU; GRAY; ZANEVELD, 1997), que deve ser incluída nos procedimentos de calibração dos sensores que utilizam a fluorescência como estimativa da concentração de clorofila-*a*. Pegau, Gray e Zaneveld (1997) verificaram, por exemplo, que o coeficiente de absorção espectral da água na região próxima ao infravermelho é altamente dependente da temperatura, enquanto que, na região do visível, a dependência da temperatura é de aproximadamente 0,001 m^{-1}/°C.

Para investigar a relação do possível efeito da temperatura na estimativa da fluorescência de clorofila-*a* nos dados da boia, construiu-se um gráfico de regressão

linear entre a temperatura da água do mar (eixo x) e a diferença entre as fluorescências de clorofila-*a* medidas na boia SiMCosta e no fluorímetro de bancada AU (eixo y) (Figura 6). A temperatura do laboratório sempre esteve em temperatura controlada de 23°C.

A partir do resultado do gráfico, percebe-se que o coeficiente de determinação apresenta valor muito baixo: 0,36% da razão entre as fluorescências de clorofila-*a* medidas na boia e no fluorímetro de bancada foi explicada pela variação da temperatura da água, não sendo significativo (p=0,79). Dessa forma, não se considerou necessário realizar a correção do valor de fluorescência de clorofila-*a* pela temperatura.

Figura 6 – Regressão linear da temperatura da água (eixo x) e da razão entre as fluorescências de clorofila-*a* (medidas na boia SiMCosta e no fluorímetro de bancada AU) (eixo y)



Legenda: R² − coeficiente de determinação.

3.3.3 Correção pela irradiância

Os valores da radiação solar (Wm²) horários obtidos pela estação meteorológica do CEBIMar contemplam um espectro de comprimentos de onda entre 400 e 1100nm. Por conveniência com outros estudos, os valores medidos pela estação foram aproximados aqueles na faixa exclusiva do PAR pela multiplicação por 45% (KIRK, 1994). Os dados de PAR foram então convertidos de Wm² para µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$ utilizando um fator de 4,57, conforme proposto por Thimijan e Heins (1983).

Com o intuito de evitar a subestimação do valor da fluorescência de clorofila-*a* em altas irradiâncias, assumiu-se um valor limite de 300 µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$ a um metro de profundidade, onde está localizado o sensor ótico. Esse valor foi escolhido por representar níveis de luz que maximizam as taxas de crescimento e minimizam o efeito pacote dos pigmentos devido à baixa aclimatação à luz (ROESLER, 2014).

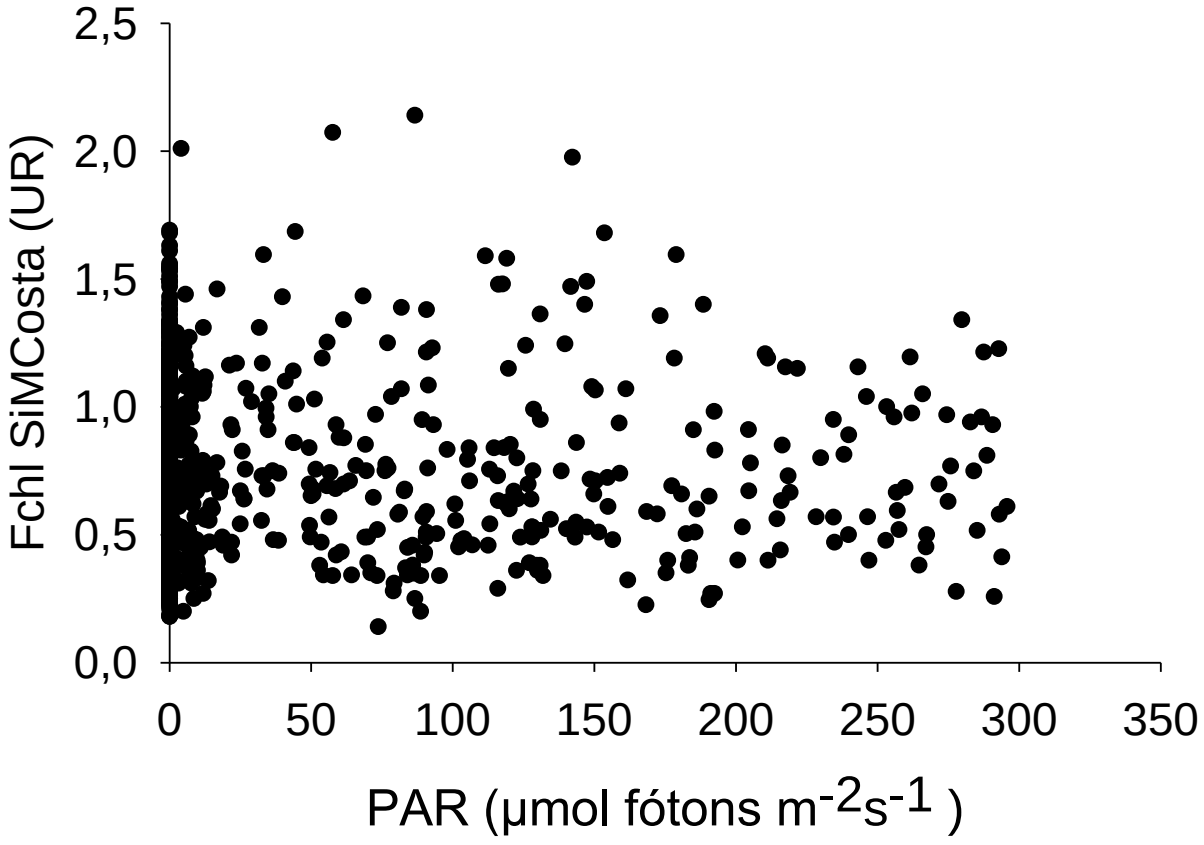
Levando em consideração as boas correlações entre a turbidez da água e a profundidade do disco de Secchi (dados não mostrados), foram adotados valores de atenuação vertical da luz na água, Kd_z, que apresenta relação Kd=1,7/profundidade do disco de Secchi. Considerando que a irradiância diminui exponencialmente conforme a profundidade, com base na equação (2) proposta por Morel (1988):

$$Ed\ (z) = Ed\ (0)\ exp^{(-kdz)} \qquad (2)$$

Onde Ed (z) é a irradiância na profundidade Z e Ed (0) é a irradiância na superfície da coluna de água, calculou-se, então, o valor PAR de irradiância na superfície multiplicando pelo exponencial de -Kd. Para esse valor (Ed (1m)), foi aplicado, então, o fator de 4,57 para a conversão em µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$. Valores de irradiância em 300 µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$ a um metro de profundidade são correspondentes a cerca de 200 Wm² na estação meteorológica do CEBIMar.

Com o procedimento da exclusão de valores de fluorescência da clorofila-*a* correspondentes a irradiâncias maiores que 200 Wm² ou 300 µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$, 35% e 25% dos dados do primeiro e do segundo blocos, respectivamente, foram excluídos. A Figura 7, exposta a seguir, mostra que não houve redução nos valores da fluorescência de clorofila-*a* considerando irradiâncias de até 300 µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$ a um metro de profundidade.

Figura 7 – Observações horárias da fluorescência da clorofila-*a* medida na boia SiMCosta (UR) (eixo y) com o respectivo valor de PAR (µmol fótons $m^{-2}s^{-1}$) (eixo x) estimado a um metro de profundidade



3.4 QUALIDADE ÓTICA DA ÁGUA

Foram mensurados os coeficientes de absorção de luz pelo fitoplâncton e detritos, sendo filtradas três réplicas de 500 mL de água em filtros de fibra de vidro (Whatman GF/F) com 25 mm de diâmetro. Logo após, os filtros GF/F foram lidos em um espectrofotômetro PerkinElmer LAMBDA 35, para determinação dos coeficientes de absorção da luz pelo fitoplâncton, por meio do método de TR Tassan e Ferrari (1995). Medidas de absorbância foram realizadas entre 400 e 750nm, com resolução de 1nm. Primeiramente, foi feita a leitura das partículas totais. Após, os filtros foram descoloridos com solução de hipoclorito de sódio a 0,5% (TASSAN; FERRARI, 1995) e, então, foi medida a absorbância dos filtros descoloridos, correspondendo aos detritos. Por fim, o espectro de absorção do fitoplâncton (m^{-1}) foi obtido pela diferença

entre a absorbância do particulado total e a absorção dos detritos, corrigindo-se as leituras pela área de filtração e pelo volume da amostra filtrado.

3.5 VARIAÇÃO MENSAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*A*

A fim de melhor entender a variação da concentração de clorofila-*a* no CSS em maiores escalas de tempo, construiu-se uma terceira série temporal a partir dos dados da boia SiMCosta. Essa série se estendeu de abril a dezembro de 2015 e foi composta de médias horárias de dados noturnos, compreendidos entre 19 horas da noite e 7 horas da manhã, para evitar quaisquer influências da irradiância (ROESLER, 2014). Para a validação destes dados, usou-se a razão entre os valores da fluorescência de clorofila-*a* do sensor multiparamétrico CTD e os valores de fluorescência da boia SiMCosta. Optou-se por usar essa razão devido aos esforços semanais de validação dos dados da boia SiMCosta com o sensor multiparamétrico CTD, e as respostas similares obtidas pelos 3 controles de qualidade independentes realizados (ver Figura 3 e texto). O ponto de corte foi de 1,8 – valores acima dessa razão foram excluídos da série temporal.

Para compreender o impacto dos eventos de aumento e diminuição da biomassa fitoplanctônica na estimativa da média mensal de clorofila-*a*, primeiramente, foram definidos como eventos os episódios que apresentaram valores acima e abaixo de 50% da mediana da série, definidos por meio da análise visual da série temporal. Após, esses eventos foram excluídos do cálculo da média mensal, e, por fim, realizou-se um teste-*t* de Student, com o intuito de saber se existe diferença nos episódios de aumento e diminuição da biomassa fitoplanctônica na estimativa final da média de clorofila-*a* mensal e, em caso afirmativo, qual o impacto dessa diferença.

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

As variáveis abióticas (temperatura, salinidade, radiação, precipitação e turbidez) e bióticas (concentração de clorofila-*a*) dos dois blocos iniciais de dados analisados foram comparadas estatisticamente por meio do teste-*t* de Student, com nível de significância de $\alpha = 0,05$. Séries temporais podem ter seu sinal decomposto em componentes harmônicos, com base na Análise de Fourier. Em outras palavras, a variância da série pode ser particionada nos seus diferentes componentes

oscilatórios. Picos no periodograma ou no espectro indicam as frequências que mais contribuem para a variância da série; dessa forma, periodicidades, se presentes, são detectadas (CAZELLES et al., 2008).

Para avaliar a presença de frequências periódicas nas séries temporais de dados, foi utilizada a análise espectral de ondaletas, apropriada para séries temporais que possuem características não estacionárias, como é o caso dos processos ecológicos, climáticos e oceanográficos. O que define se a série é estacionária ou não é sua condição de possuir sinais periódicos invariáveis em termos de amplitude e frequência (TORRENCE; COMPO, 1998; CAZELLES et al., 2008; WINDER; CLOERN, 2010). A análise espectral de ondaletas possui janelas móveis no tempo que se dilatam ou se comprimem para capturar sinais de baixa e alta frequência, respectivamente. Dessa forma, a técnica analisa as variações locais de energia em uma série temporal por meio da decomposição simultânea do tempo e das frequências. Esta análise possibilita descrever as formas dominantes de variabilidade e o modo como a energia e as frequências do sinal variam no decorrer do tempo (TORRENCE; COMPO, 1998).

Utilizou-se como função ondaleta base (ondaleta mãe) a Ondaleta Complexa de Morlet, conforme proposto por Winder e Cloern (2010), com frequência de $\omega = 6$, pois apresenta bom equilíbrio entre tempo e localização da frequência. Para comparar a variabilidade entre os diferentes parâmetros analisados, foi retirado o valor médio, e, em seguida, normalizaram-se as séries temporais pelos respectivos desvios padrão. Os testes de significância comparam os espectros obtidos com um espectro teórico de ruído vermelho ($\alpha = 0,8$). Para maior robustez das linhas de significância, foi calculado o ruído vermelho para cada série analisada por meio da autocorrelação com uma defasagem de um passo de tempo (*lag* 1 hora).

Para estudar a semelhança e correlação entre as séries da concentração de clorofila-*a* com a altura da maré e a velocidade e direção do vento, aplicou-se a análise de espectro cruzado de ondaletas, conforme propõem Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004). Define-se o espectro cruzado de ondaletas como:

$$Cxy\ (a,b) = \overline{Cx\ (a,b)}\ Cy\ (a,b) \qquad (3)$$

Onde Cx(a,b) e Cy(a,b) representam a transformada de ondaletas contínua de cada uma das séries temporais. O produto apresentado na Equação (3) possibilita

traçar o gráfico de I Cxy (a,b) I², que resulta em um escalograma, isto é, em um diagrama tempo-frequência, a partir do qual se torna possível a visualização de eventos coincidentes sobre as escalas e frequências, em cada instante de tempo para os sinais x e y. Os valores desse gráfico podem ser apresentados em módulo entre 0 e 1, de modo que, quanto mais próximo do valor 1, maior é a correlação entre os sinais.

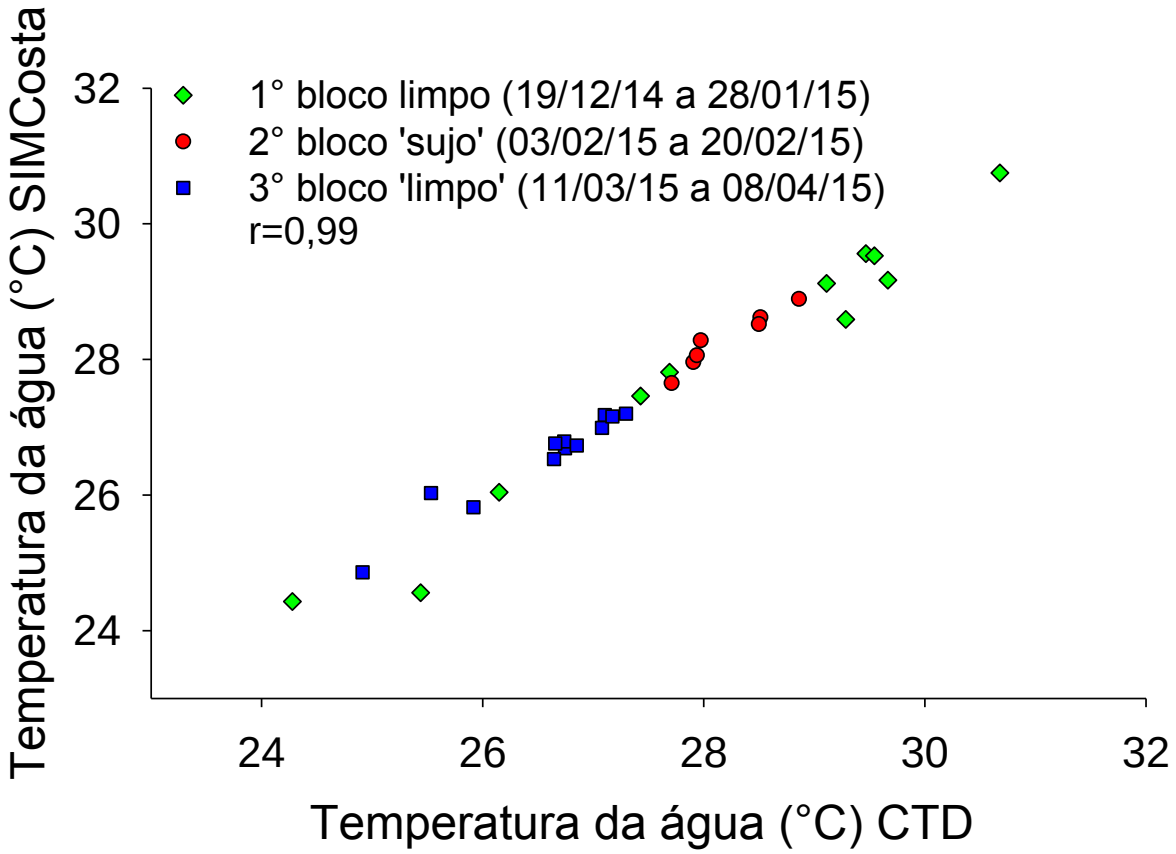
Os cálculos foram feitos em Matlab para a análise de espectro cruzado de ondaletas, incluindo os testes de significância, e foram desenvolvidos por Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004), estando disponíveis em: <http://noc.ac.uk/using-science/crosswavelet-wavelet-coherence/>.

4 RESULTADOS

4.1 CONSISTÊNCIA DOS DADOS DA BOIA SIMCOSTA

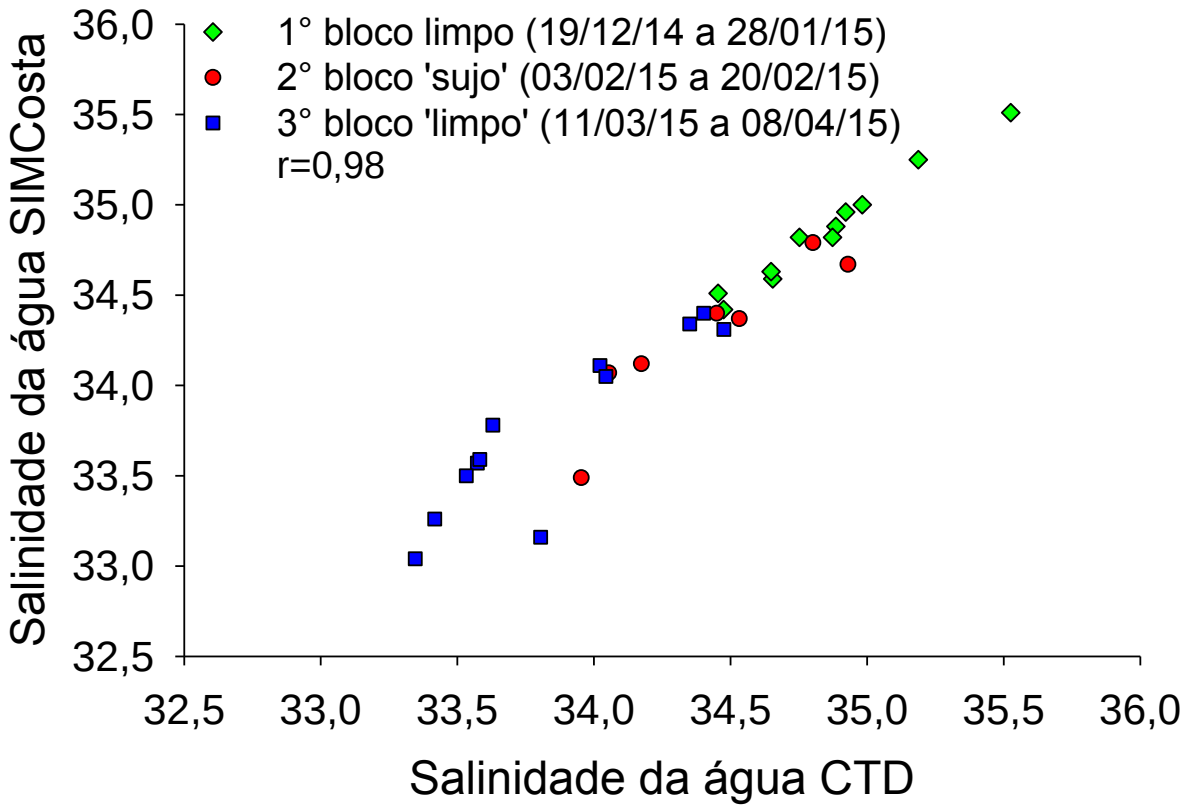
As 30 medidas realizadas em campo para investigar possíveis derivas nos sensores da boia ocorreram por meio de um sensor multiparamétrico CTD. Nota-se uma grande correlação entre as regressões lineares das variáveis oceanográficas (Figura 8, 9, 10 e 11). Os dados óticos de turbidez e clorofila-*a,* que apresentaram discrepâncias devido à bioincrustação, foram excluídos do cálculo do coeficiente de correlação.

Figura 8 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): temperatura da água (T°)



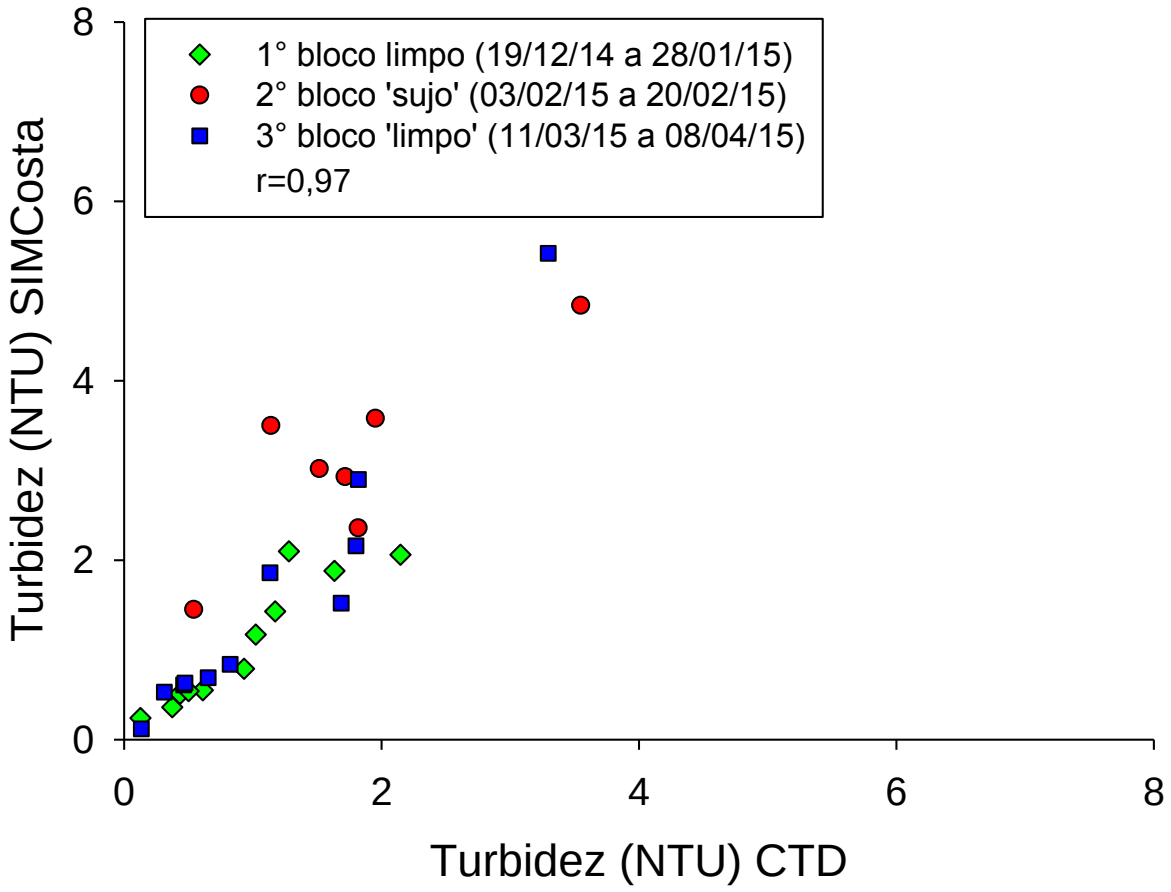
Legenda: o coeficiente de correlação (r) está indicado nas respectivas variáveis.

Figura 9 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): salinidade



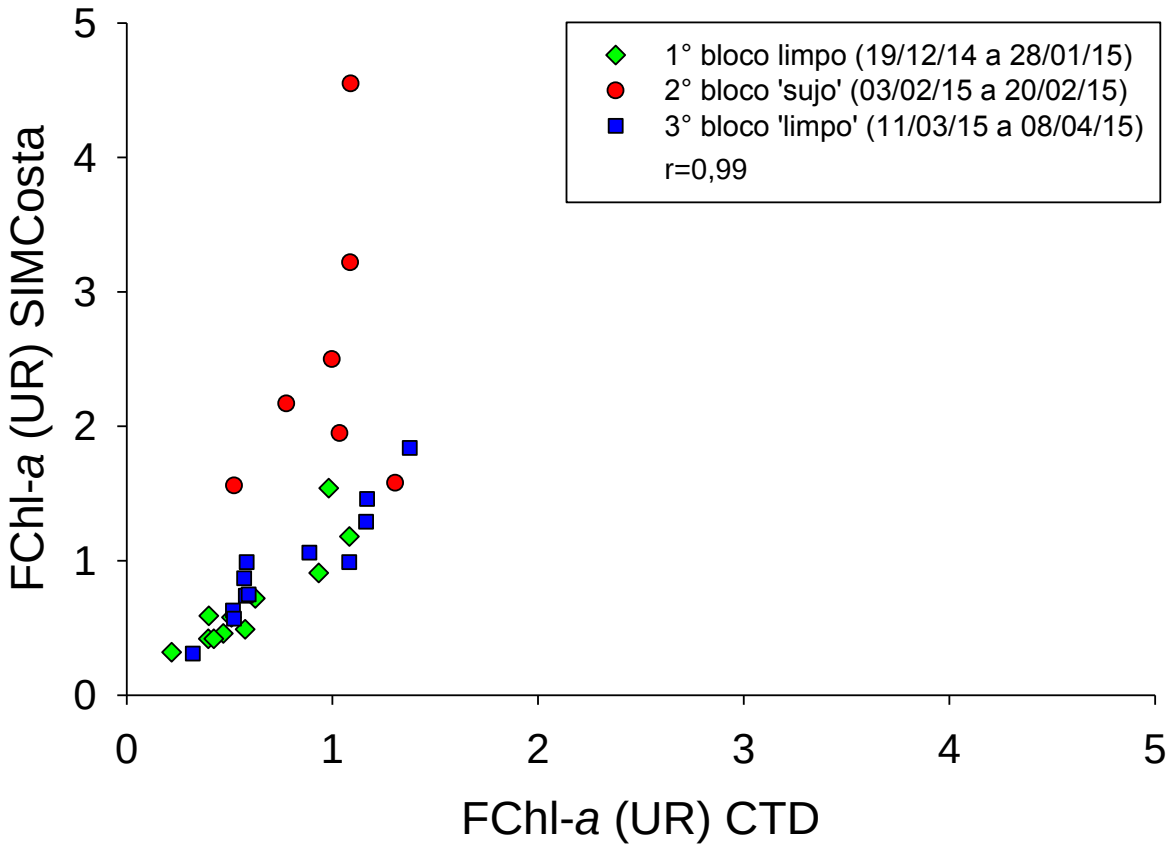
Legenda: o coeficiente de correlação (r) está indicado nas respectivas variáveis.

Figura 10 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): turbidez (NTU)



Legenda: o coeficiente de correlação (r) está indicado nas respectivas variáveis.

Figura 11 – Regressões lineares entre as medidas do sensor multiparamétrico CTD (eixo x) e da boia SiMCosta (eixo y): fluorescência de clorofila-*a* (UR)



Nota: o coeficiente de correlação (r) está indicado nas respectivas variáveis.

4.2 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL

A biomassa fitoplanctônica de ambientes costeiros tropicais e subtropicais não exibe um padrão regular definido de variabilidade sazonal, comum em ambientes temperados. Dessa forma, a fim de verificar possíveis diferenças estatísticas durante os meses de estudo, algumas variáveis meteorológicas e oceanográficas foram comparadas entre os dois blocos de dados, que incluem o período de 13 de dezembro de 2014 a 28 de janeiro de 2015 e de 10 de março de 2015 a 08 de abril de 2015, respectivamente.

4.2.1 Variáveis meteoceanográficas

A seguir, na Tabela 1, é apresentada a estatística descritiva das variáveis meteorológicas e oceanográficas diárias dos dois blocos analisados. Ao observar esses dados, percebe-se que a variável meteorológica que apresentou diferença significativa entre os dois blocos foi a radiação (256,8 ± 338,17Wm² no primeiro bloco e 155 ± 233,38Wm² no segundo bloco, com p<0,0001) (Figura 12 e 13). As médias diárias foram calculadas para os 24 registros processados em um dado dia.

Tabela 1 – Estatística descritiva das variáveis meteorológicas e oceanográficas diárias dos dois blocos analisados. Diferenças significativas estão indicadas em negrito

Variáveis	Média	Desvio padrão	Mediana	Máximo	Mínimo	Teste-*t* entre os blocos
1º bloco						
Temperatura (Cº)	27,32	2,48	27,64	30,88	22,27	P=0,07
Salinidade	**34,86**	**0,45**	**34,89**	**35,51**	**33,72**	**P<0,00001**
Turbidez (NTU)	1,24	0,75	1,17	3,21	0,29	P=0,05
[Clorofila-*a*] (mg/m^3)	**1,06**	**0,44**	**0,97**	**2,46**	**0,48**	**P=0,00001**
Precipitação (mm/h)	0,04	0,11	0	0,66	0	P=0,29
Radiação (Wm^2)	**256,8**	**338,17**	**276,65**	**1188,23**	**0**	**P=0,00001**
2º bloco						
Temperatura (Cº)	26,76	0,59	26,94	27,61	25,05	
Salinidade	33,73	0,52	33,86	34,39	32,41	
Turbidez (NTU)	2,01	2,02	1,23	8,7	0,43	
[Clorofila-*a*] (mg/m^3)	1,58	0,48	1,45	2,85	0,94	
Precipitação (mm/h)	0,02	0,04	0	0,2	0	
Radiação (Wm^2)	155,69	233,38	152,94	860	0	

Figura 12 – Radiação solar média diária (Wm²) no primeiro bloco analisado

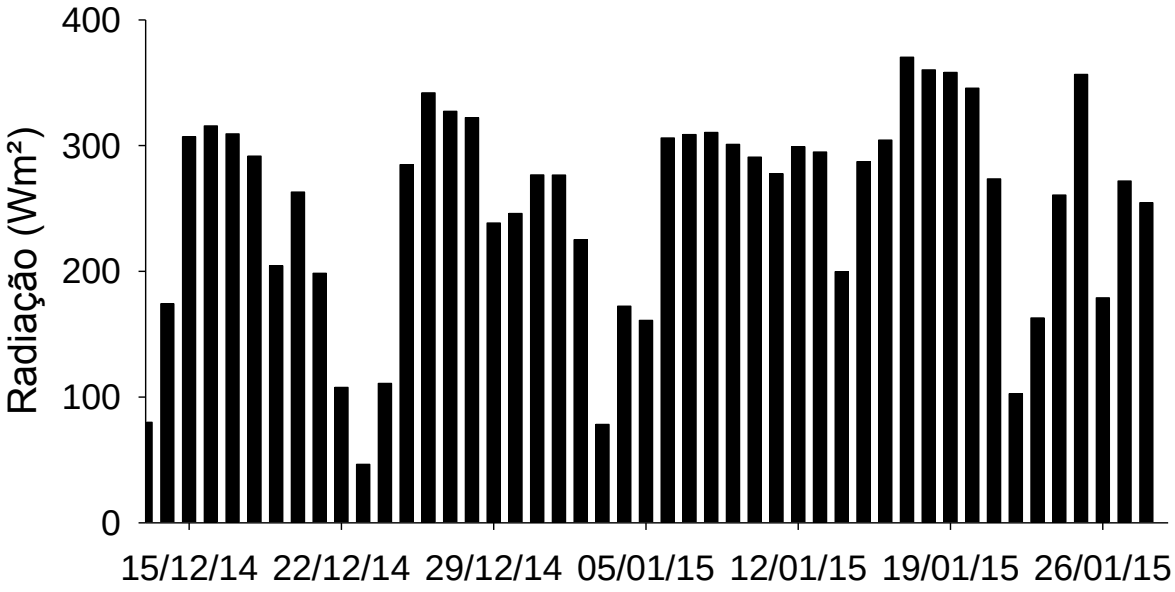
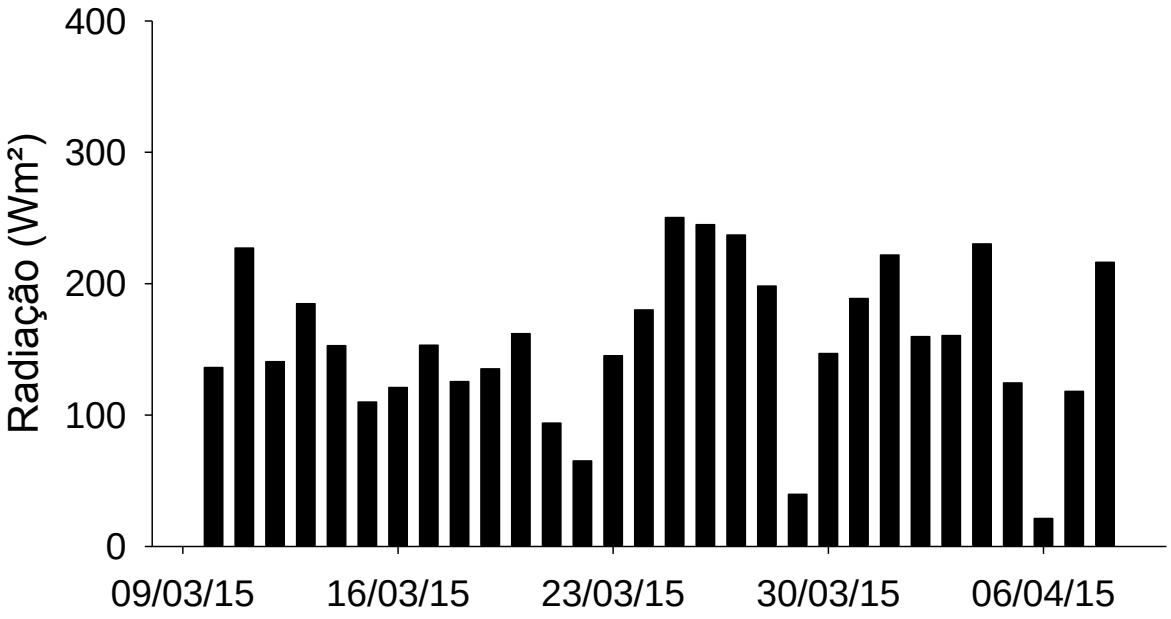


Figura 13 – Radiação solar média diária (Wm²) no segundo bloco analisado



Já a precipitação local apresentou reduzidos valores em suas médias diárias nos dois blocos investigados, não havendo diferença significativa entre estes (p=0,29). No primeiro período, o pico máximo de chuva foi de 0,66mm/h no dia 22 de dezembro de 2014. Nos meses de março a abril de 2015, ocorreram chuvas com poucos

milímetros acumulados por hora, as quais foram esporadicamente espalhadas (Figura 14 e 15).

Figura 14 – Precipitação pluviométrica (mm/h) média no primeiro bloco analisado

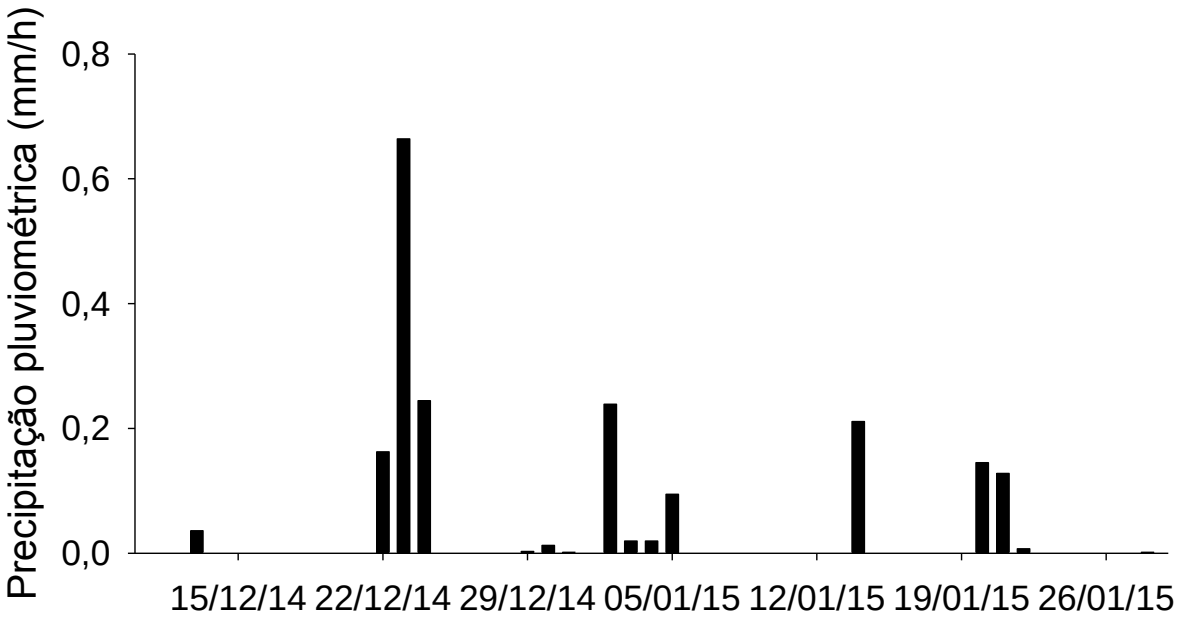
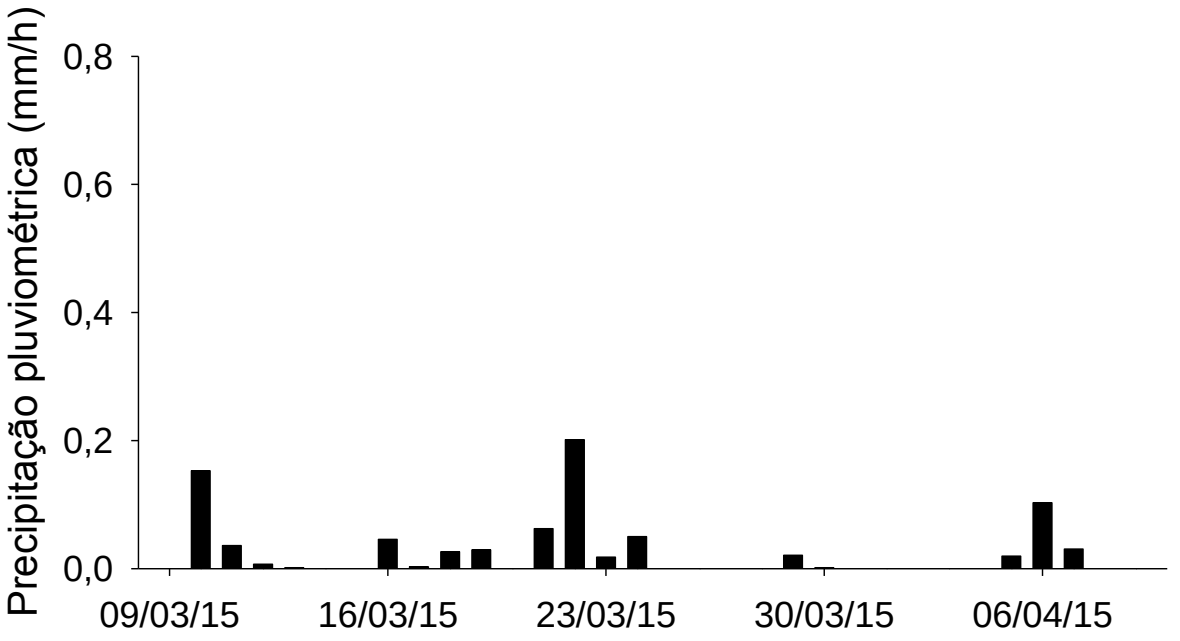


Figura 15 – Precipitação pluviométrica (mm/h) média no segundo bloco analisado



Em relação às variáveis oceanográficas, a temperatura da água do mar não apresentou diferença significativa entre o primeiro e o segundo bloco analisados (27,32 ± 2,48 e 26,76 ± 0,59, respectivamente, com p=0,07). Durante o período de 13 de dezembro de 2014 a 28 de janeiro de 2015, houve um rápido acréscimo da temperatura (Figura 16), atingindo valor máximo de 30,9°C, bem como uma queda brusca de aproximadamente 2°C em decorrência da alta precipitação entre os dias 22 e 23 de dezembro de 2014. Já em relação ao intervalo de tempo de 10 de março a 08 de abril de 2015, a temperatura manteve-se relativamente estável até o final de março, oscilando entre 26 e 27,5°C, quando apresentou queda súbita de 2°C durante a primeira semana de abril (Figura 17).

Figura 16 – Temperatura média diária da água do mar (°C) no primeiro bloco analisado

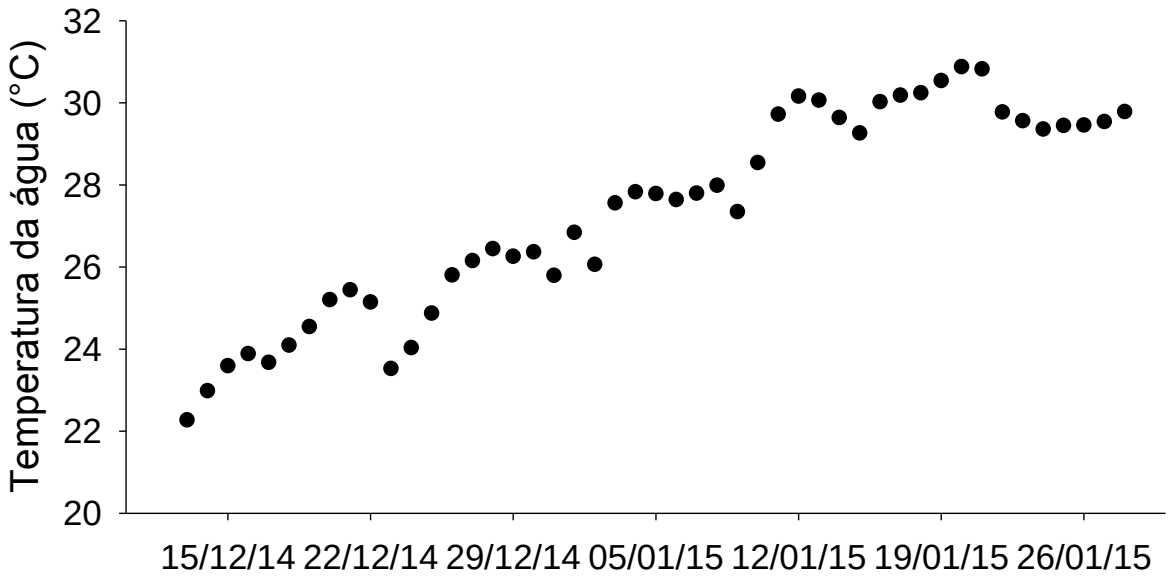
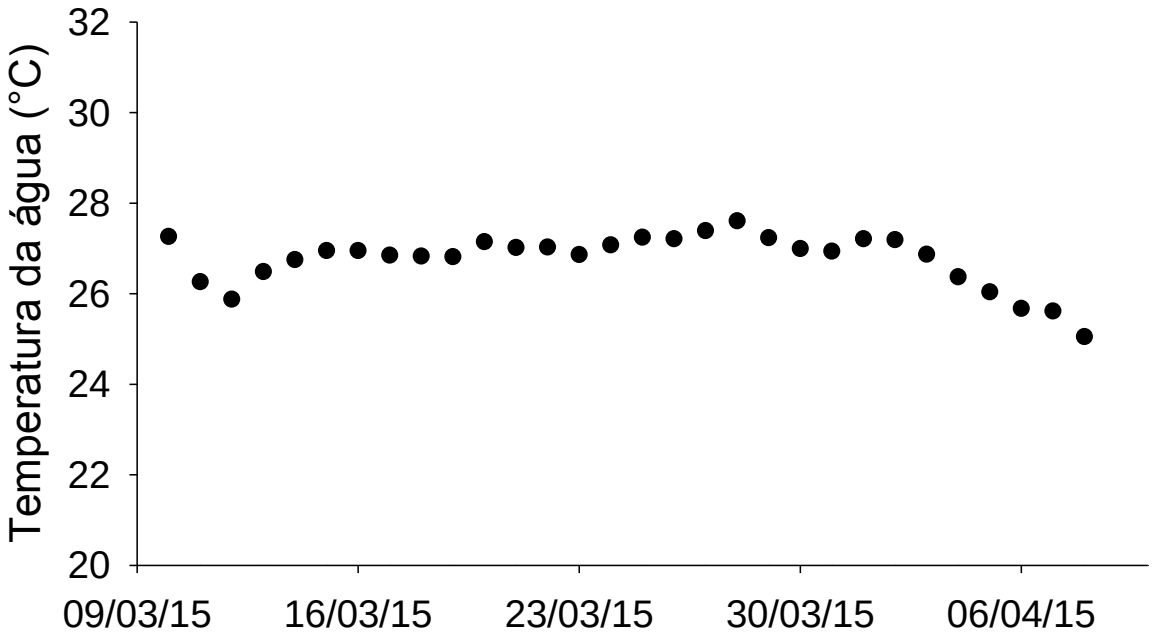


Figura 17 – Temperatura média diária da água do mar (°C) no segundo bloco analisado



A salinidade, por sua vez, foi relativamente maior no primeiro período analisado do que no segundo, apresentando diferença significativa (34,86 ± 0,45 e 33,73 ± 0,52, respectivamente, com $p<0,00001$). Nos meses de dezembro e janeiro, percebe-se uma redução abrupta da salinidade, que alcança o valor mínimo de 33,7, fato relacionado ao evento de alta precipitação ocorrido em 22 e 23 de dezembro de 2014 (Figura 18). Já no segundo período, a salinidade apresentou uma queda gradual até o final de março, quando houve um acréscimo acelerado de 32,4 para 34,3 na primeira semana de abril (Figura 19).

Figura 18 – Salinidade média diária da água do mar no primeiro bloco analisado

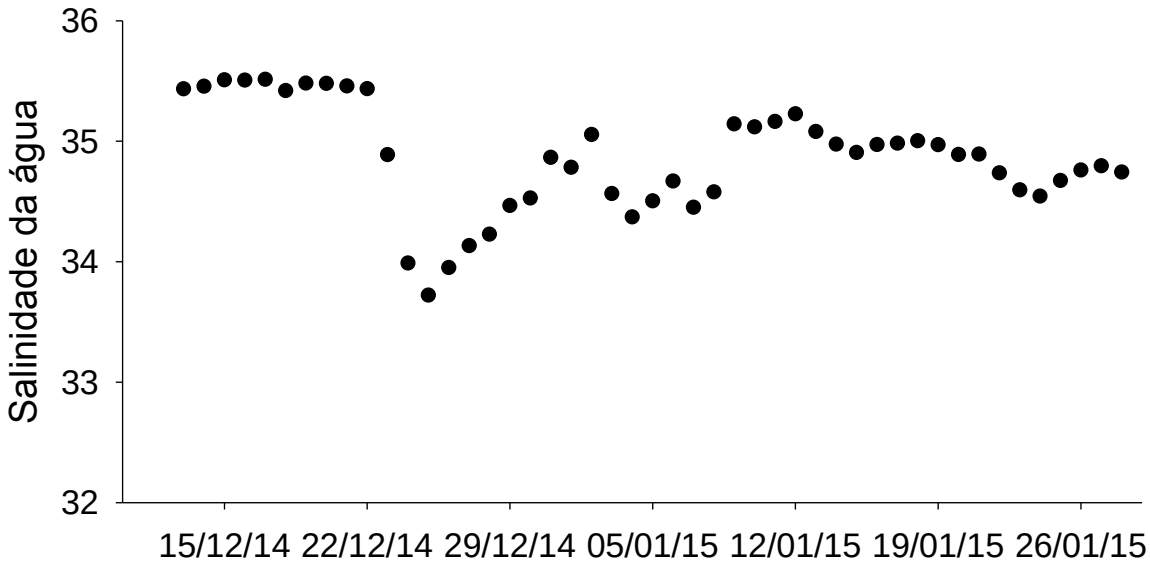
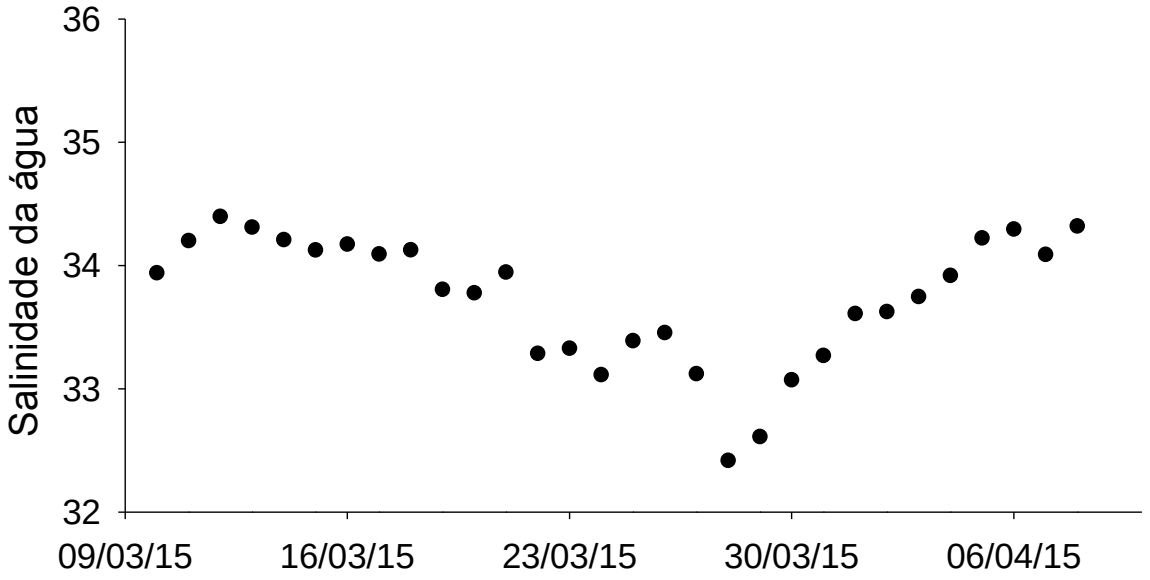
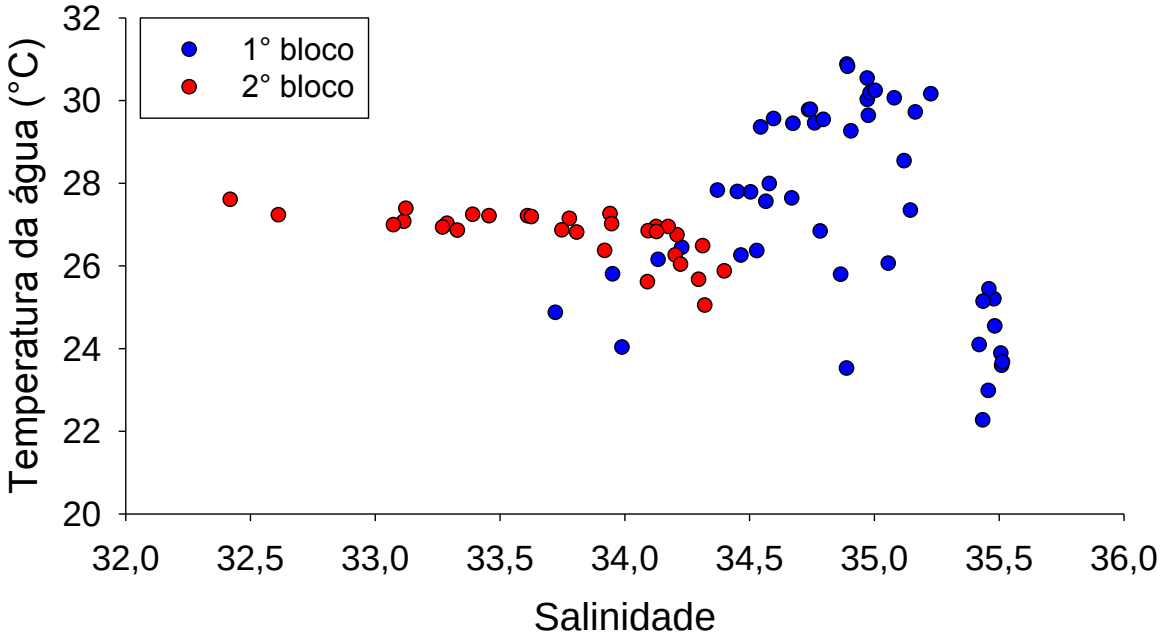


Figura 19 – Salinidade média diária da água do mar no segundo bloco analisado



Durante os meses de análise, verificou-se que as massas de água características no primeiro período foram a AC e a mistura desta com a AT e alguns pontos sugestivos da presença de aguas frias no verão. Já nos meses de março e abril, prevaleceu somente a AC, com menores valores de salinidade e pouca variação sazonal de temperatura (Figura 20).

Figura 20 – Gráfico das médias diárias de temperatura e salinidade (Diagrama TS) para os dois blocos analisados

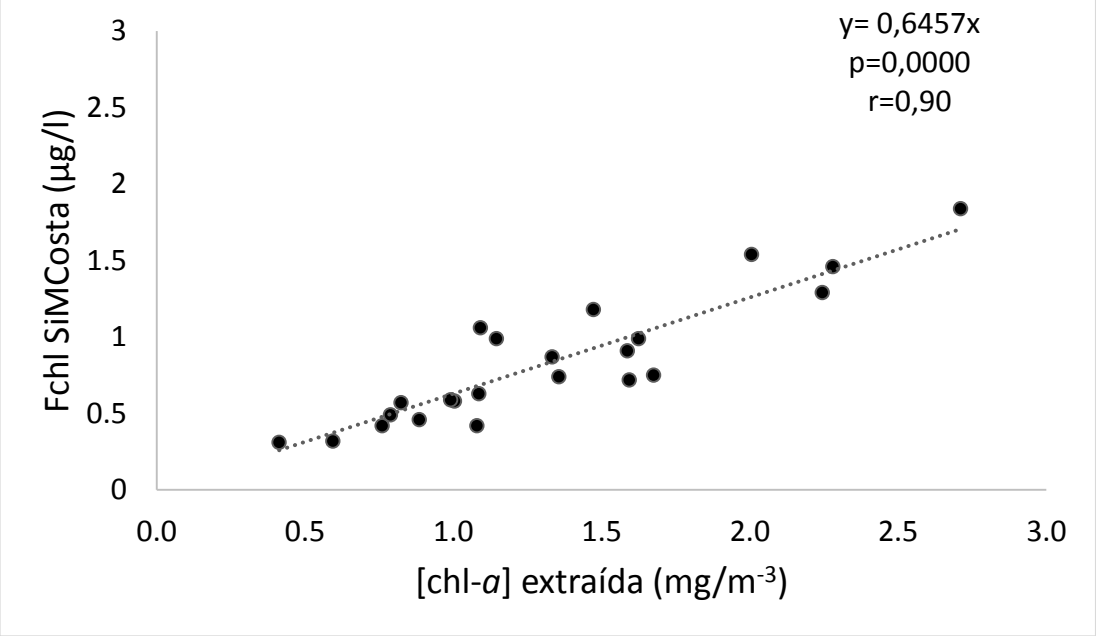


Legenda: pontos azuis – representativos do primeiro período (13 de dezembro de 2014 a 28 de janeiro de 2015); e pontos vermelhos – representativos do segundo período (10 de março de 2015 a 08 de abril de 2015).

4.2.2 Variação da concentração de clorofila-*a*

Com o intuito de transformar os dados de fluorescência de clorofila-*a* adquiridos por meio da boia SiMCosta para valores de concentração de clorofila-*a*, realizou-se um modelo de dependência entre eles. Esse modelo foi forçado a zero. O coeficiente de correlação encontrado foi de r= 0,90, e teste-*t* foi de p=0,0000 (Figura 21).

Figura 21 – Relação entre os valores da concentração de clorofila-*a* extraída (mg/m^{-3}) e a fluorescência de clorofila-*a* da boia SiMCosta (UR)



Para converter os dados de fluorescência adquiridos por meio da boia SiMCosta para a concentração real de clorofila-*a*, usou-se a seguinte equação:

Concentração real de clorofila-a [chl-a] (mg/m^{-3}) = Fchl SiMCosta / 0.6457 (4)

A média horária da concentração de clorofila-*a* foi maior no segundo bloco do que no primeiro (1,64 ± 0,64 e 1,14 ± 0,52, respectivamente, com p<0,00001) (Figura 22 e 23). O valor máximo para os meses de dezembro e janeiro foi de 2,62 mg/m^{-3}, enquanto que para os meses de março e abril foi de 4,97 mg/m^{-3}. Percebe-se que a variação da clorofila-*a* apresenta periodicidades diárias marcantes, o que fica mais evidente no gráfico referente à análise de ondaletas e Fourier (Figura 24 e 25).

Figura 22 – Concentração média horária da clorofila-*a* (mg/m^{-3}) no primeiro bloco analisado

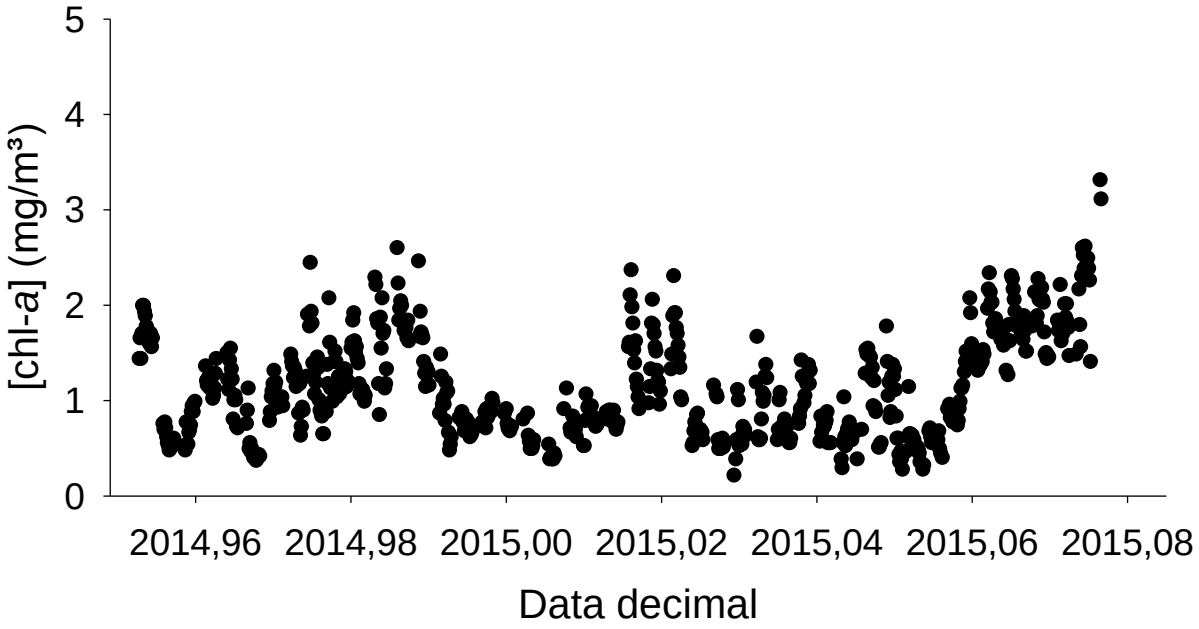
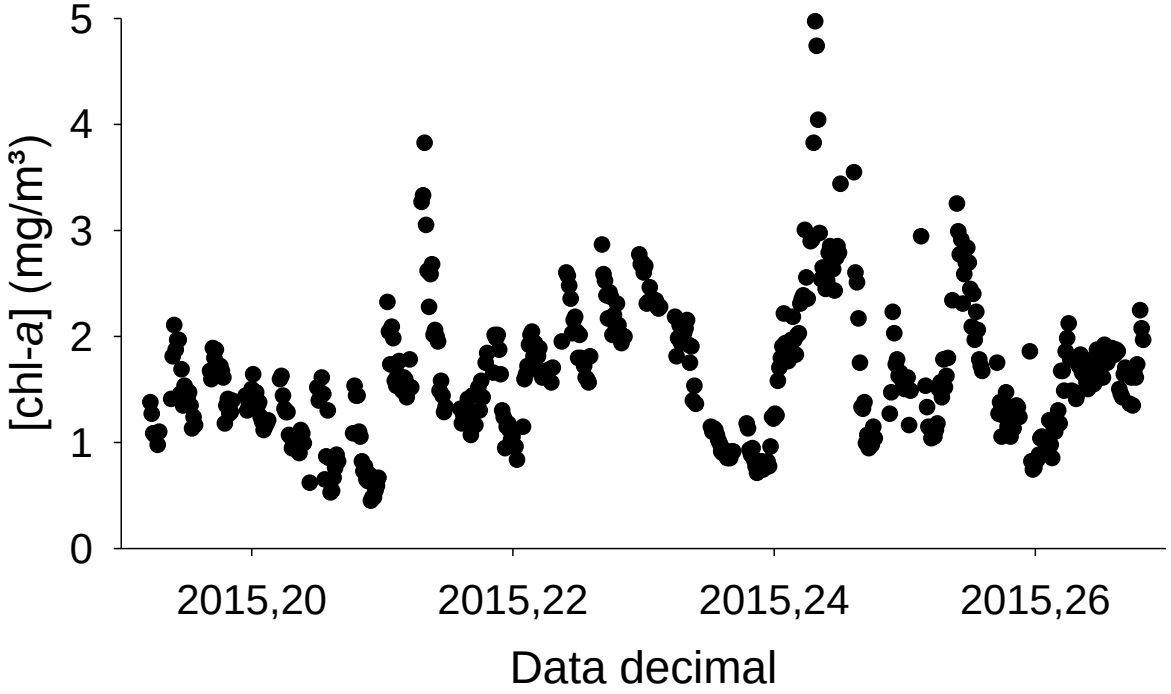
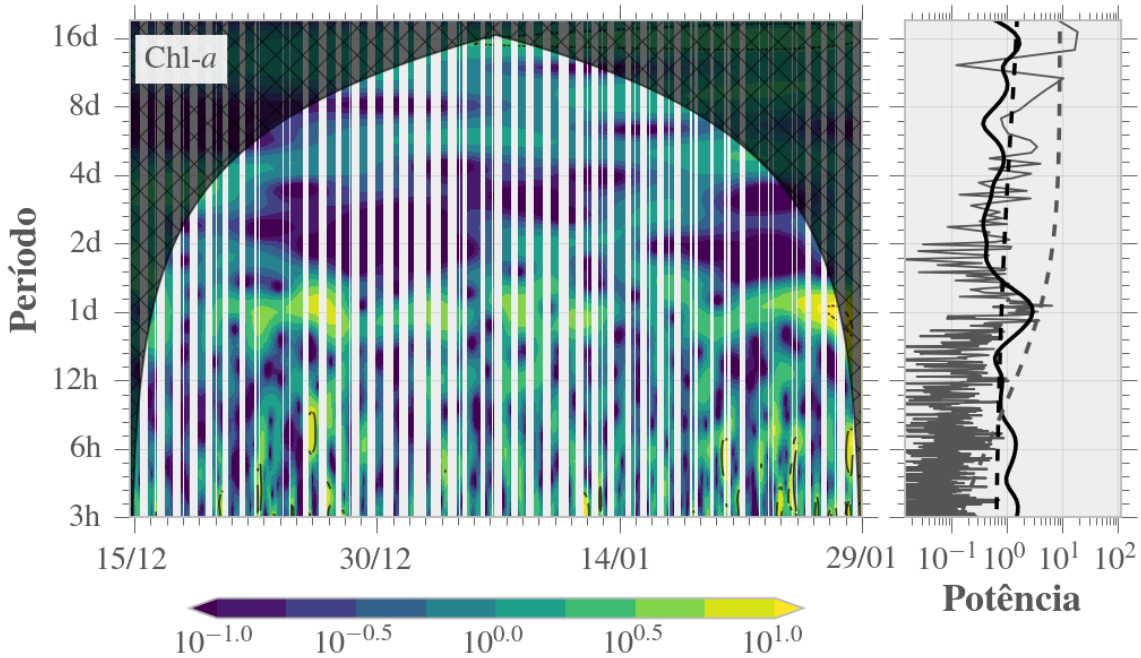


Figura 23 – Concentração média horária da clorofila-*a* (mg/m^{-3}) no segundo bloco analisado



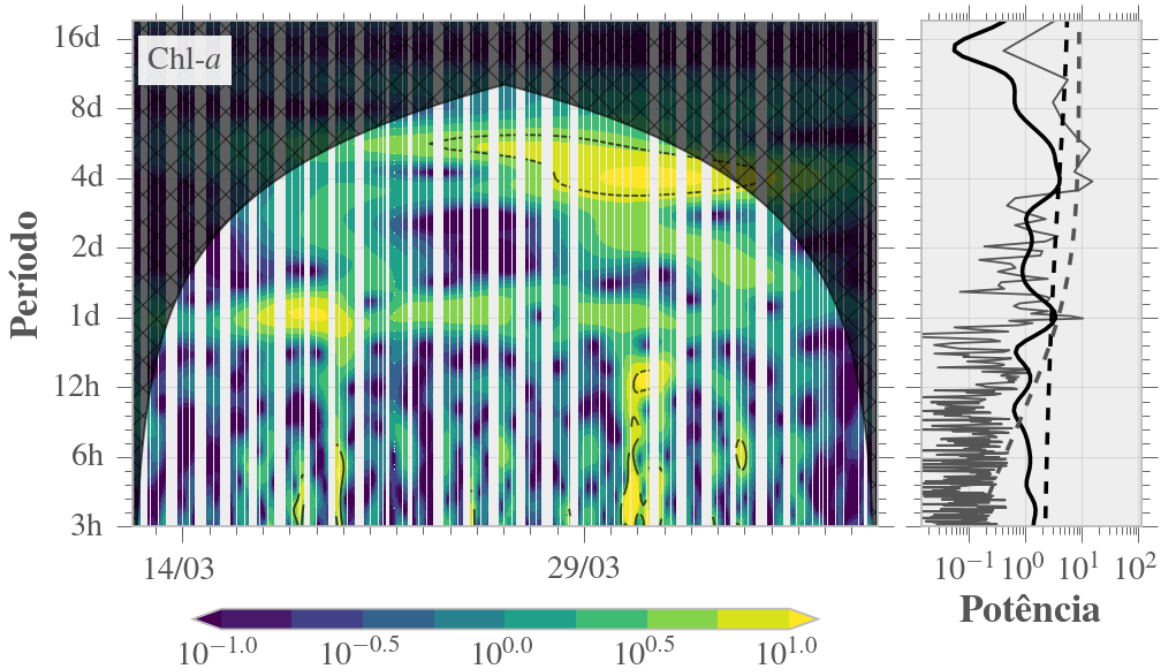
A análise espectral de ondaletas da concentração média horária de clorofila-*a* revelou periodicidades significativas de 24 horas nos dois blocos analisados, além de sinais de alta potência observados em menores escalas temporais, como em 6 e 12 horas (Figura 24 e 25). Na análise de Fourier, os picos significativos são aqueles que ultrapassam a linha tracejada cinza (ruído vermelho). Nesta, a variação da clorofila-*a* é semelhante ao gráfico das ondaletas, com exceção da data em que as periodicidades ocorrem, agora ausente.

Figura 24 – Análise espectral da concentração média horária de clorofila-a no primeiro bloco analisado



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier −linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

Figura 25 – Análise espectral da concentração média horária de clorofila-a no segundo bloco analisado



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier −linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

4.2.3 Variação da turbidez

Sendo a turbidez um proxy para a quantidade de material em suspensão na coluna de água, de acordo com os dados analisados, os meses de dezembro e janeiro apresentaram menores valores em comparação àqueles referentes ao segundo período (1,29 ± 0,93 NTU e 2,11 ± 2,37 NTU, respectivamente, com $p<0,00001$). O valor máximo de turbidez no primeiro bloco foi de 6,36 NTU, enquanto que em março e abril foi de 12,86 NTU (Figura 26 e 27).

A turbidez apresenta periodicidade em torno de 8, 12 e 24 horas, principalmente nos meses de dezembro e janeiro, com sinais significativos de alta potência também em escalas de dois a quatro dias e maiores que oito dias. Para o segundo bloco de dados, percebe-se pouca definição entre os picos do espectro de Fourier, ocorrendo eventos significativos acima de quatro dias (Figura 28 e 29).

Figura 26 – Turbidez média horária (NTU) no primeiro bloco analisado

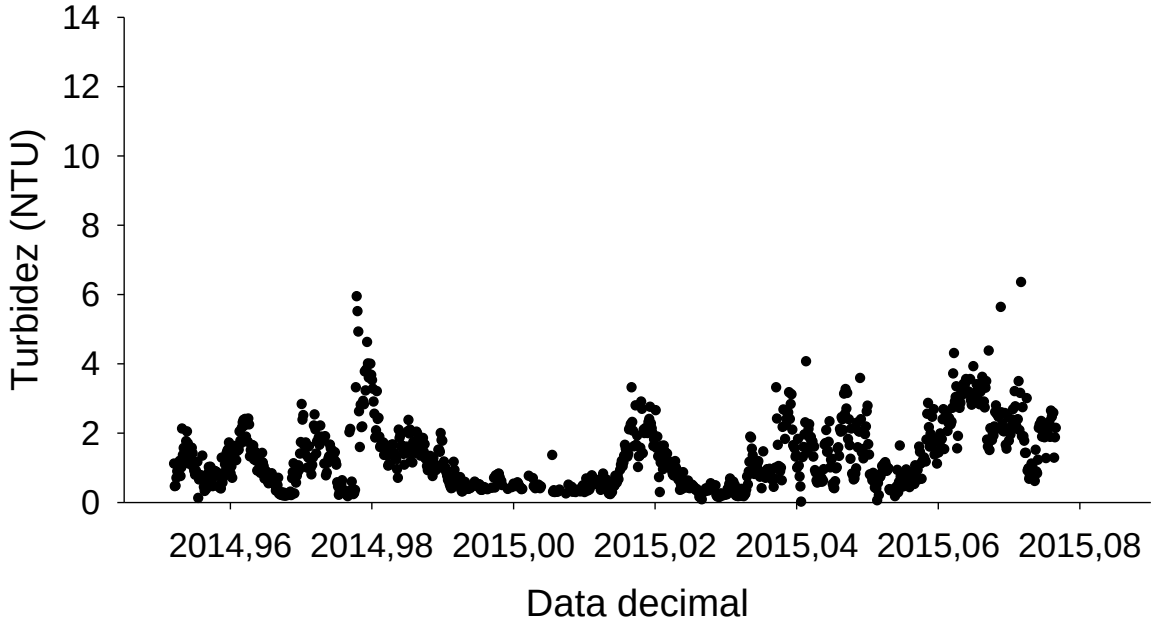


Figura 27 – Turbidez média horária (NTU) no segundo bloco analisado

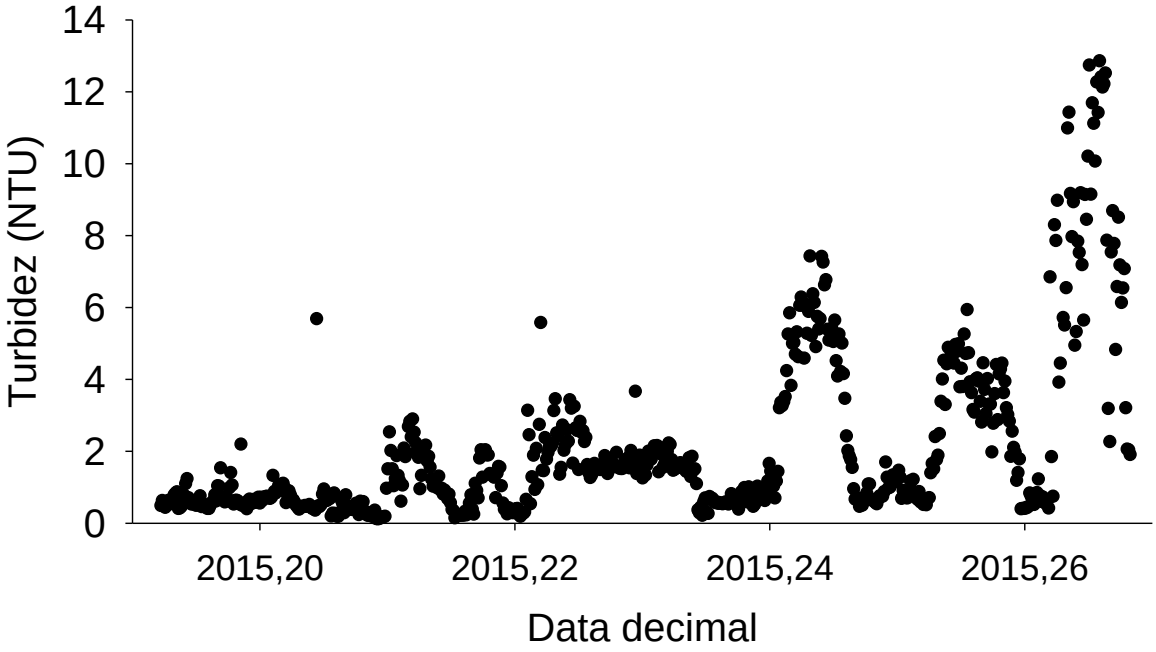
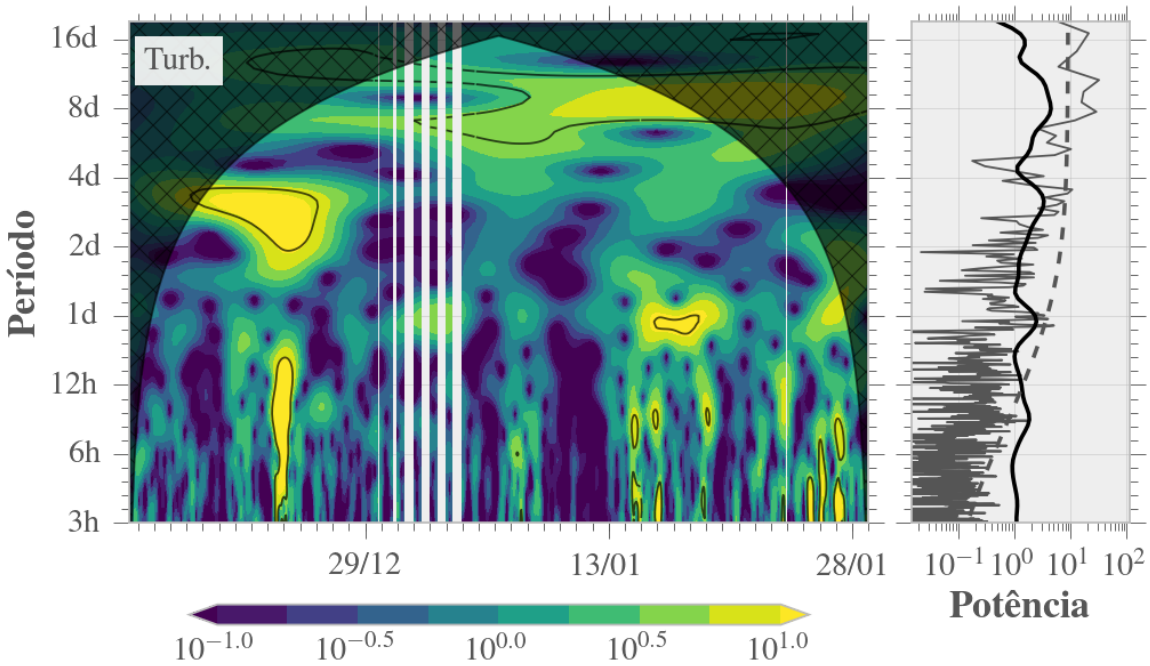
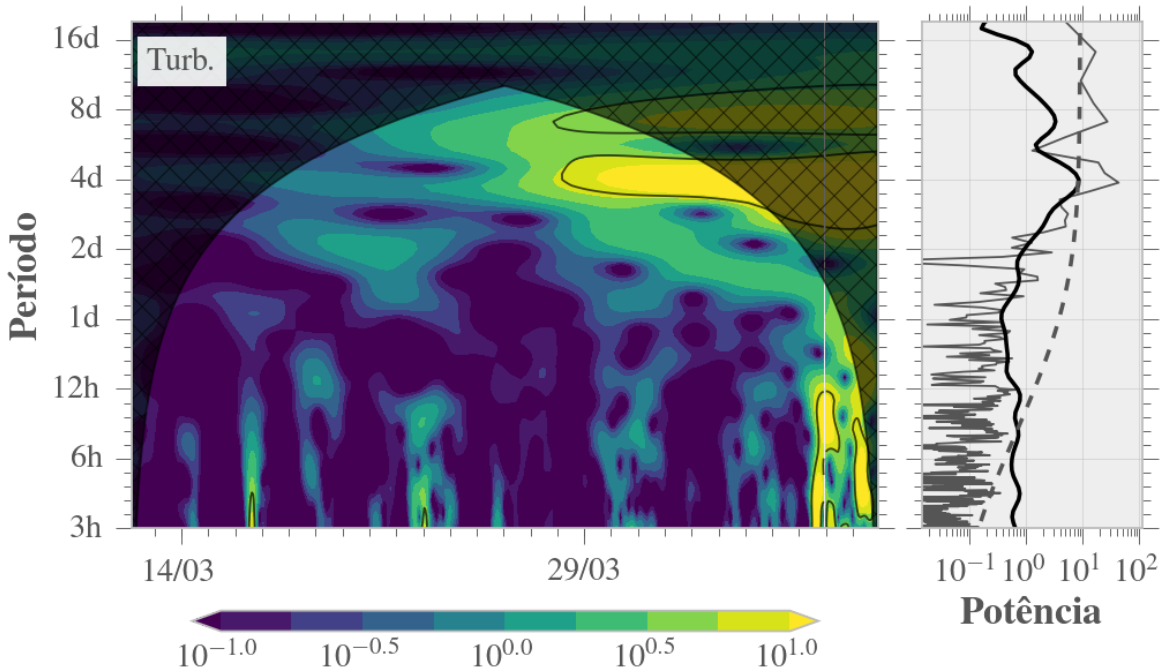


Figura 28 – Análise espectral da turbidez média horária do primeiro bloco analisado



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

Figura 29 – Análise espectral da turbidez média horária do segundo bloco analisado



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

4.2.4 Análise dos dados de ventos

Dados de direção e intensidade do vento, integrados em 36 horas antes da medida adquirida, mostram que, para os dois blocos de tempo considerados, houve predominância de ventos do quadrante norte/nordeste. Os ventos vindos desse quadrante também apresentaram maiores intensidades do que aqueles oriundos do quadrante sul/sudoeste (Figura 30 e 31) – característicos da entrada de frentes frias, tendo apresentado frequência de ocorrência de 20% no primeiro bloco e maior que 45% nos meses de março e abril.

Figura 30 – Velocidade (Km/h), direção (0-360°) e frequência de ocorrência (círculos pontilhados) dos ventos no primeiro bloco analisado

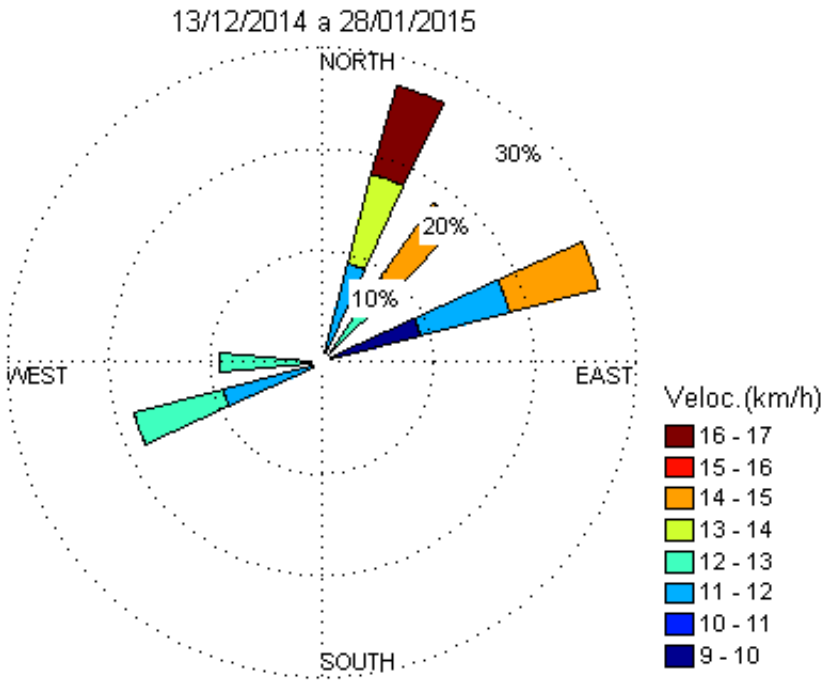
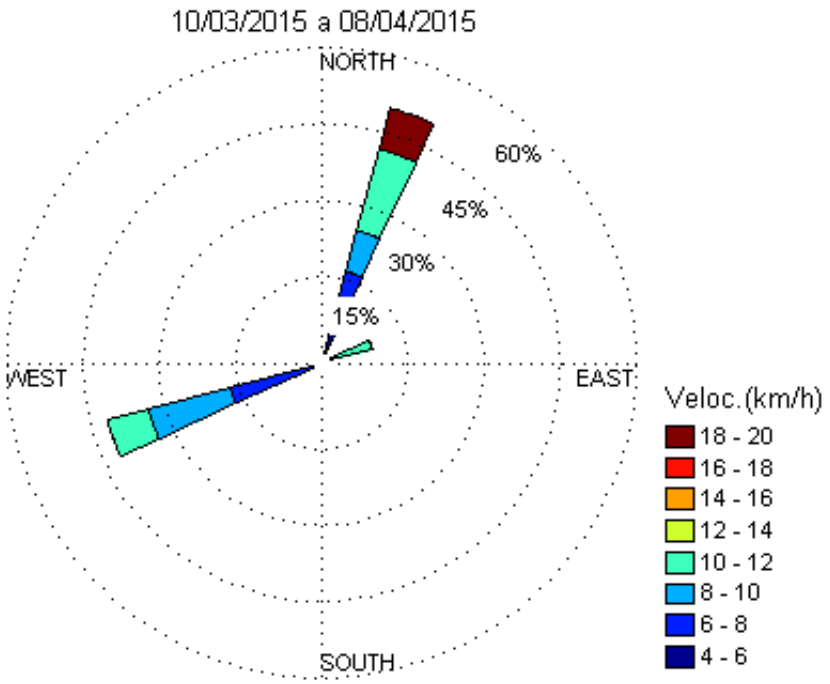


Figura 31 – Velocidade (Km/h), direção (0-360°) e frequência de ocorrência (círculos pontilhados) dos ventos no segundo bloco analisado



Em ambos os blocos de dados, os ventos predominantes foram de 67,5°, representativos do quadrante norte/nordeste, e 247,5°, característicos do quadrante sul/sudoeste (Figura 32 e 33). Além disso, houve diferença significativa na intensidade dos ventos entre os dois blocos ($p<0,0001$), com maiores velocidades nos meses de março e abril.

Figura 32 – Correlação entre a velocidade (Km/h) e direção (°) média horária do vento no primeiro bloco analisado

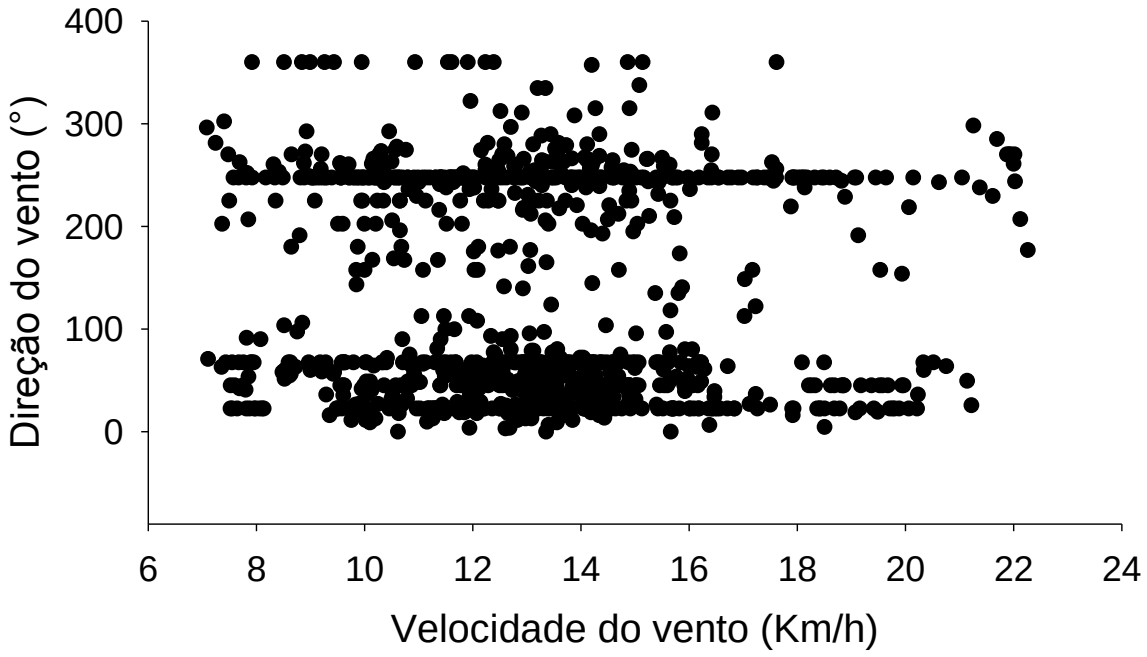
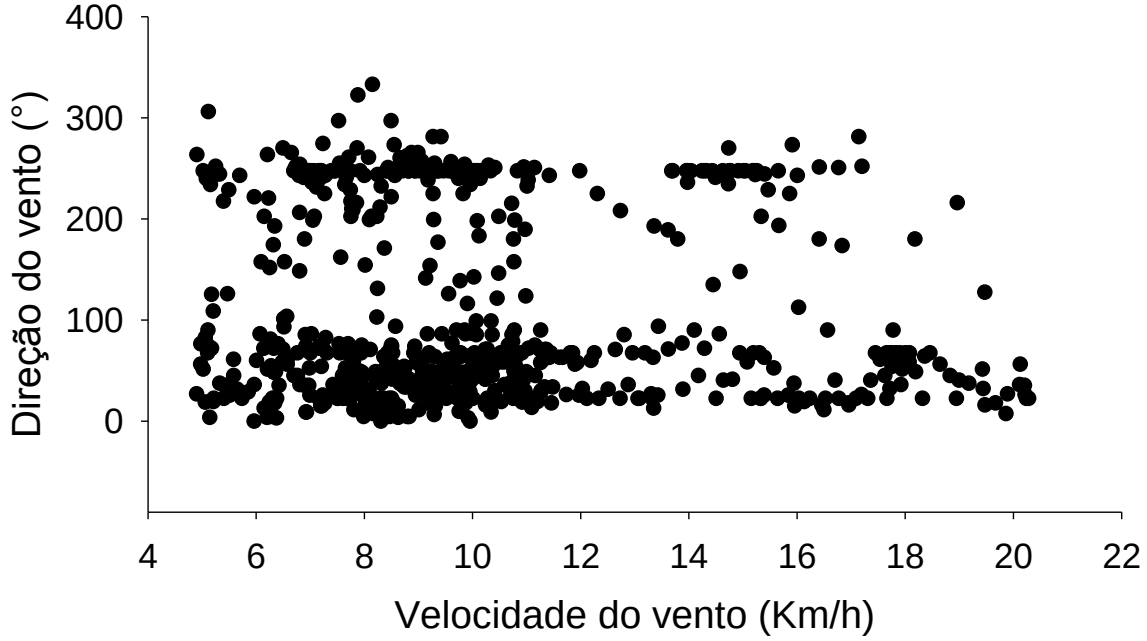
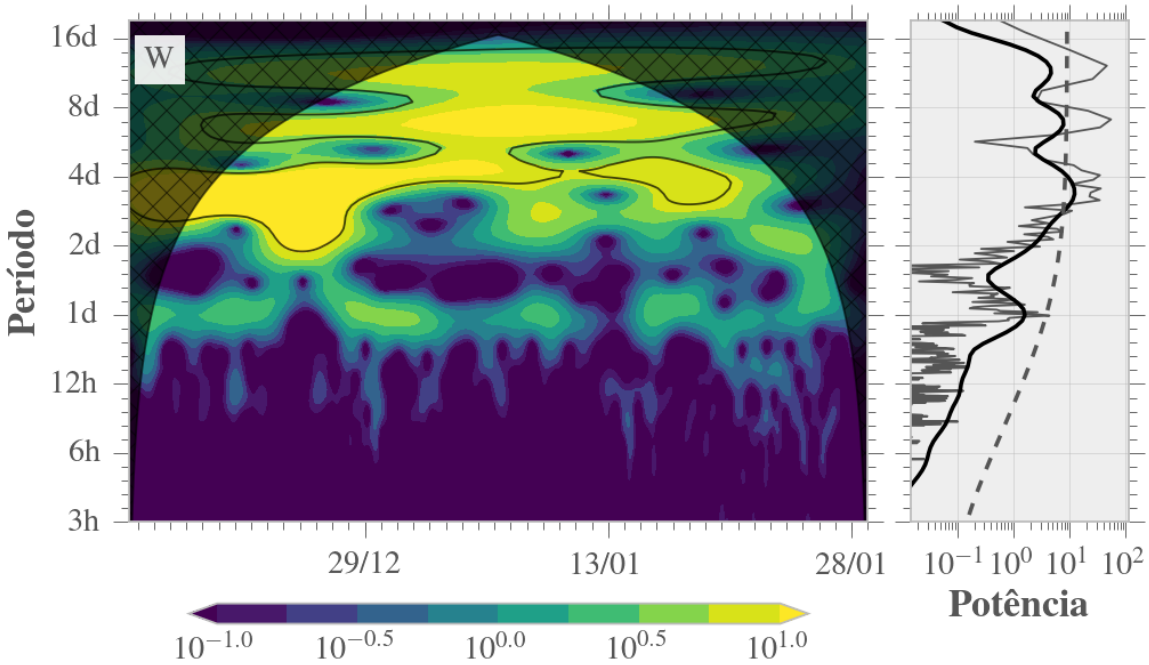


Figura 33 – Correlação entre a velocidade (Km/h) e direção (°) média horária do vento no segundo bloco analisado



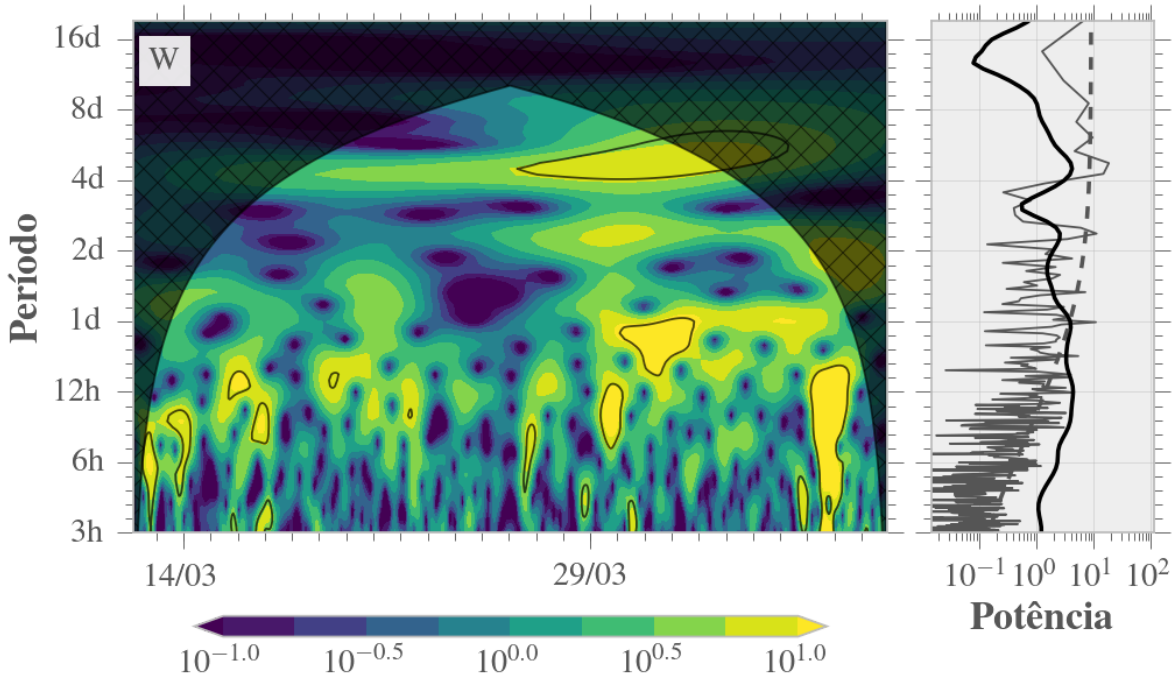
Para os meses de dezembro e janeiro, a análise espectral das ondaletas e de Fourier da intensidade do vento mostra uma variabilidade bem marcada, com periodicidade de 24 horas e acima de três dias (Figura 34). Essas periodicidades diárias nos meses mais quentes provavelmente estejam relacionadas com o efeito das brisas marítimas. Já nos meses de março e abril, verificam-se uma periodicidade marcada da velocidade do vento por volta de quatro dias e sinais de alta potência em escalas menores que 24 horas, com pouca definição entre os picos do espectro de Fourier (Figura 35).

Figura 34 – Análise espectral da magnitude média horária da velocidade do vento (W) do primeiro bloco analisado



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

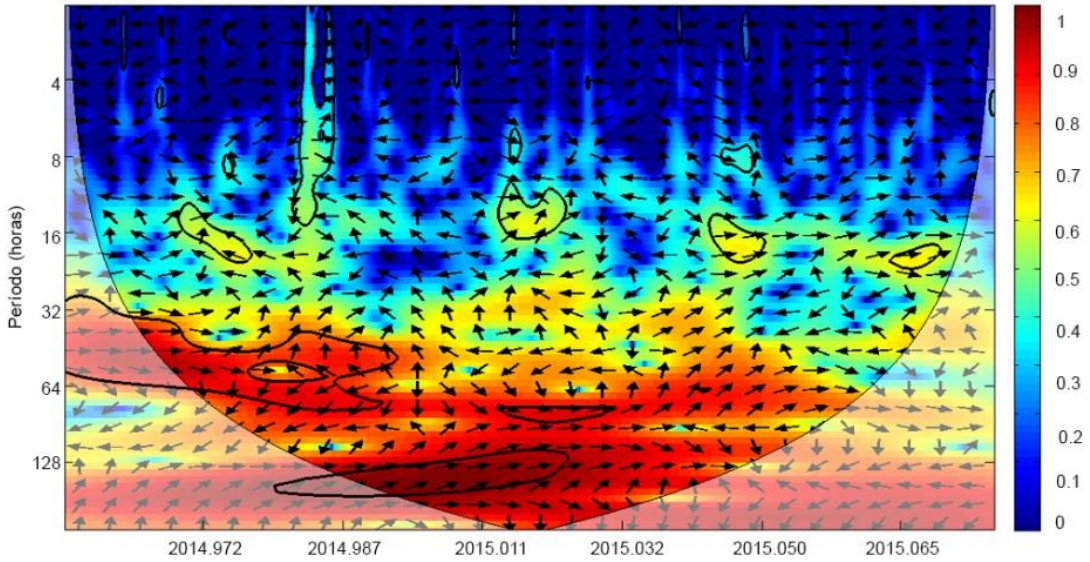
Figura 35 – Análise espectral da magnitude média horária da velocidade do vento (W) do segundo bloco analisado



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

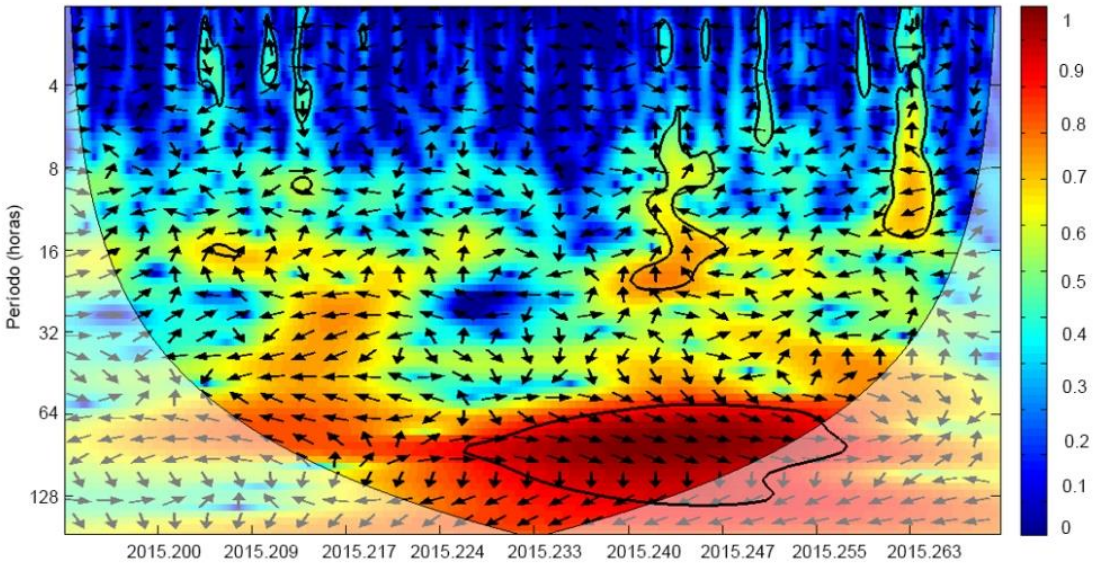
Para melhor examinar a relação entre a série da média horária da concentração de clorofila-*a* e a velocidade do vento no plano de escala e tempo, construiu-se o espectro cruzado de ondaletas, no qual é possível visualizar eventos coincidentes entre as duas séries. No primeiro bloco, visualiza-se uma correlação pronunciada da velocidade do vento com a concentração de clorofila-*a* entre dois e cinco dias. Já no segundo bloco, a maior correlação acontece na escala de tempo de três dias. Dentro da área de maior correlação, as flechas estão apontadas para a direita, o que significa que a correlação entre a flutuação da velocidade do vento e a clorofila-*a* varia em fase (Figura 36 e 37).

Figura 36 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da velocidade do vento e concentração de clorofila-*a* do primeiro bloco analisado



Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita indicam flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

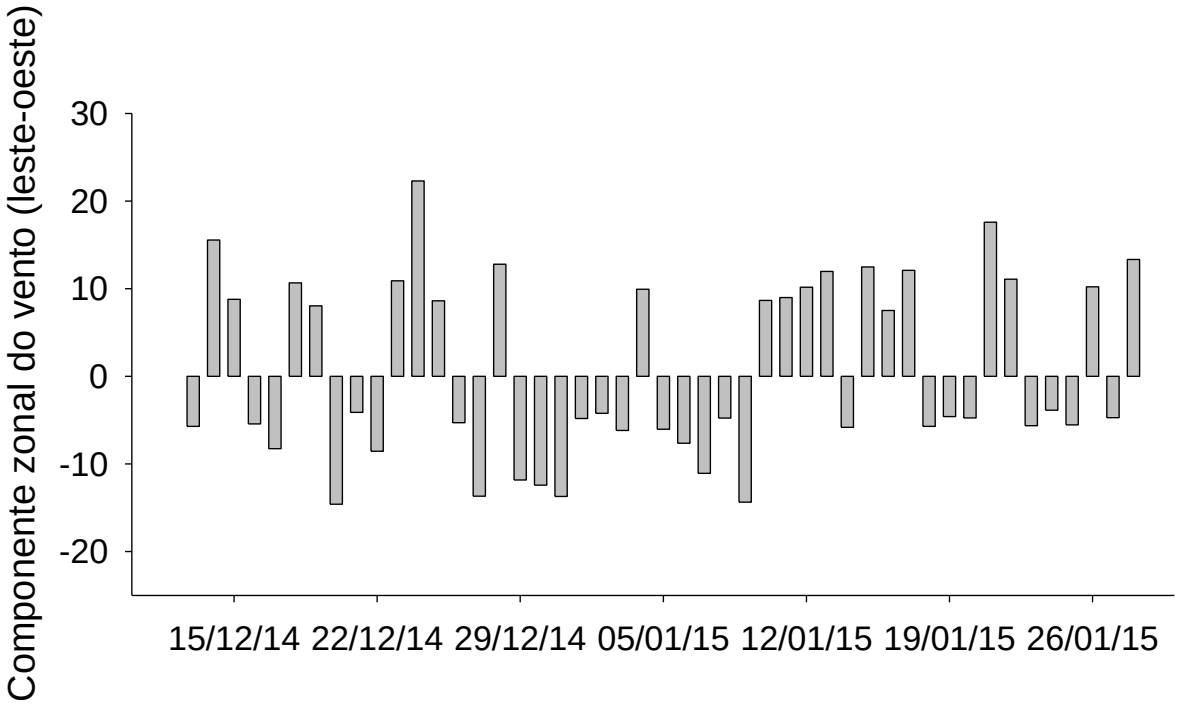
Figura 37 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da velocidade do vento e concentração de clorofila-*a* do segundo bloco analisado



Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita indicam flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

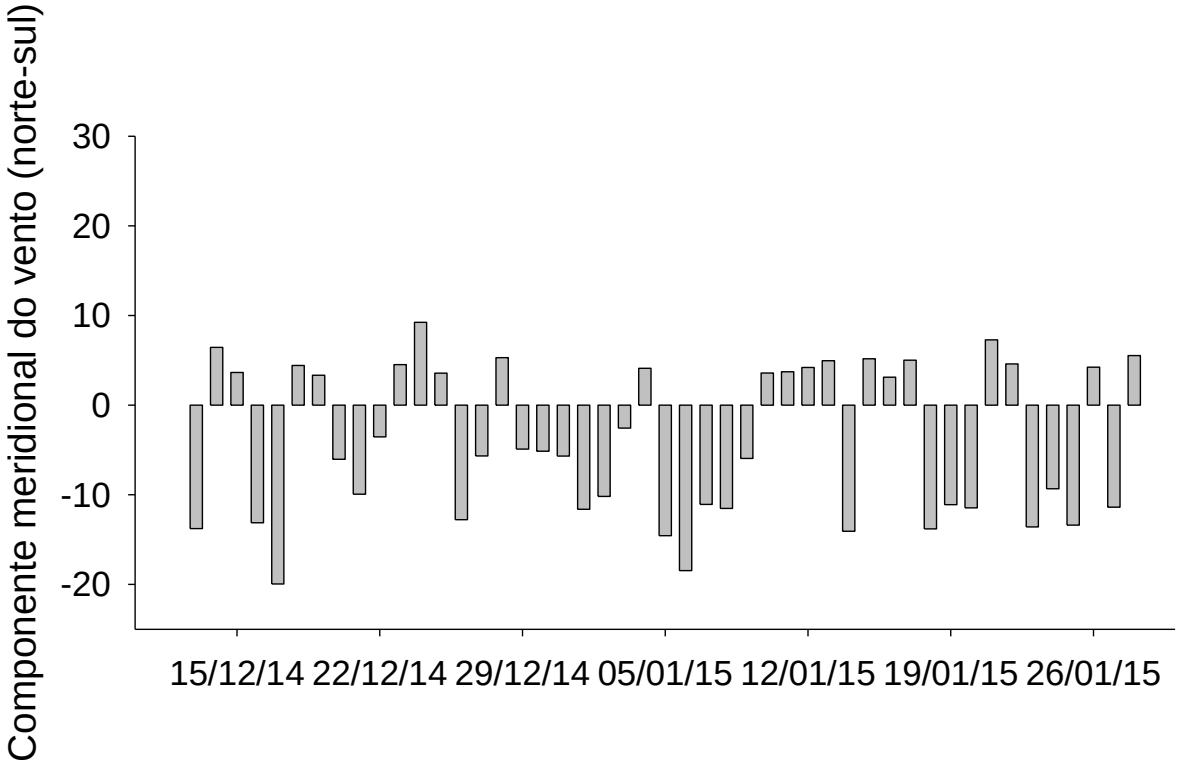
Quanto aos componentes zonais (leste-oeste) e meridionais (norte-sul) do vento, a velocidade dos primeiros foi maior do que dos segundos, com diferença significativa entre eles ($p<0,0001$). Houve, também, diferença estatística entre a intensidade dos componentes positivos e negativos dos ventos zonais e meridionais ($p<0,0001$) em ambos os blocos analisados − os ventos do leste e norte (negativos) apresentaram maiores valores relativos em comparação aos ventos do oeste e sul (positivos) (Figura 38, 39, 40 e 41) no primeiro bloco de dados.

Figura 38 – Componente u (zonal) do vento do primeiro bloco analisado



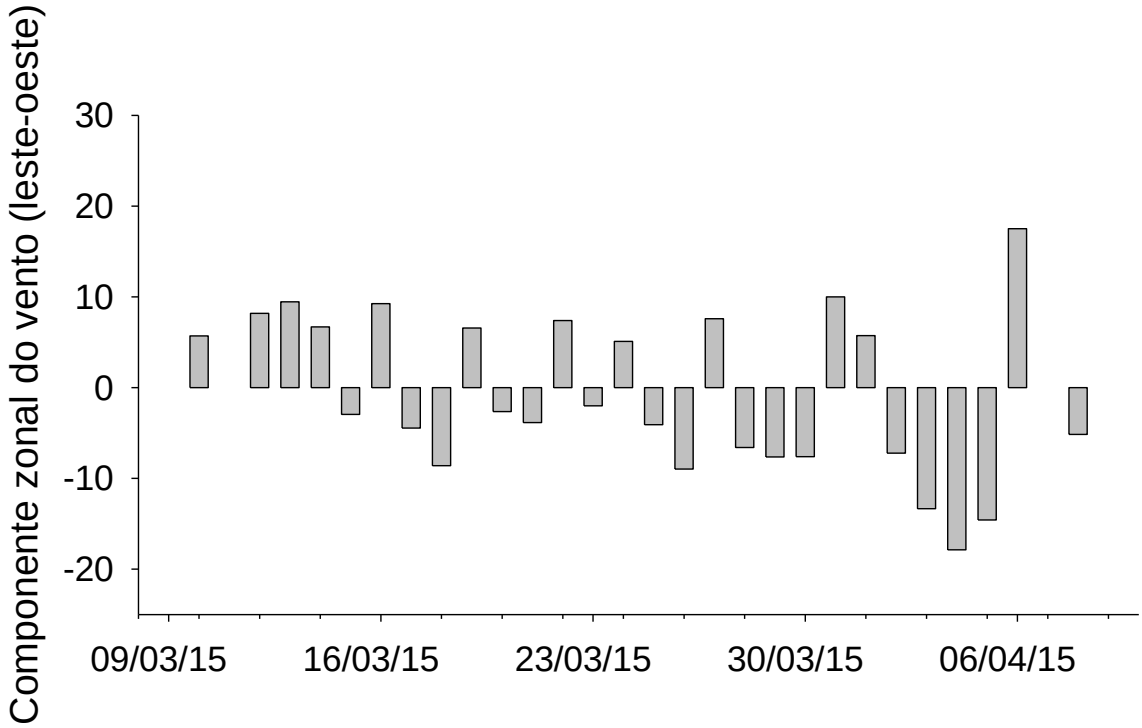
Legenda: valores negativos de u são ventos vindos do leste.

Figura 39 – Componente v (meridional) do vento do primeiro bloco analisado



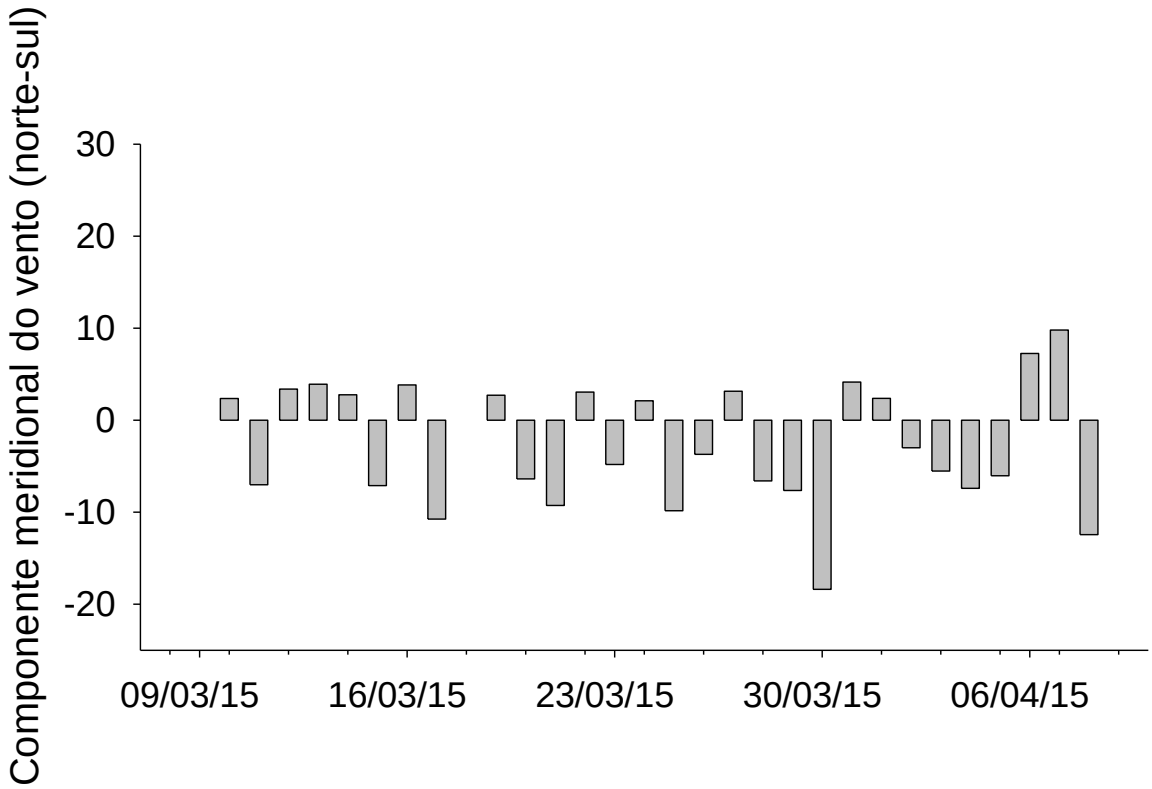
Legenda: valores negativos de v são ventos vindos do norte.

Figura 40 – Componente u (zonal) do vento do segundo bloco analisado



Legenda: valores negativos de u são ventos vindos do leste.

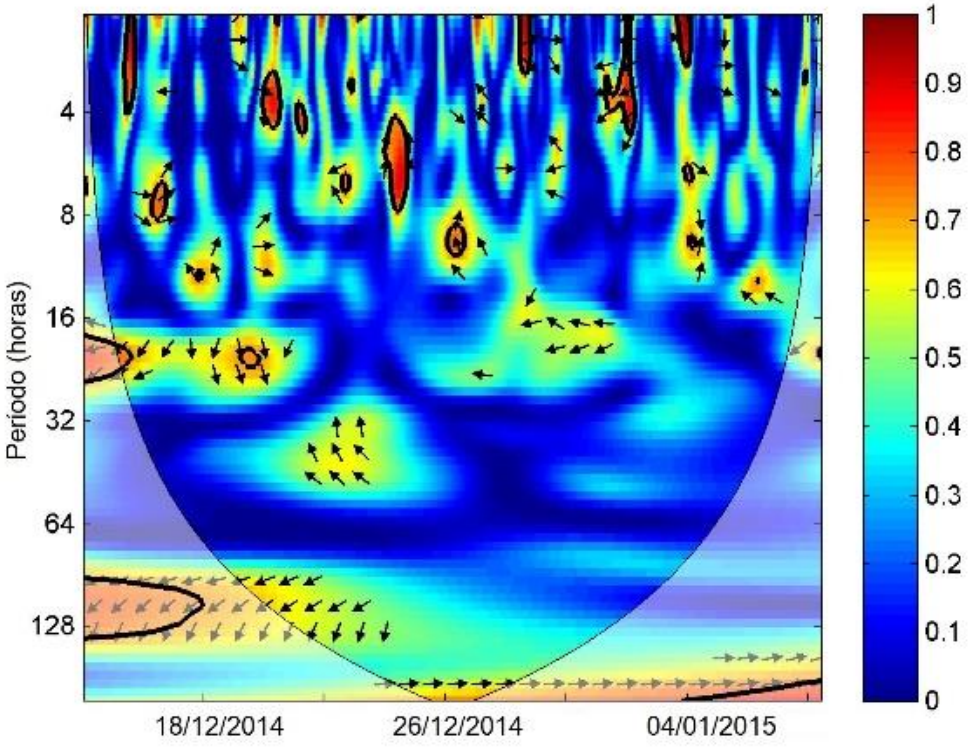
Figura 41 – Componente v (meridional) do vento do segundo bloco analisado



Legenda: valores negativos de v são ventos vindos do norte.

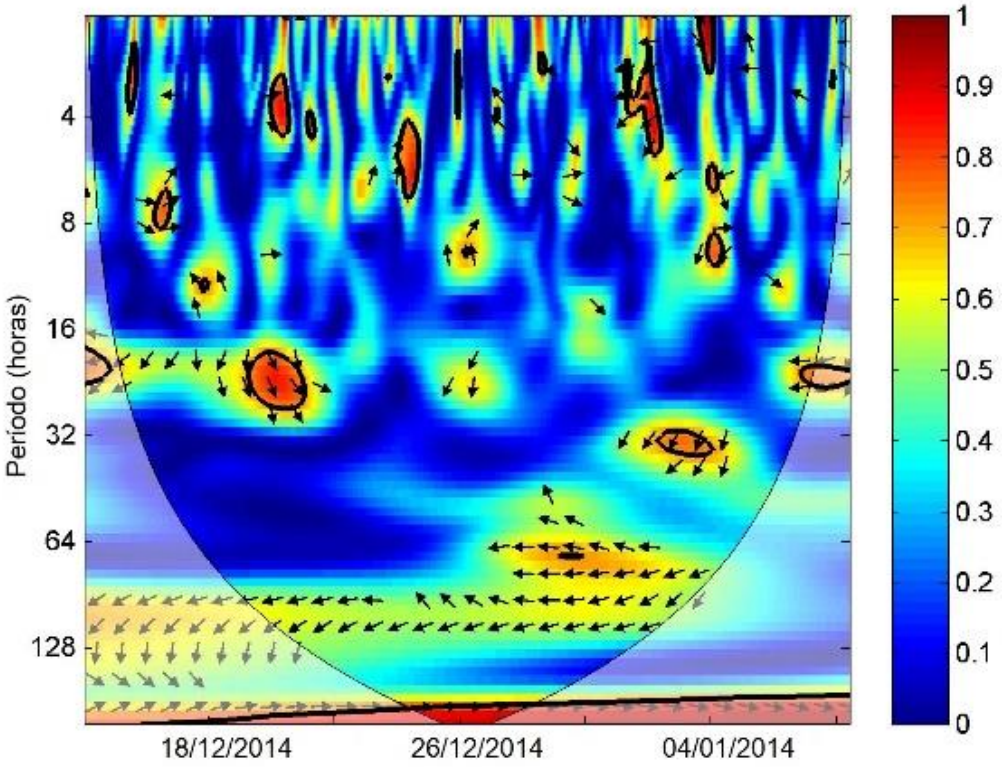
O espectro cruzado de ondaletas entre o componente zonal e meridional do vento e a concentração de clorofila-*a* mostrou pequenas áreas significativas de eventos coincidentes por volta de 24 horas para os meses de dezembro e janeiro (Figura 42 e 43). Em contrapartida, no período de março e abril, os componentes u e v do vento e a concentração de clorofila-*a* apresentaram grandes áreas de forte correlação na escala de tempo de 24 horas e, principalmente, em torno de três dias (~72 horas) (Figura 44 e 45). Percebe-se, pela direção das flechas, que, para períodos de tempo de três dias, a clorofila-*a* ocorre em antifase com os componentes zonais e meridionais do vento, ou seja, quando os eixos dos componentes são positivos (ventos vindos do oeste e sul), a concentração de clorofila-*a* é menor, o que não acontece na escala de 24 horas.

Figura 42 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente zonal e da concentração de clorofila-*a* durante o primeiro bloco analisado



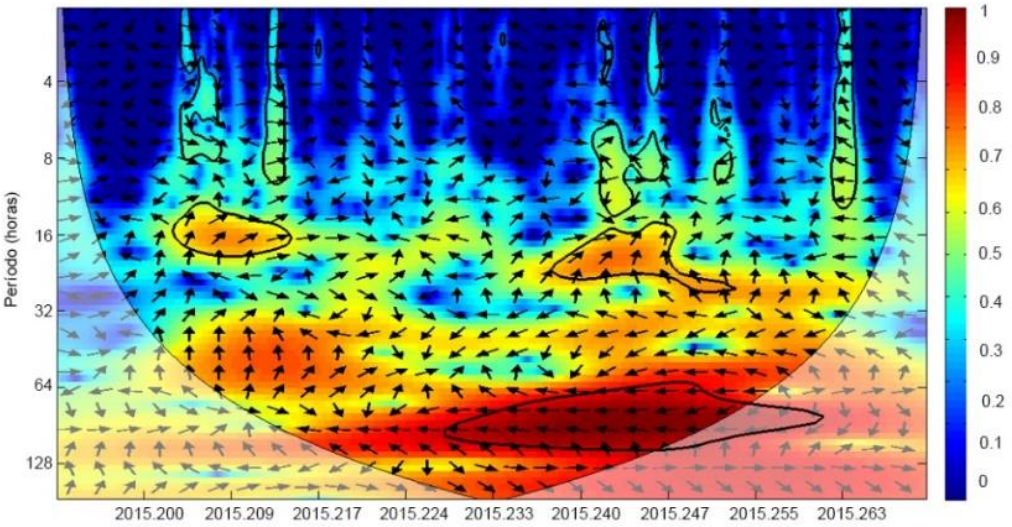
Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

Figura 43 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente meridional e da concentração de clorofila-*a* durante o primeiro bloco analisado



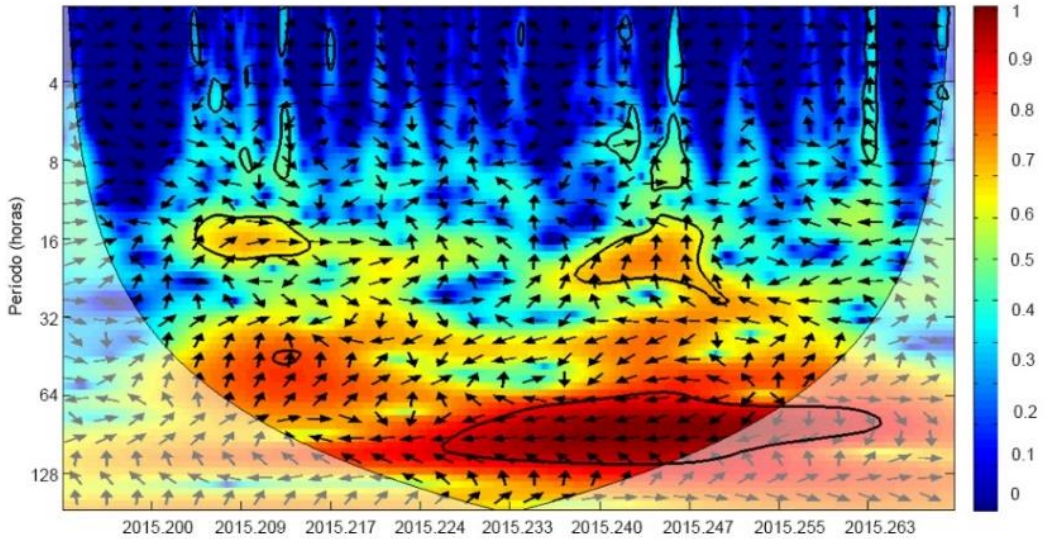
Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

Figura 44 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente zonal e da concentração de clorofila-*a* durante o segundo bloco analisado



Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

Figura 45 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária do componente meridional e da concentração de clorofila-a durante o segundo bloco analisado

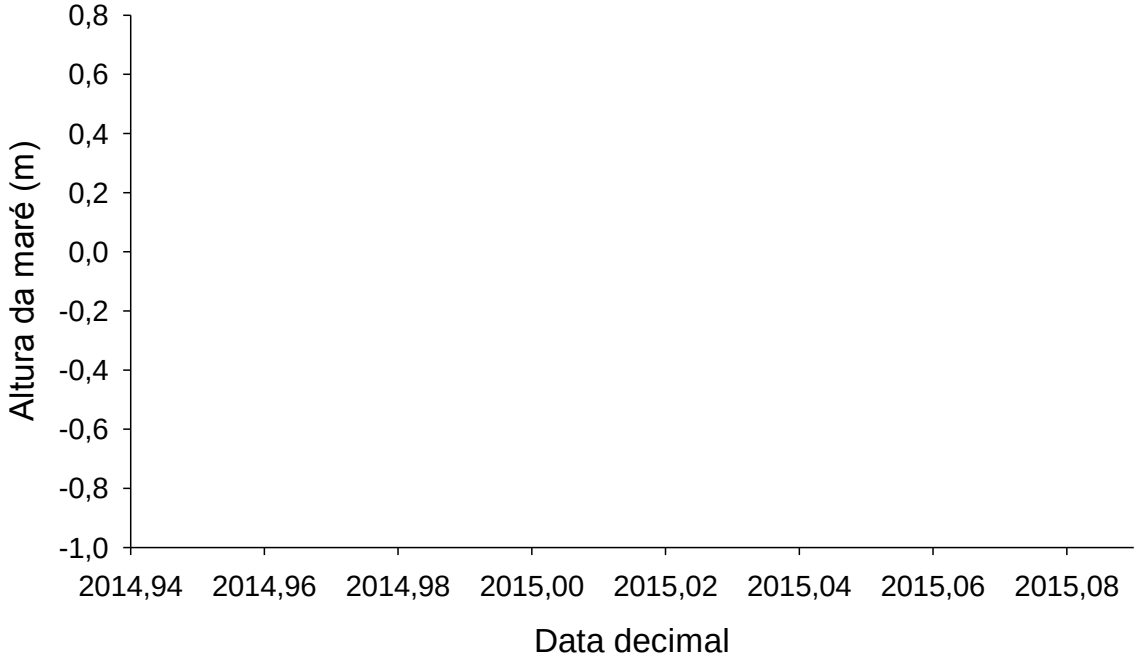


Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

4.2.5 Análise dos dados de marés

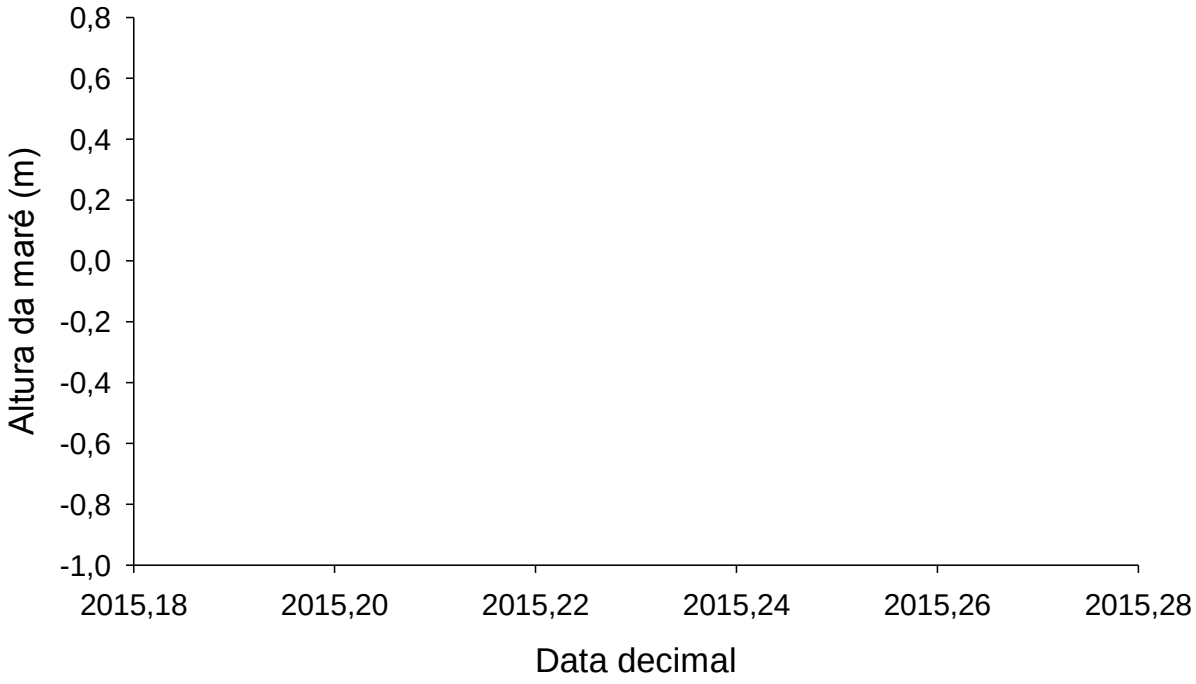
Para o primeiro período analisado, totalizando 47 dias, os picos das marés de sizígia ocorreram nos dias 21 de dezembro de 2014 (lua nova), 05 de janeiro de 2015 (lua cheia) e 20 de janeiro de 2015 (lua nova). Já as menores intensidades da variação de maré ocorreram nos quartos minguantes, nos dias 14 de dezembro de 2014 e 13 de janeiro de 2015, e nos quartos crescentes, nos dias 28 de dezembro de 2014 e 27 de janeiro de 2015. A variação da maré no CSS durante o período analisado variou de -0,79 a 0,55 metros (Figura 46).

Figura 46 – Altura da maré (m) no primeiro bloco analisado



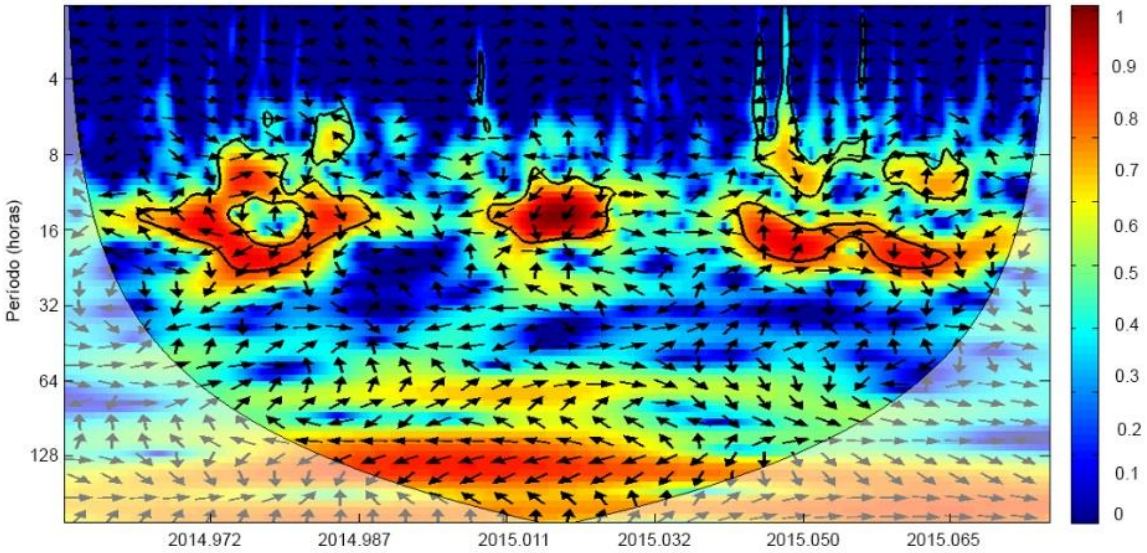
Em relação ao segundo bloco de dados analisados, que totalizou 27 dias, os picos das marés de sizígia ocorreram no dia 20 de março de 2015 (lua nova) e 04 de abril de 2015 (lua cheia). Já as variações menos intensas de maré ocorreram no quarto minguante, dia 13 de março de 2015, e no quarto crescente, dia 27 de março de 2015. A variação da maré nesse período compreendeu um intervalo situado entre -0,78 e 0,55 metros (Figura 47).

Figura 47 – Altura da maré (m) no segundo bloco analisado



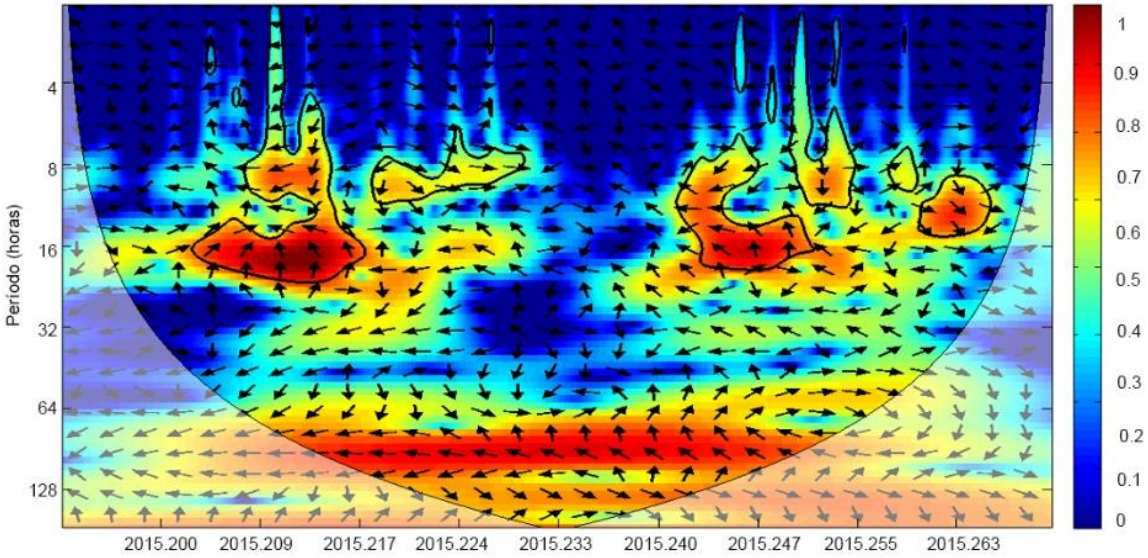
No espectro cruzado de ondaletas, percebe-se a existência de uma correlação bem marcada entre as séries temporais da concentração de clorofila-*a* e a amplitude da maré, com periodicidades de aproximadamente 12 e 24 horas. Entretanto, essa alta correlação só existe durante as marés de sizígia (Figura 48 e 49). O fato de não ser possível visualizar uma ordenação das flechas dentro das áreas de correlação significativa indica que a flutuação entre as duas séries não ocorre em fase.

Figura 48 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da altura da maré e da concentração de clorofila-*a* do primeiro bloco analisado



Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda representam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

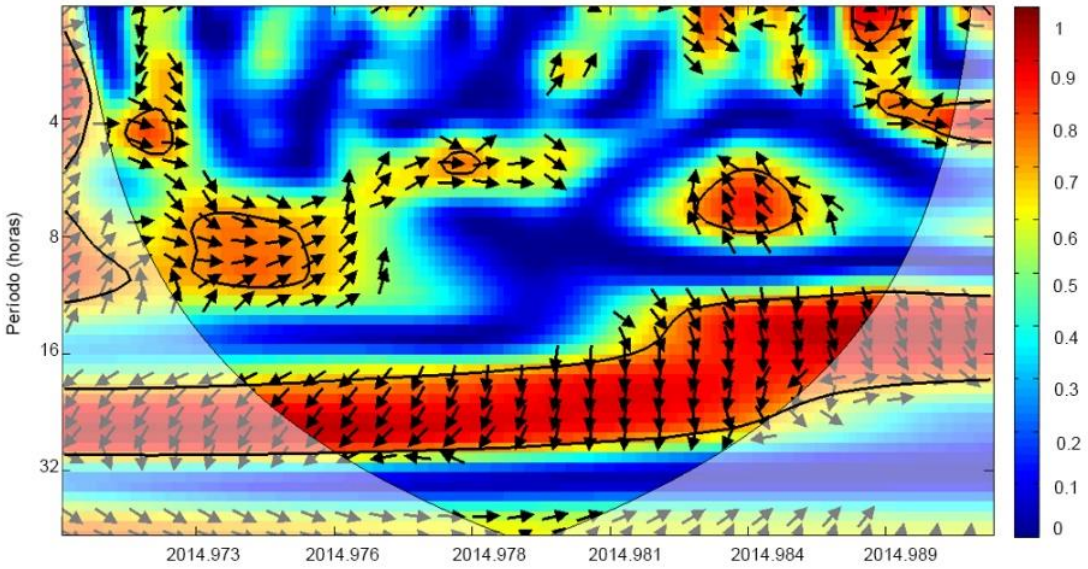
Figura 49 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da altura da maré e da concentração de clorofila-*a* do segundo bloco analisado



Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda representam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

A fim de melhor compreender a relação entre a maré e a clorofila-*a* dentro de um ciclo da maré de sizígia, realizou-se uma análise de espectro cruzado de ondaletas no intervalo de uma semana durante essa fase da maré (21 a 28 de dezembro de 2014). O resultado mostra uma alta correlação entre as duas séries temporais, com variabilidade aproximada de 24 horas. Ademais, as direções das flechas apresentam diferença de fase de aproximadamente 90° entre as séries (Figura 50).

Figura 50 – Espectro cruzado de ondaletas da média horária da altura da maré e da concentração de clorofila-*a* do dia 21 a 28 de dezembro de 2014



Legenda: a escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda, representam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

Em suma, análises espectrais da série temporal da concentração de clorofila-*a* e da altura da maré revelaram alta correlação entre as duas séries durante as marés de sizígia, em periodicidades de aproximadamente 12 e 24 horas. Em relação à direção e intensidade do vento, o espectro cruzado de ondaletas apresentou áreas de forte correlação com a clorofila-*a* e periodicidades dominantes de três dias.

4.3 ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE ABSORÇÃO DA LUZ

A penetração da luz nos oceanos tem grande importância para os ecossistemas pelágicos e bentônicos, sendo, em primeira ordem, controlada pelo coeficiente de absorção espectral da luz na água do mar: a(λ) (m^{-1}). Esse coeficiente é determinado pela soma da própria água, do fitoplâncton, dos detritos e do MODC (Kirk, 1994). Em regiões costeiras, as variações nas contribuições relativas desses componentes no tempo e no espaço são respostas aos fatores ambientais ligados à circulação da água. Ressalta-se, ainda, que feições espectrais de absorção da luz pelo fitoplâncton podem fornecer informações sobre sua taxonomia, enquanto que a absorção pelos detritos e

pelo MODC pode ser indício de variações em suas fontes e na estrutura física da coluna de água. Diante disso, o objetivo desta seção consiste em responder à terceira hipótese levantada neste estudo, bem como mostrar a variabilidade quanto à magnitude e às formas espectrais dos coeficientes de absorção de luz do fitoplâncton, dos detritos e do MODC.

4.3.1 Contribuição relativa na absorção de luz por cada componente ótico

Houve uma grande variabilidade das contribuições relativas de cada componente ao coeficiente espectral de absorção da luz ao longo dos meses de verão. Em dezembro e janeiro, a contribuição do fitoplâncton prevaleceu na maioria dos dias, com dominância superior a 30%, e dominância máxima de 60% nos dias 23 de dezembro de 2014 e 30 de dezembro de 2014. A contribuição relativa do fitoplâncton foi de 46% e dos detritos foi de 33% (Figura 51 e 52). A magnitude de absorção do fitoplâncton, do MODC e dos detritos está representada em um único comprimento de onda (443nm) para facilitar a comparação entre esses componentes.

Figura 51 – Contribuições óticas em cada dia do primeiro bloco de dados analisados

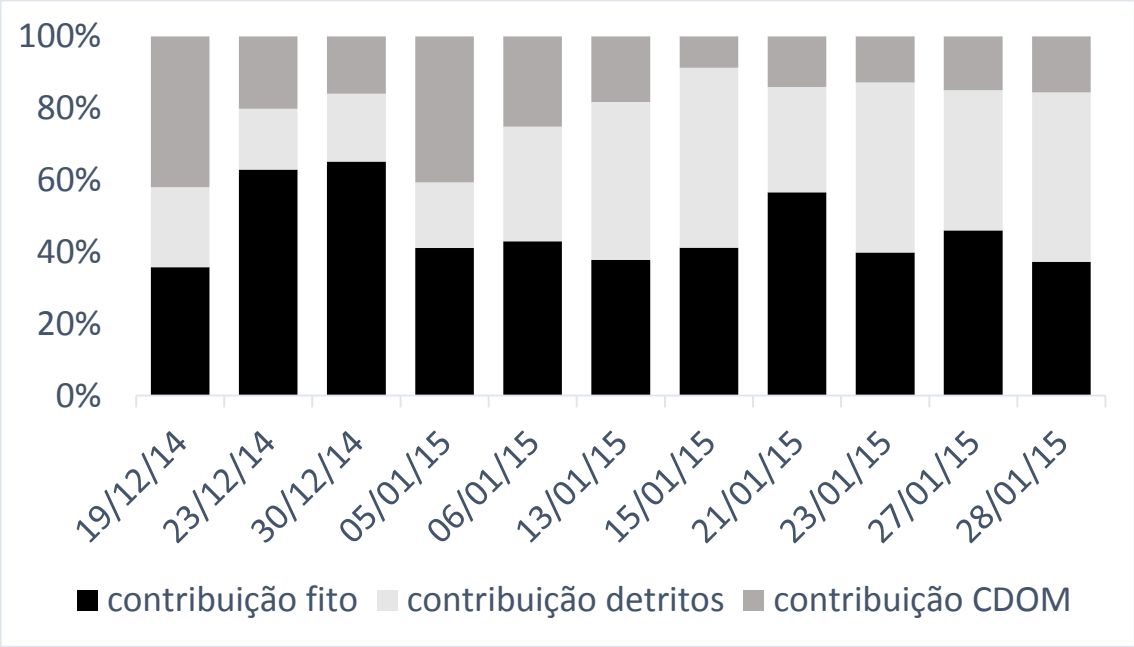
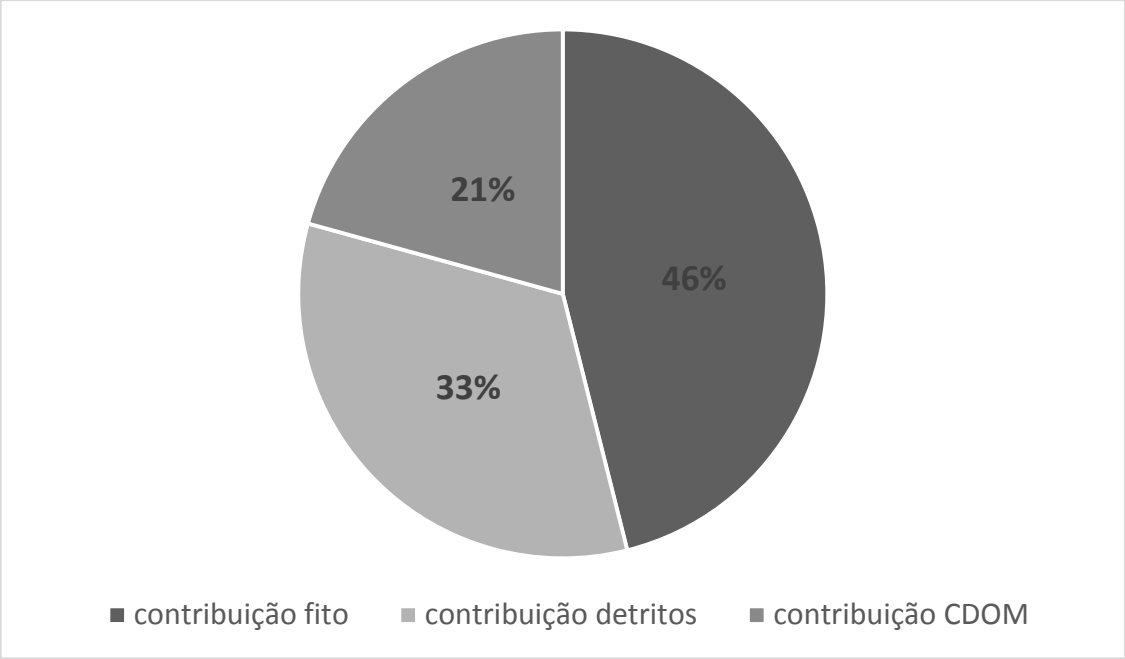


Figura 52 – Contribuições óticas integradas do primeiro bloco de dados analisados



Nos meses de março e abril, embora tenha havido uma redução na contribuição relativa na absorção de luz pelo fitoplâncton, este predominou entre os demais componentes óticos, apresentando uma contribuição integrada no período analisado de 38% (Figura 53 e 54). Já a contribuição relativa do MODC aumentou em relação ao primeiro bloco, ficando em segundo lugar, com 34%.

Figura 53 – Contribuições óticas em cada dia do segundo bloco de dados analisados

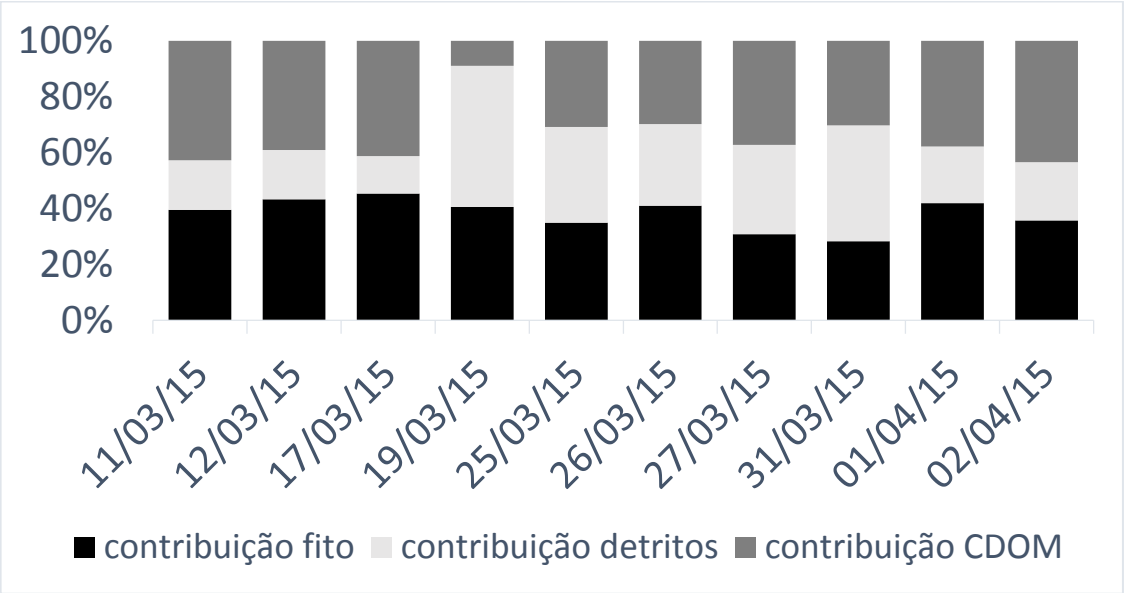
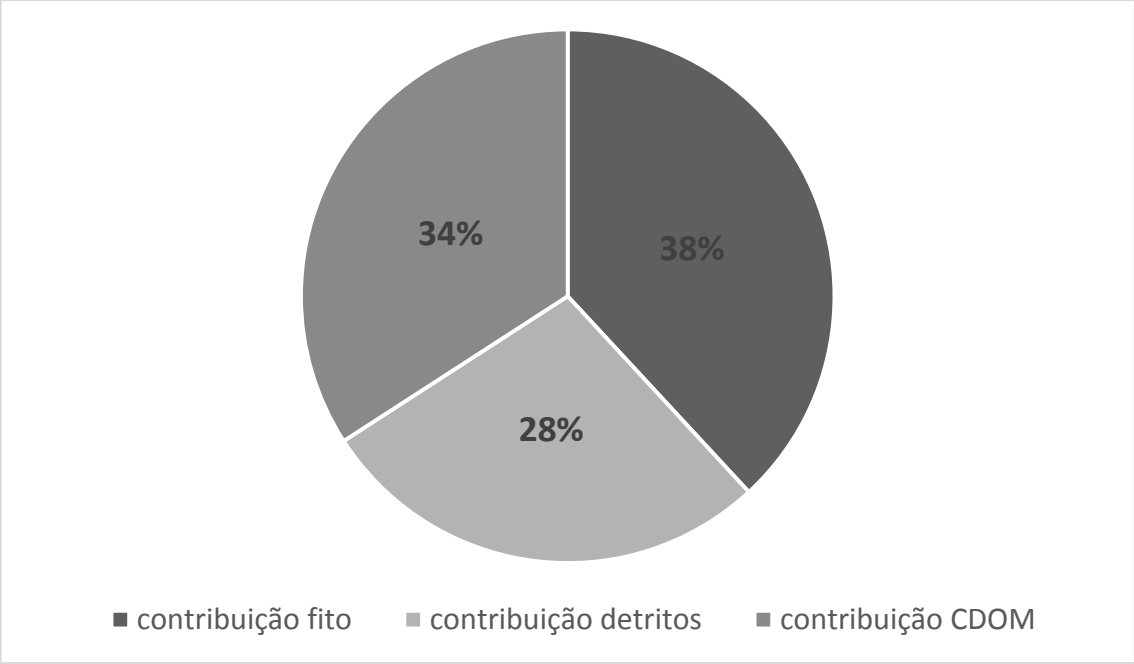


Figura 54– Contribuições óticas integradas do segundo bloco de dados analisados



4.3.2 Magnitude da absorção da luz pelos componentes óticos

Com relação à variação individual da absorção de luz pelo material particulado, a_p (443), embora não tenha havido diferença significativa entre os blocos (p=0,0501), o segundo apresentou maior absorção de luz, com valor médio de 0,11 ± 0,04 e máximo de 0,22. Percebe-se, também, que houve uma tendência de aumento do a_p (443) nos meses de dezembro e janeiro (Figura 55). Já nos meses de março e abril, a_p (443) mostrou igualmente uma tendência a aumentar, porém com maior variabilidade em um dado momento da coleta (Figura 56).

Figura 55 – Variação temporal da absorção do material particulado, a_p (443), durante o primeiro bloco analisado

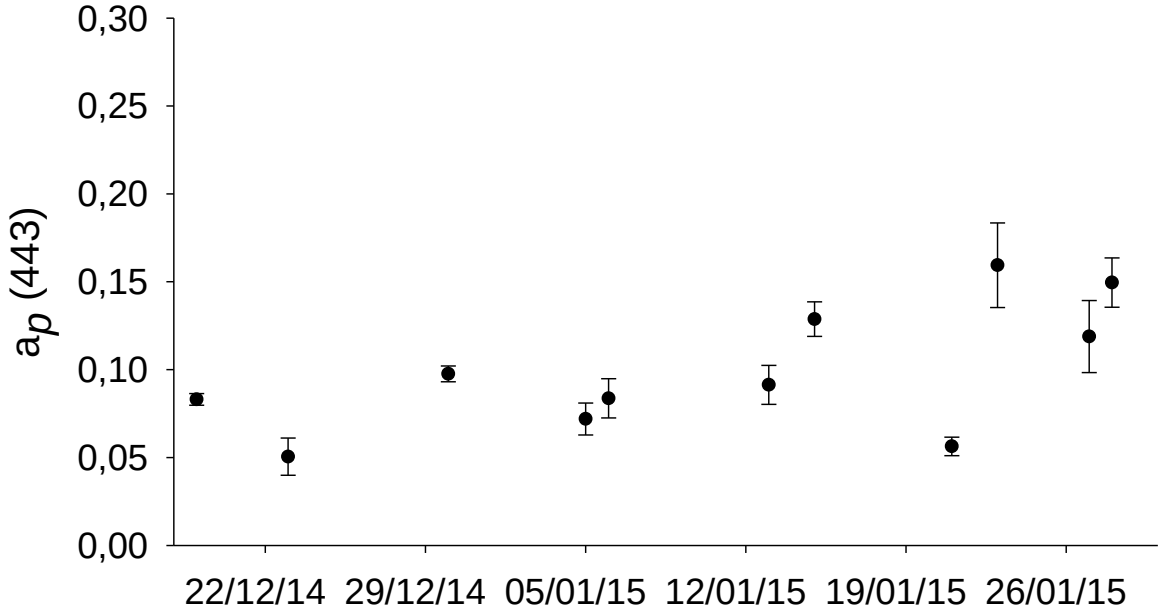
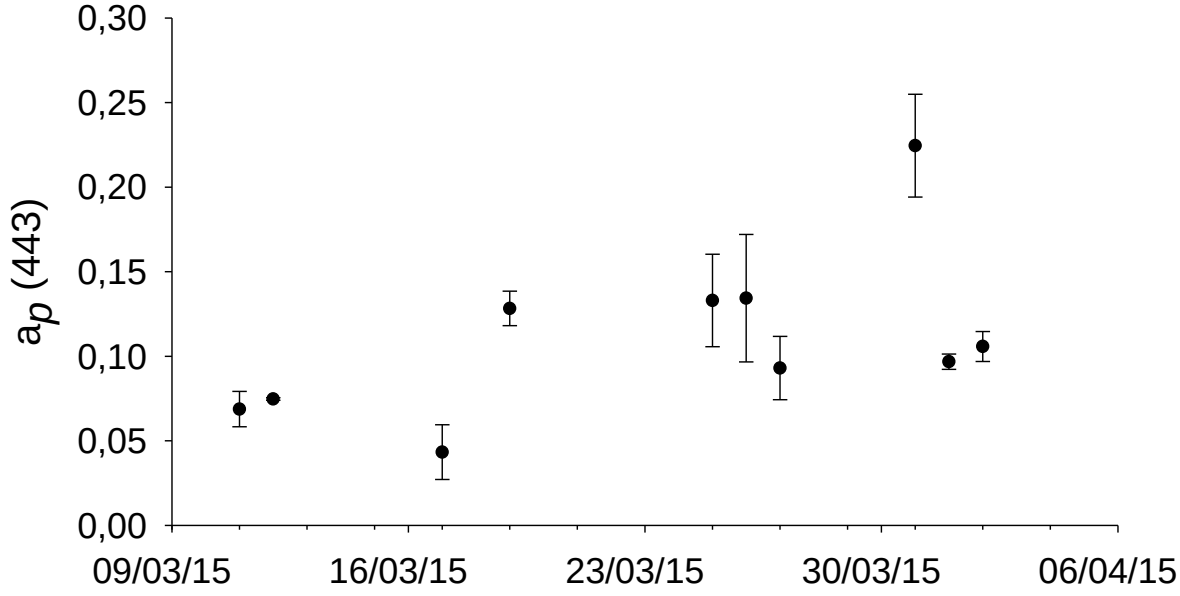


Figura 56 – Variação temporal da absorção do material particulado, a_p (443), durante o segundo bloco analisado



Os valores de magnitude da absorção de luz pelo fitoplâncton, <aph>, que representa o valor médio entre 400 e 700nm, foram semelhantes para os dois blocos

de dados analisados, não havendo diferença significativa entre eles (p=0,79). Durante os meses de dezembro e janeiro, o valor médio de <aph> foi de 0,025 ± 0,006, enquanto que nos meses de março e abril foi de 0,026 ± 0,006 (Figura 57 e 58).

Figura 57 – Variação temporal do coeficente de absorção de luz do fitoplâncton médio entre 400 e 700 nm, <aph>, durante o primeiro bloco analisado

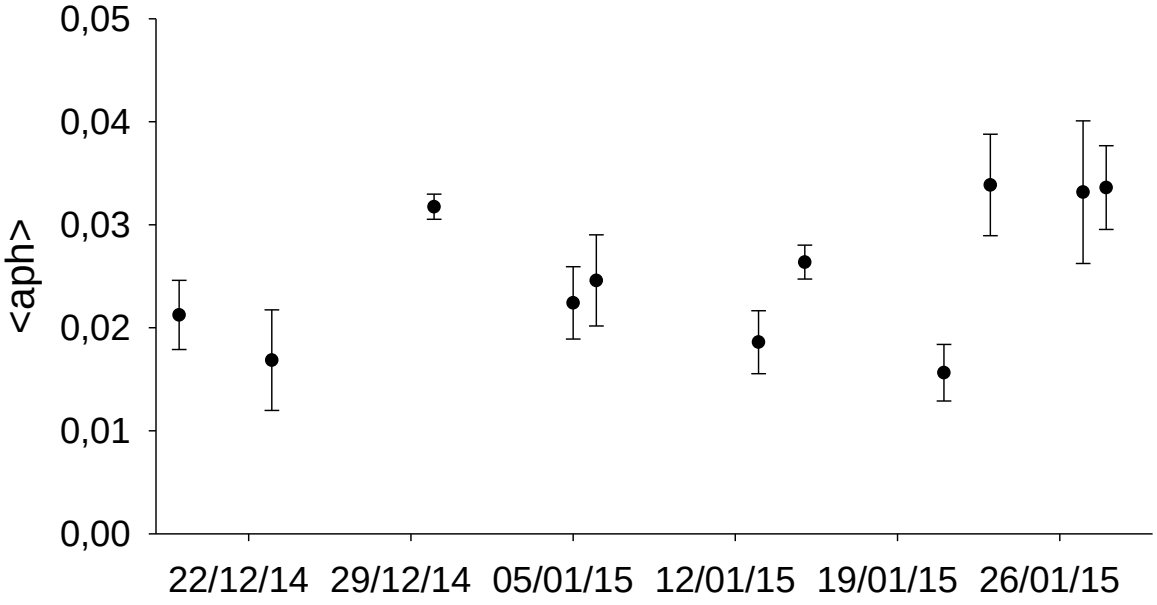
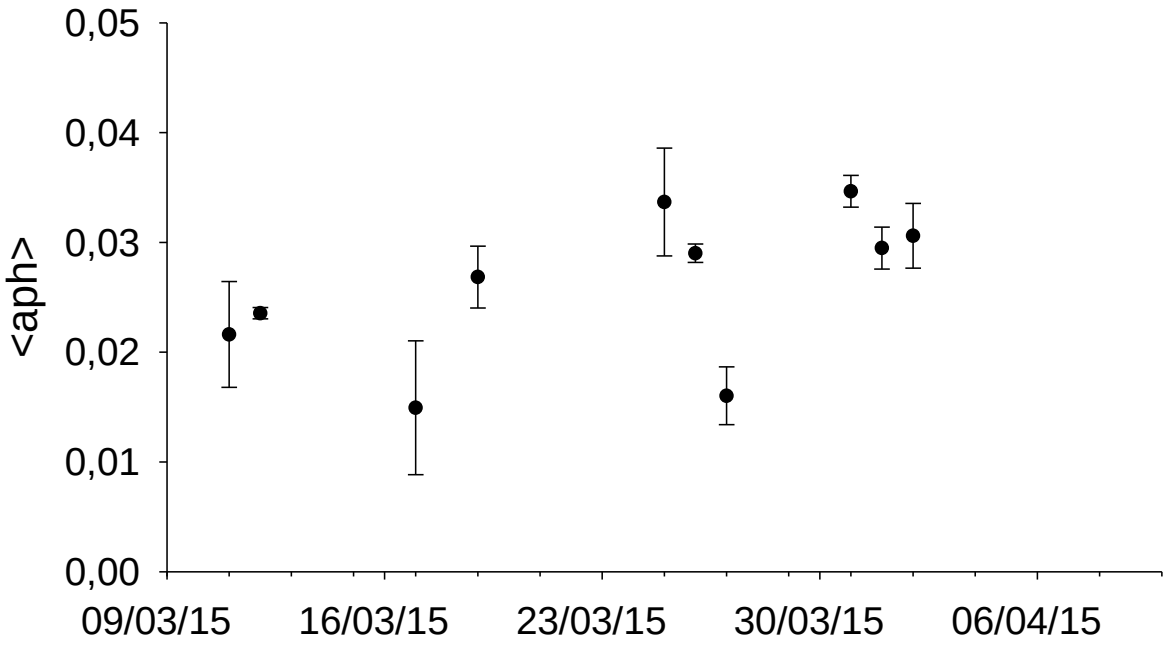


Figura 58 – Variação temporal do coeficente de absorção de luz do fitoplâncton médio entre 400 e 700 nm, <aph>, durante o segundo bloco analisado



Nota-se, ainda, que não houve diferença significativa entre os valores da absorção de luz pelos detritos, a_{det} (443), entre os dois blocos (p=0,81). O valor médio do primeiro período foi de 0,044 ± 0,02 e do segundo foi de 0,046 ± 0,02 (Figura 59 e 60).

Figura 59 – Variação temporal do coeficente de absorção de luz dos detritos, a_{det} (443), durante o primeiro bloco analisado

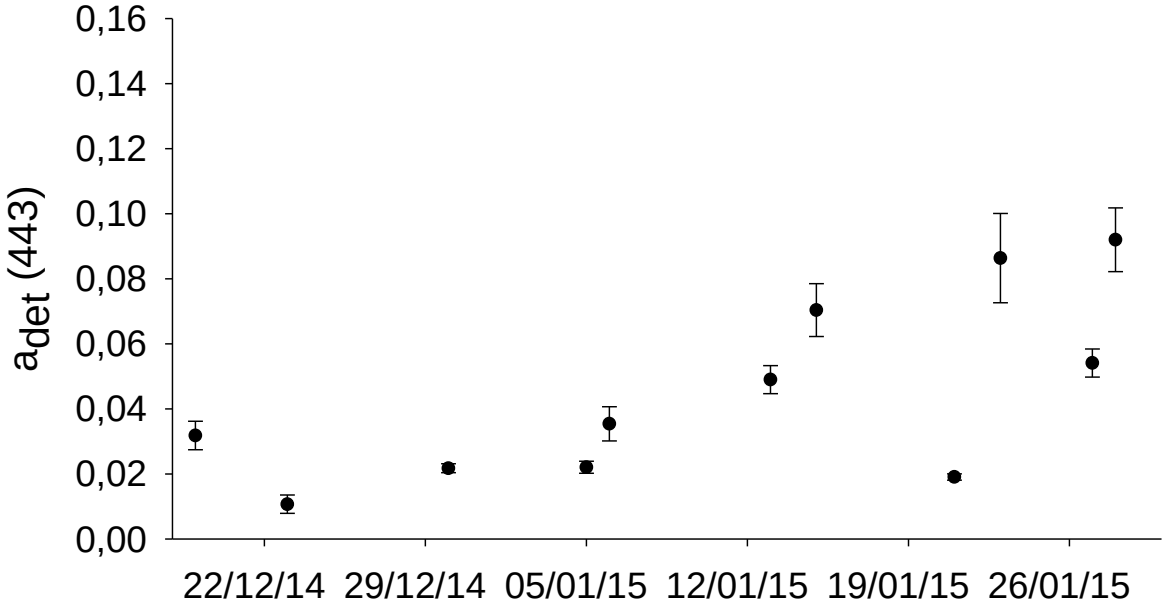
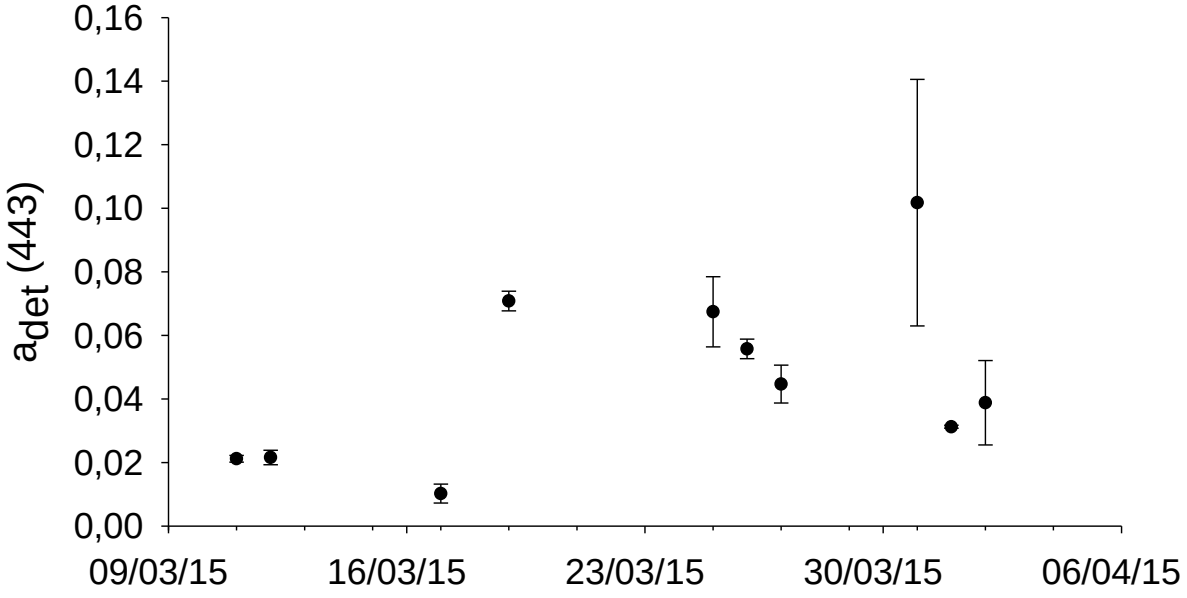


Figura 60 – Variação temporal da absorção dos detritos, a_{det} (443), durante o segundo bloco analisado



Já o coeficente de absorção de luz absorção de luz pelo MODC (a_{MODC} (443)) foi maior durante os meses de março e abril, com média de 0,05 ± 0,02 (Figura 61 e 62), enquanto que, nos meses de dezembro e janeiro, a média foi de 0,02 ± 0,01, havendo diferença significativa entre os blocos (p=0,0001).

Figura 61 – Variação temporal da absorção do material orgânico dissolvido colorido (a_{MODC} (443)) durante o primeiro bloco analisado

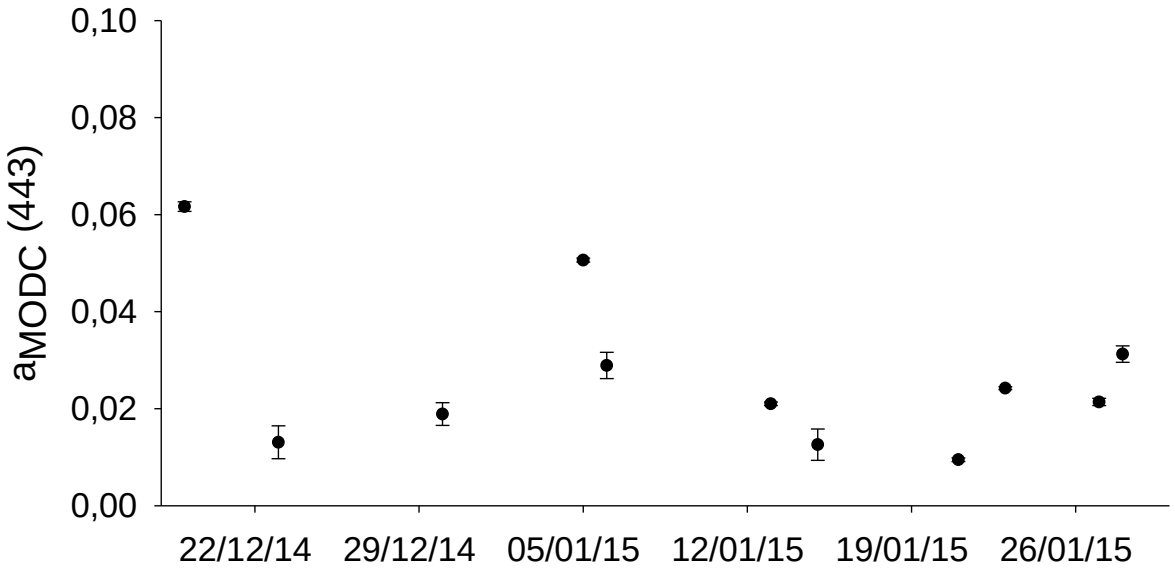
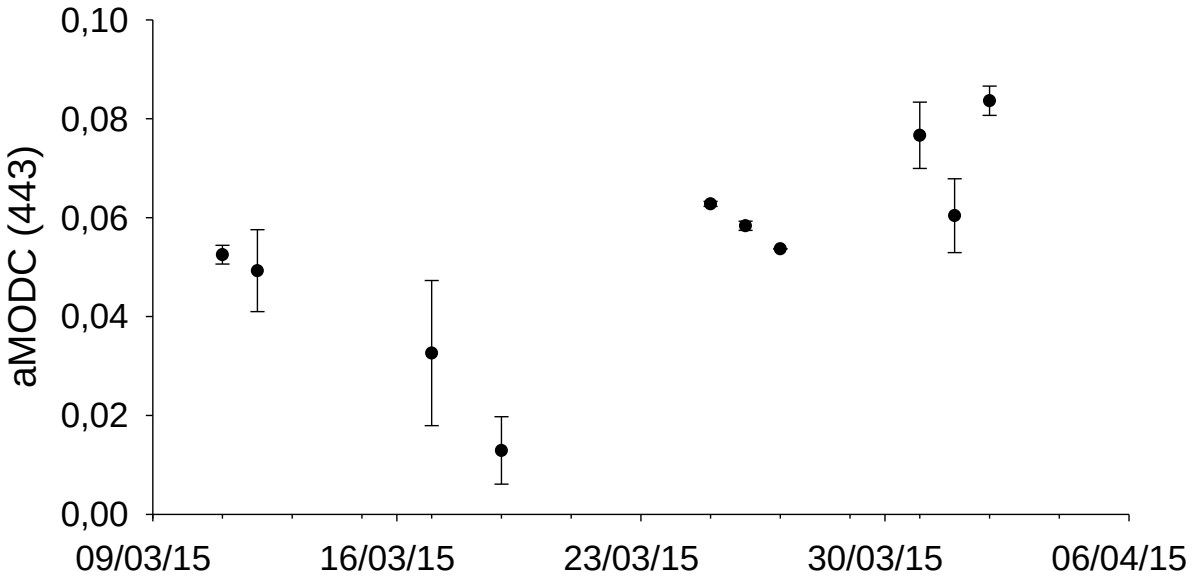


Figura 62 – Variação temporal da absorção do material orgânico dissolvido colorido (a_{MODC} (443)) durante o segundo bloco analisado



4.3.3 Variação espectral dos coeficente de absorção de luz

A magnitude de aph(λ) é uma função da concentração dos pigmentos e do tamanho celular (BRICAUD et al., 2004), razão pela qual a variabilidade observada em aph(λ) tem sido utilizada como ferramenta para discriminar grupos de fitoplâncton (BREWIN et al., 2011, CIOTTI et al, 2002). Como a concentração de clorofila-*a* prescreve relações significativas com aph (λ), optou-se por caracterizar o ambiente biológico pelo estudo de medidas bio-óticas.

A variação espectral da absorção de luz pelos detritos e pelo MODC é representado por uma função exponencial que decai dos menores aos maiores comprimentos de onda. Somente a curva espectral do MODC apresentou diferença entre os dois blocos de dados (p=0,00001) (Figura 63 e 64). Em relação à absorção pelos detritos, as curvas espectrais pouco se diferenciaram entre os dois períodos (Figura 65 e 66).

Figura 63 – Variação espectral da absorção de luz pelo MODC no primeiro bloco analisado

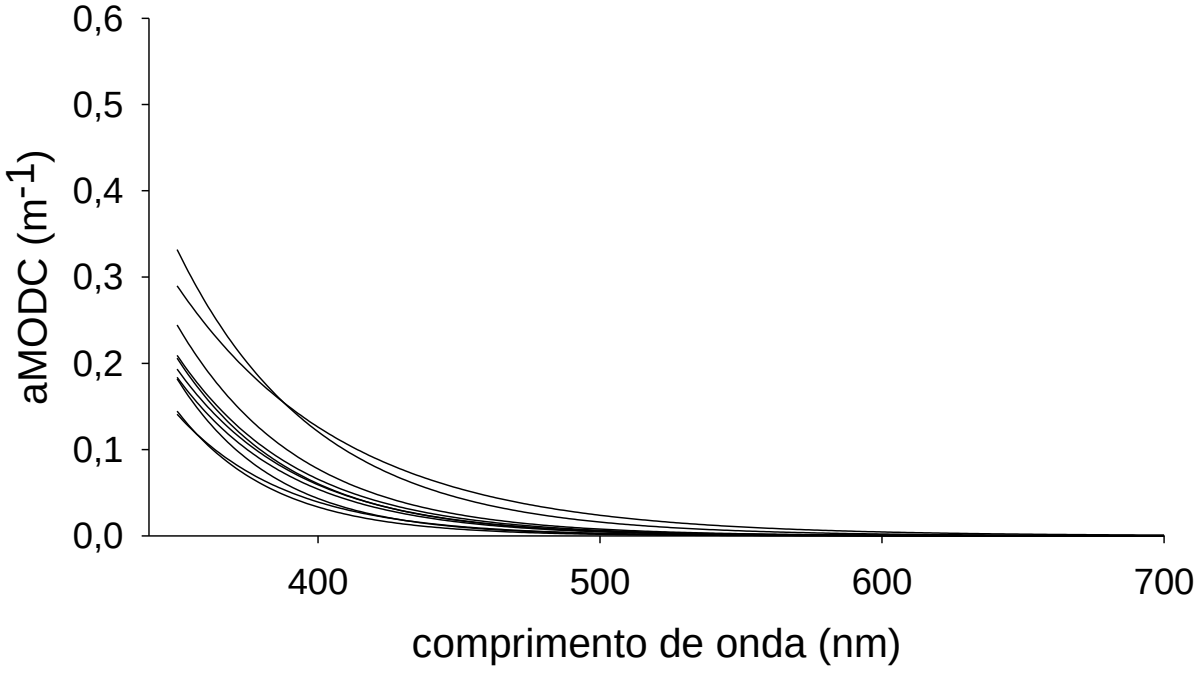


Figura 64 – Variação espectral da absorção de luz pelo MODC no segundo bloco analisado

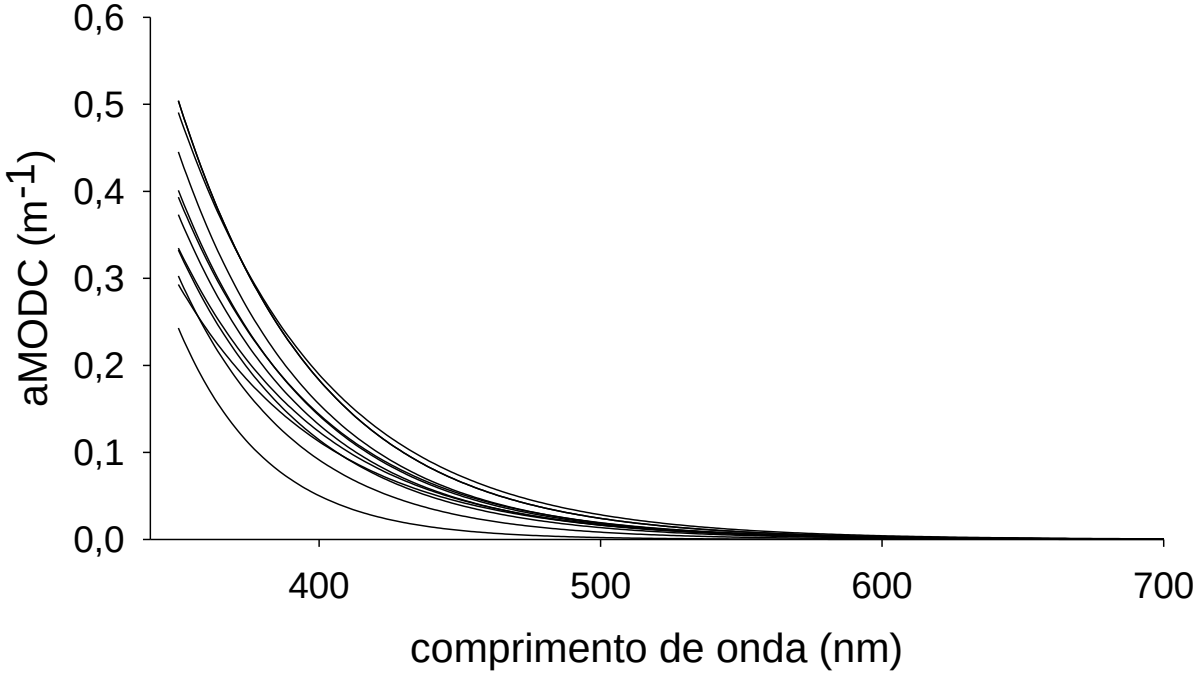


Figura 65 – Variação espectral da absorção de luz pelos detritos no primeiro bloco analisado

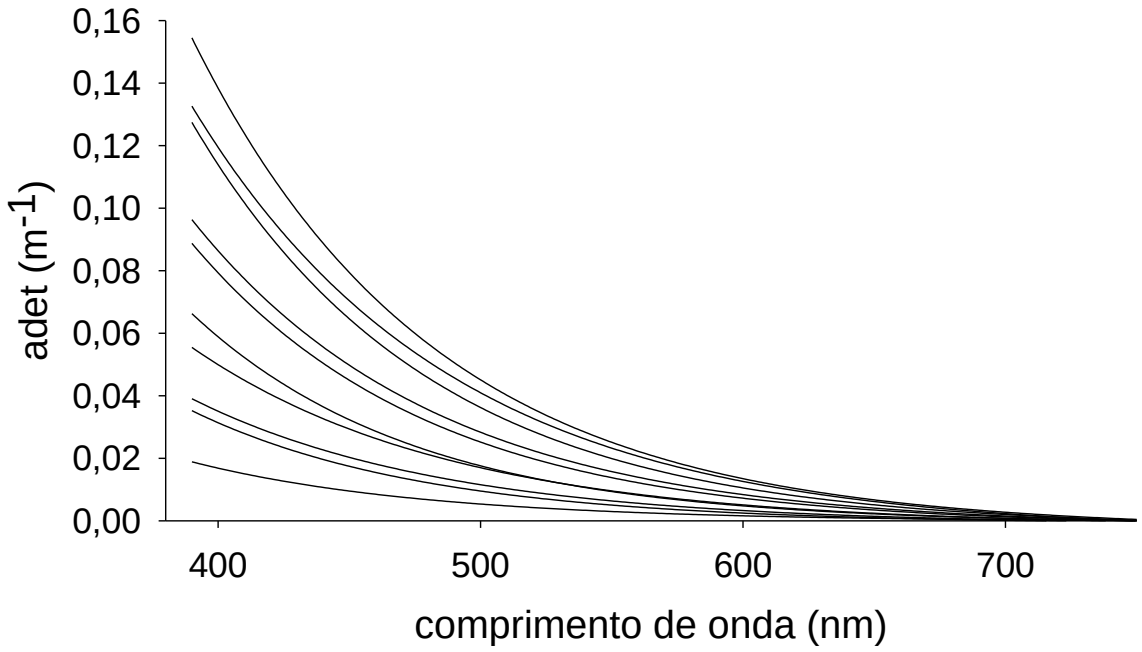
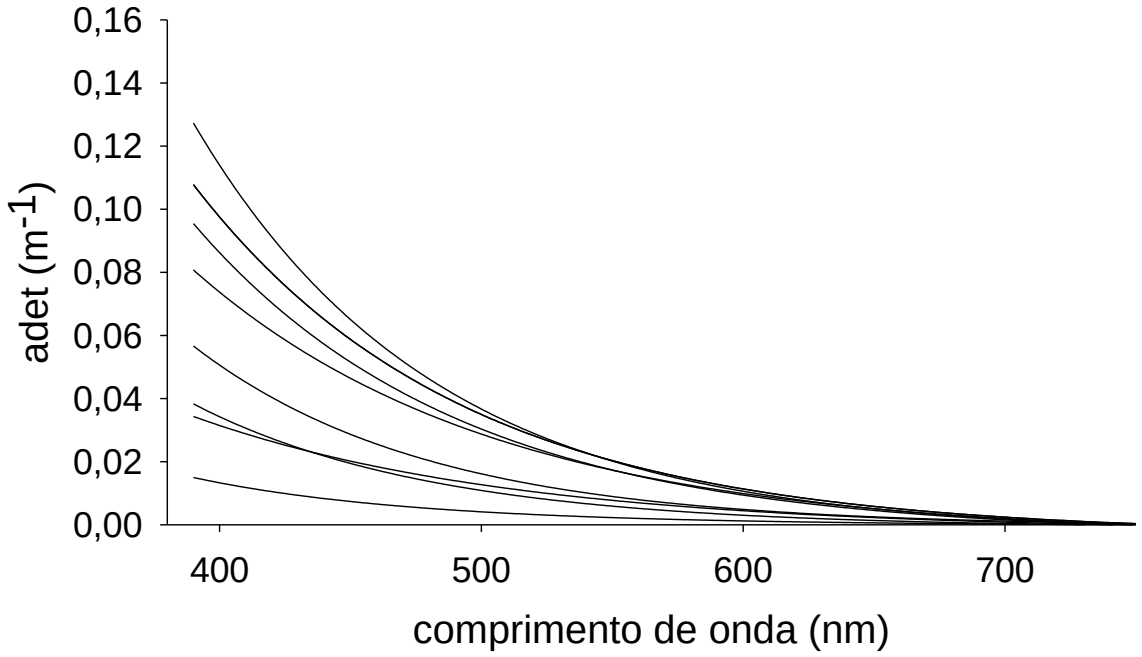


Figura 66 – Variação espectral da absorção de luz pelos detritos no segundo bloco analisado



Percebe-se que os espectros de absorção de luz pelo fitoplâncton não apresentaram variações significativas quanto à magnitude de absorção e variação espectral entre os dois blocos analisados (Figura 67 e 68), tornando difícil diferenciar populações de fitoplâncton entre cada bloco.

Figura 67 – Variação espectral da absorção de luz pelo fitoplâncton no primeiro bloco analisado

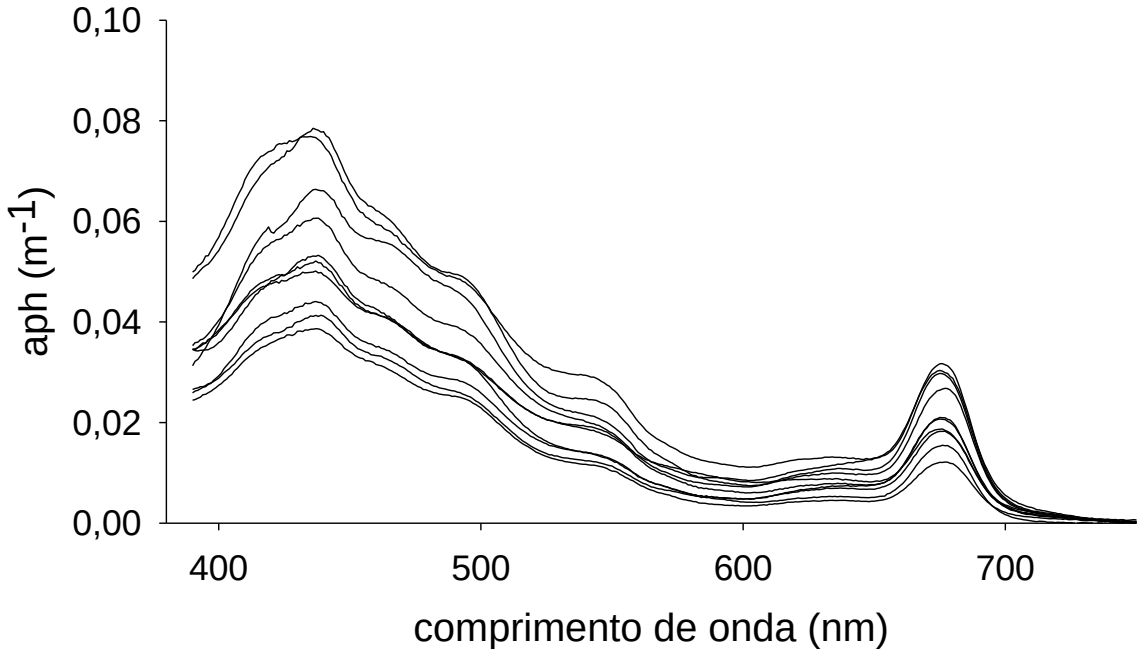
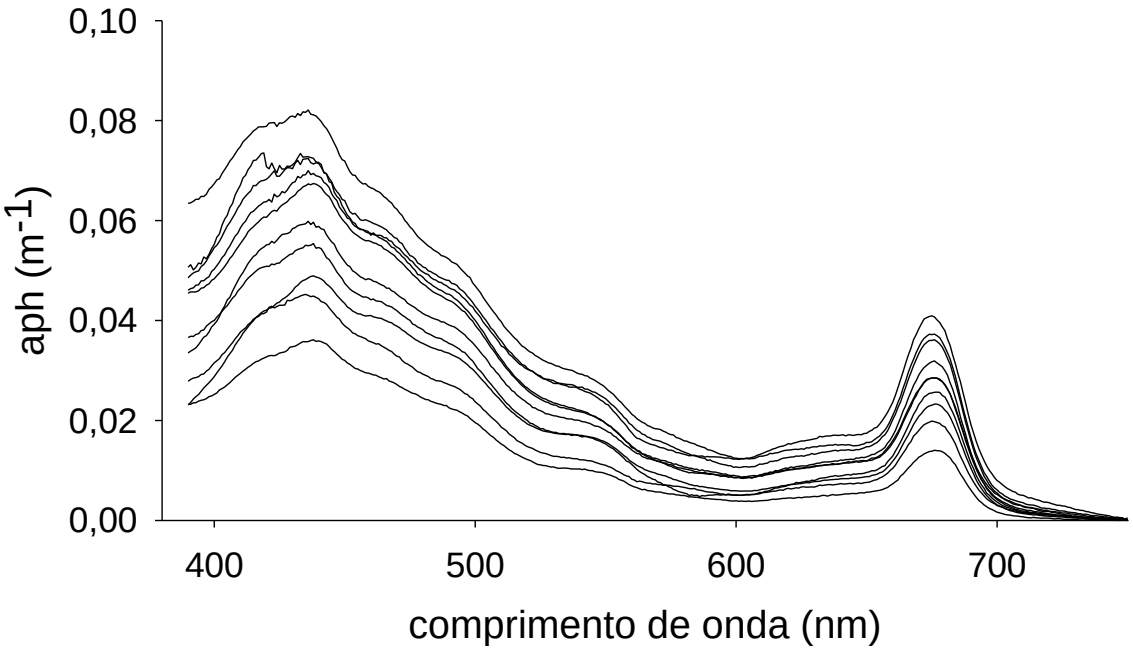


Figura 68 – Variação espectral da absorção de luz pelo fitoplâncton no segundo bloco analisado



4.3.4 Relação dos componentes óticos com variáveis ambientais

Os valores da magnitude de absorção da luz pelo material particulado e pelos detritos são maiores quando o componente dos ventos zonais e meridionais for negativo, ou seja, nos ventos vindos do leste e norte, respectivamente (Figura 69, 70, 71 e 72). Percebe-se, ainda, que houve diferença significativa no a_p (443) (p=0,007) e a_{det} (443) (p=0,01) entre os componentes negativos e positivos dos ventos.

Figura 69 − Relação entre a magnitude da absorção de luz pelo material particulado, a_p (443), com o componente zonal do vento

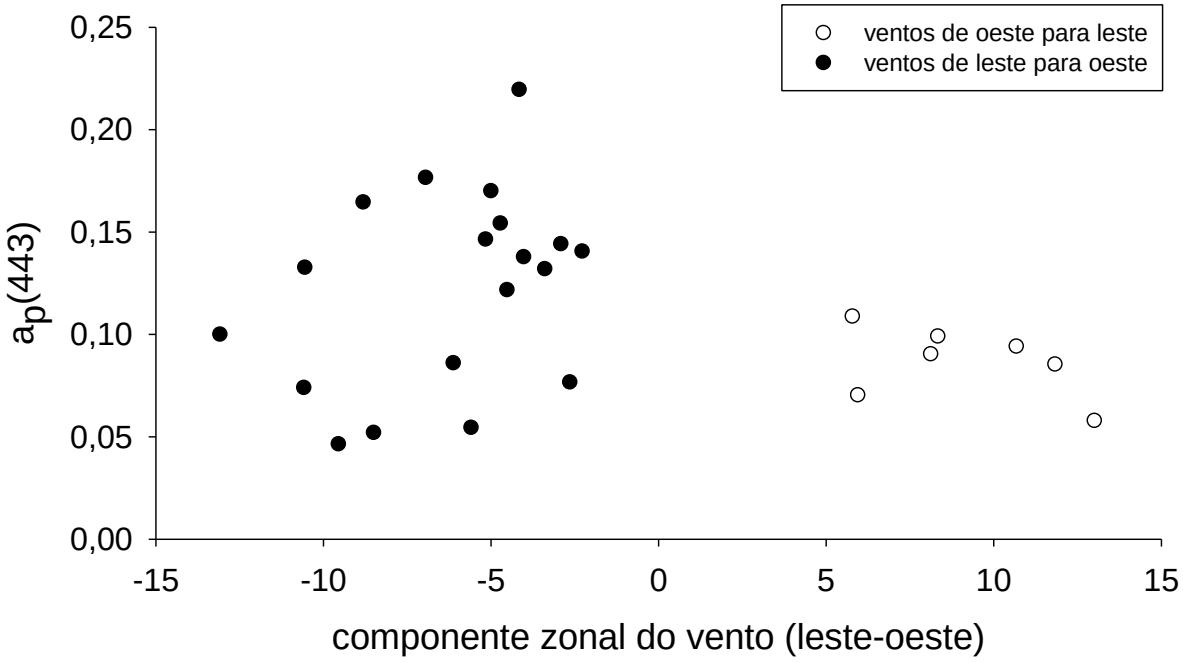


Figura 70 − Relação entre a magnitude da absorção de luz pelo material particulado, a_p (443), com o componente meridional do vento

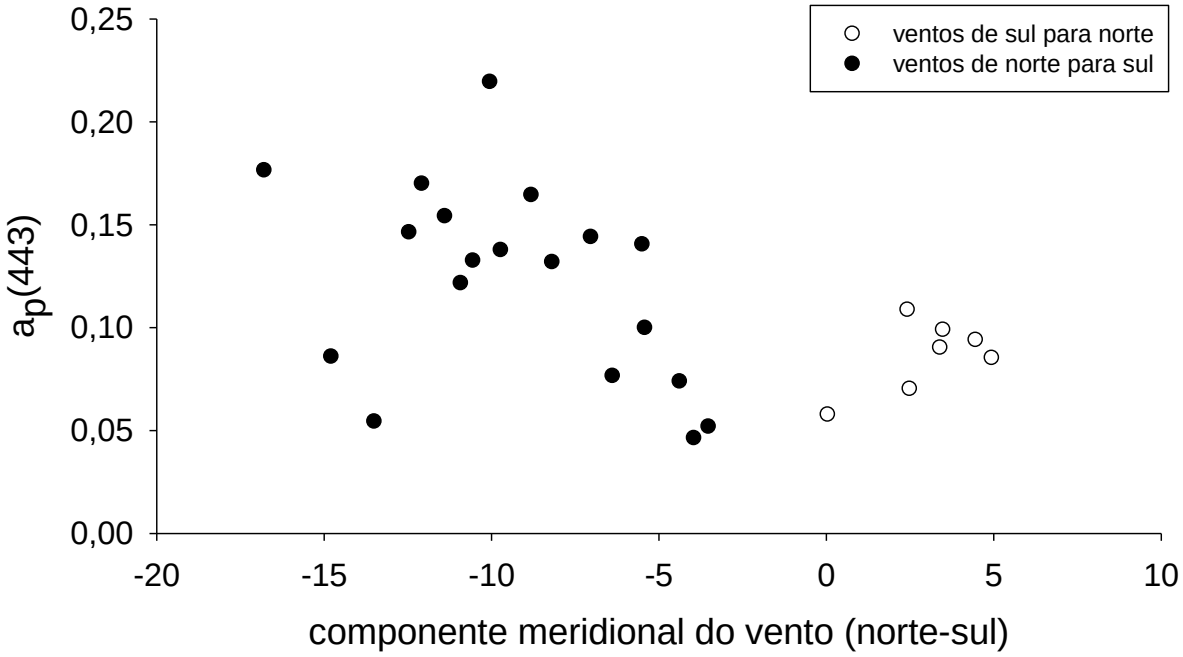


Figura 71 − Relação entre a magnitude da absorção de luz detritos, a_{det} (443), com o componente zonal do vento

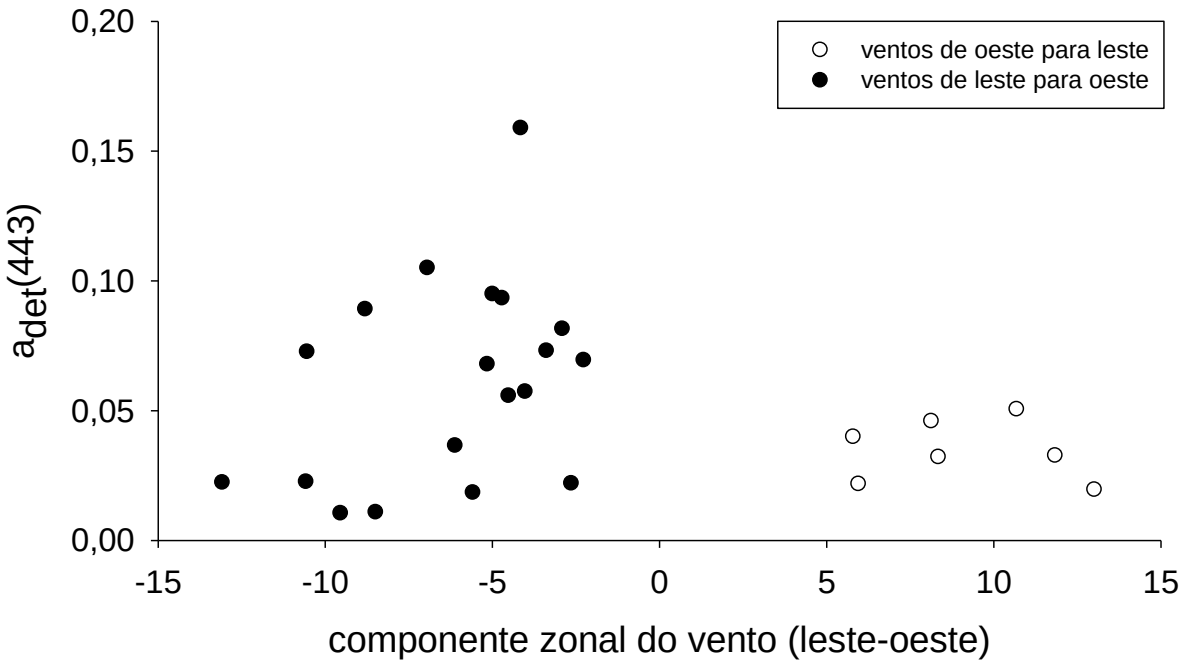
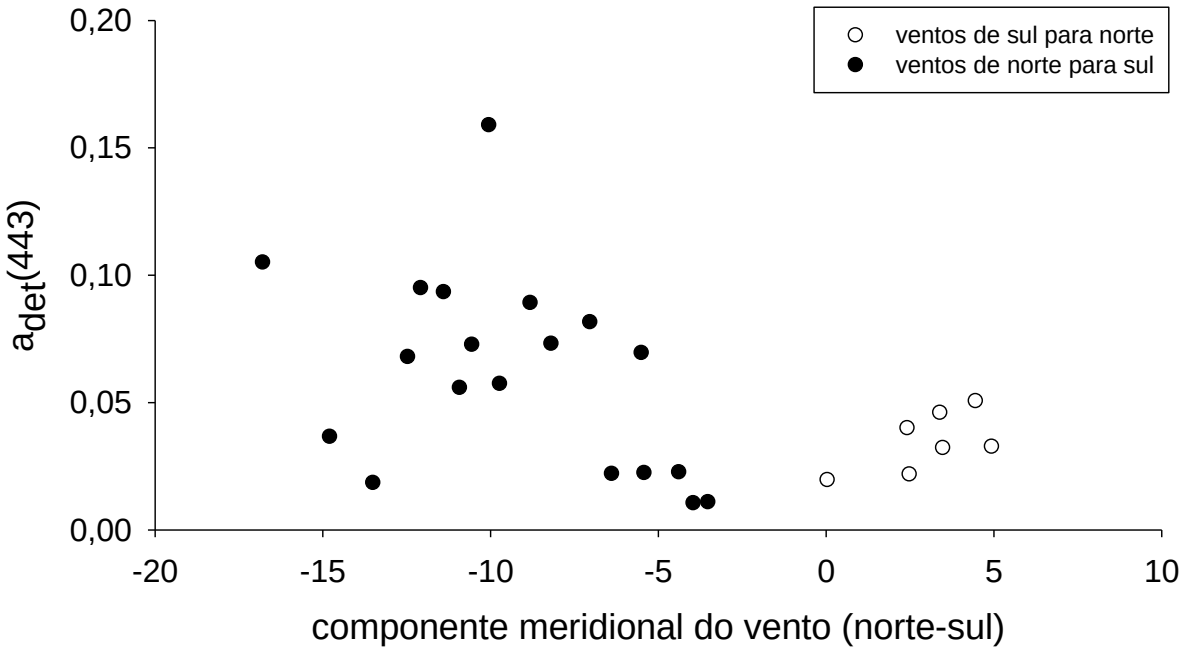


Figura 72 − Relação entre a magnitude da absorção de luz detritos, a_{det} (443), com o componente meridional do vento



Quando se relacionou a magnitude da absorção e luz pelo MODC e pelo fitoplâncton com os componentes zonais e meridionais do vento, não foi encontrada diferença significativa entre os componentes positivos e negativos do vento (Figura 73, 74, 75 e 76).

Figura 73 – Relação entre a magnitude da absorção de luz ao MODC, a_{MODC} (443), com o componente zonal do vento

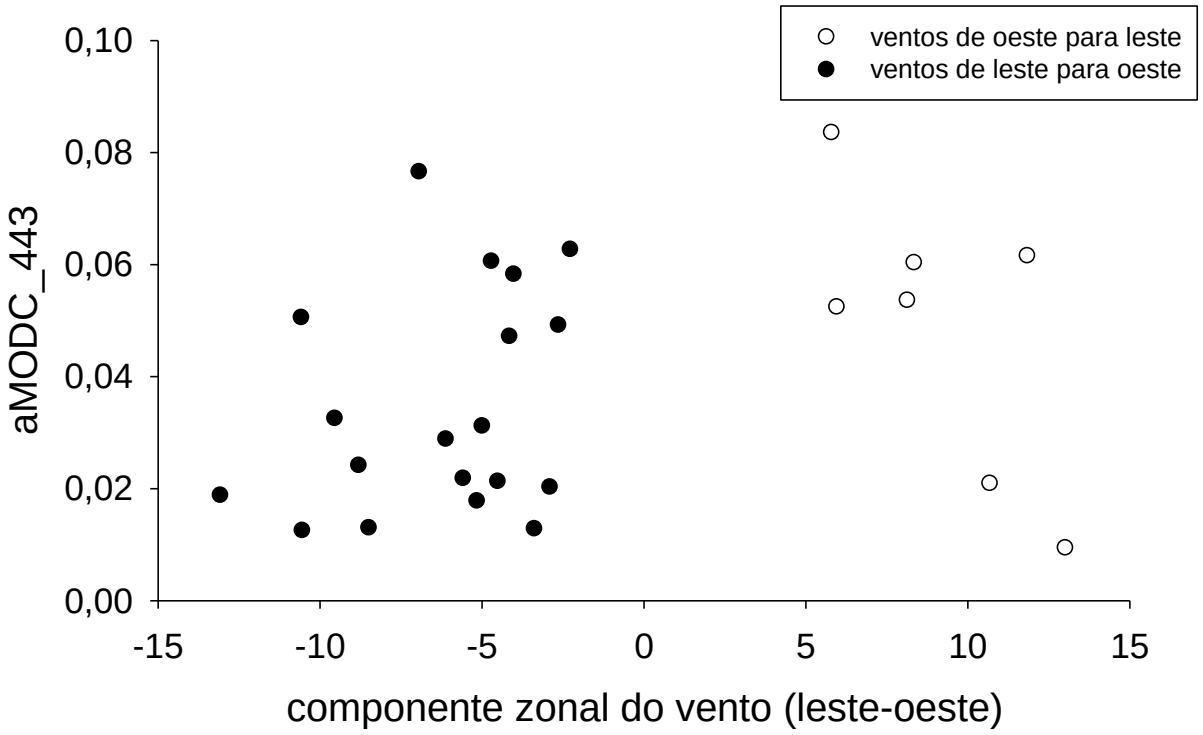


Figura 74 – Relação entre magnitude da absorção de luz dao MODC, a_{MODC} (443), com o componente meridional do vento

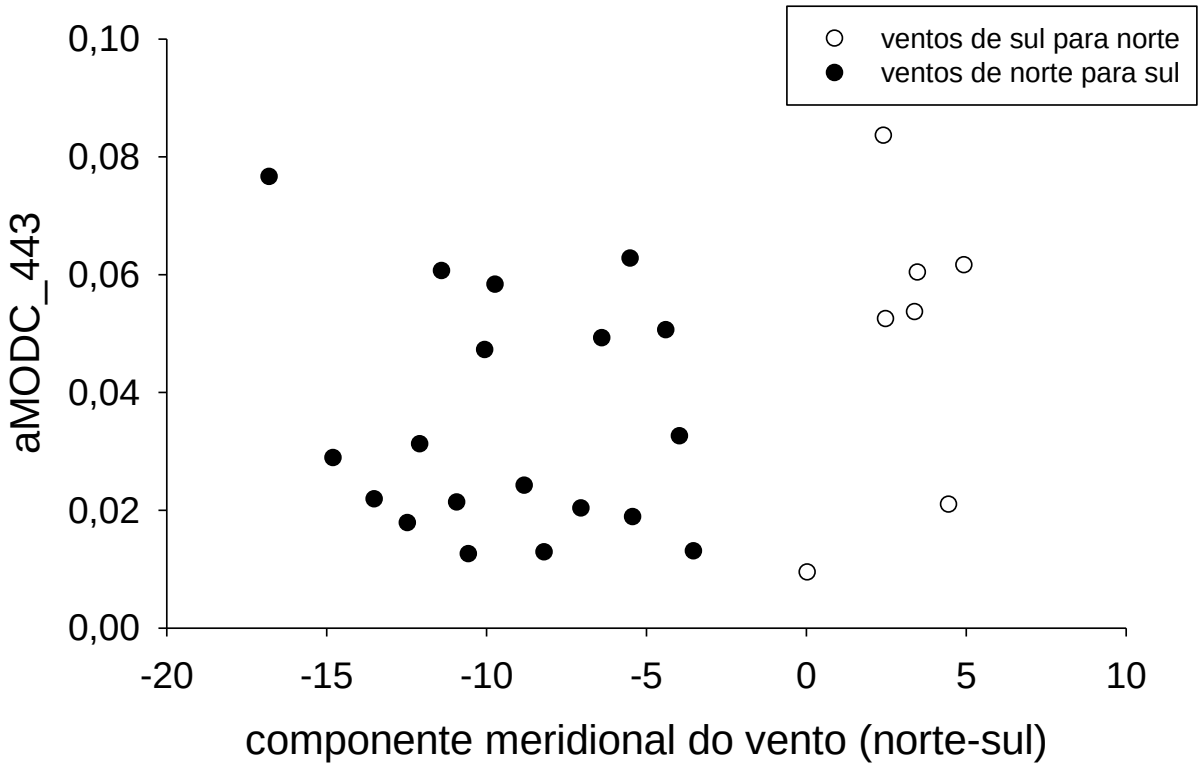


Figura 75 – Relação entre a magnitude da absorção de luz fitoplâncton, <aph>, com o componente zonal do vento

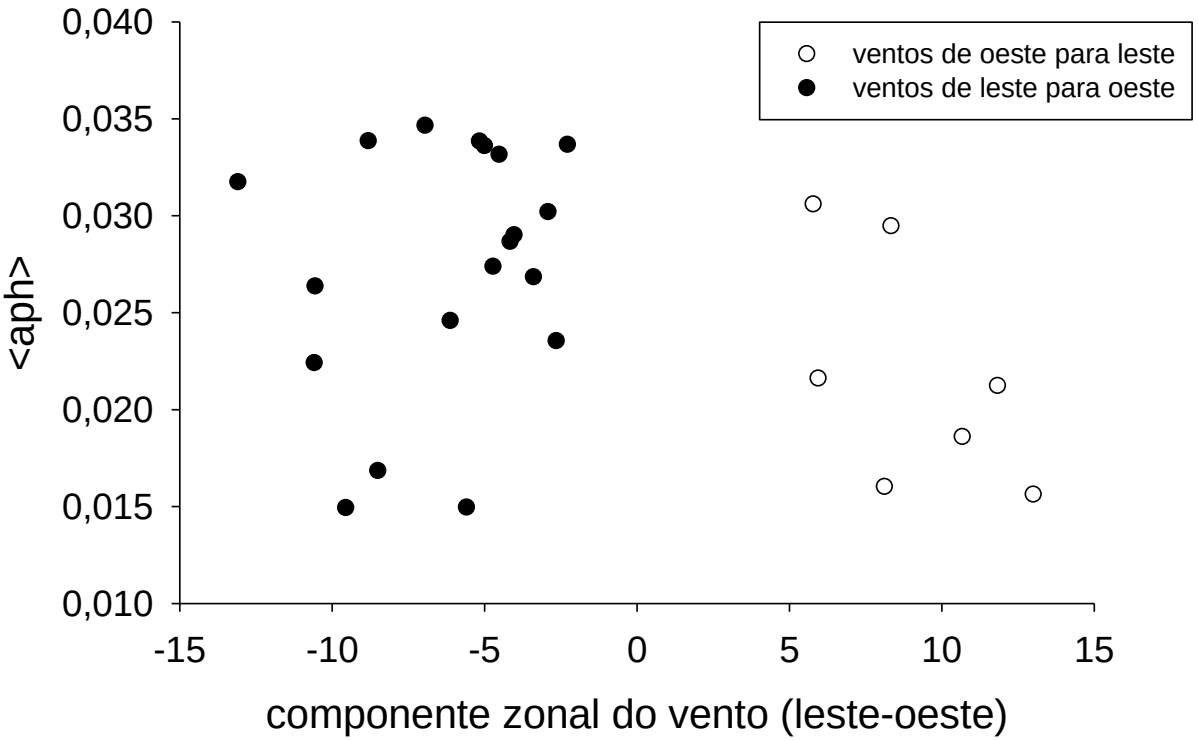
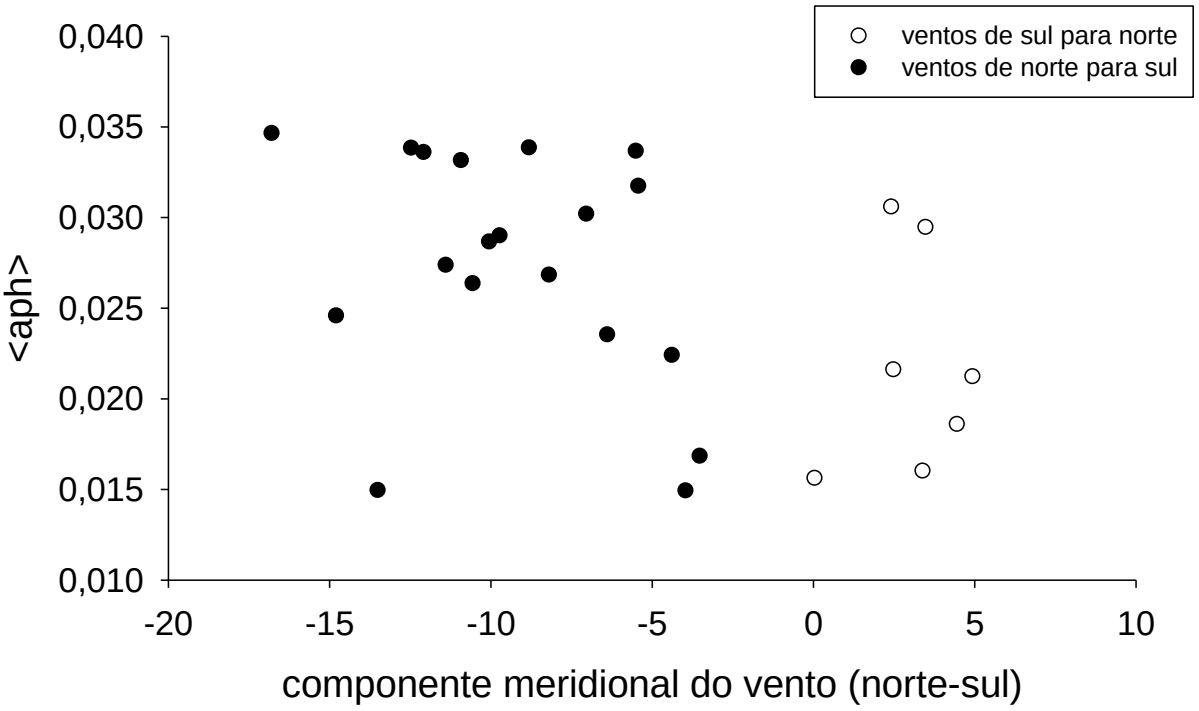
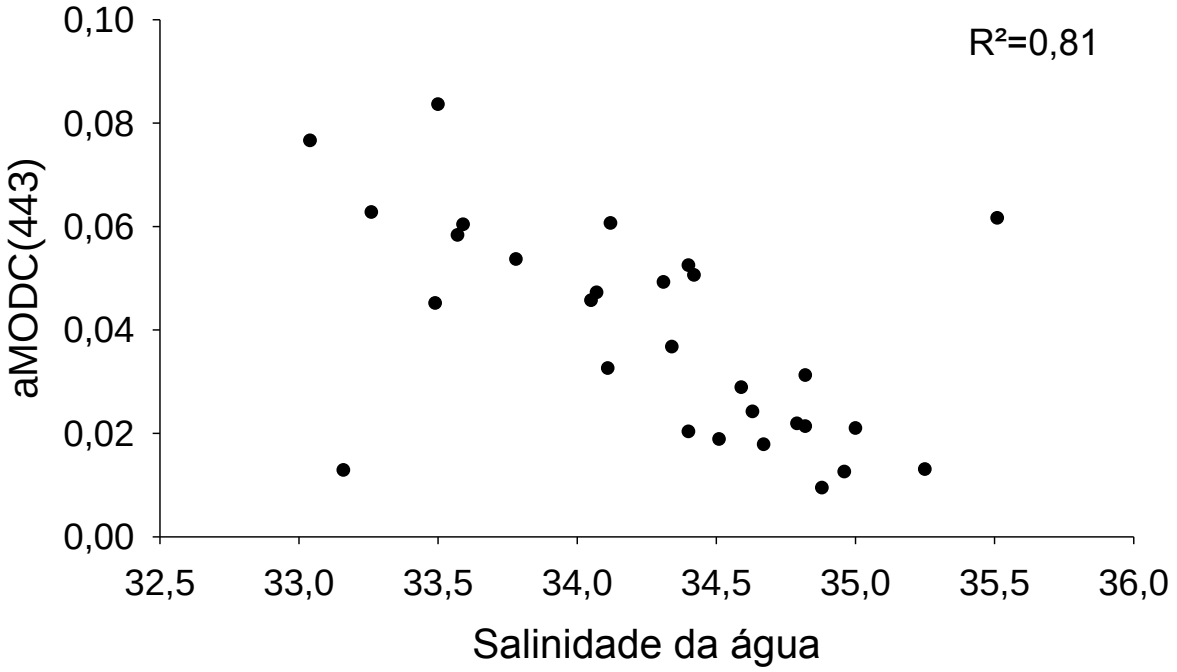


Figura 76 – Relação entre a magnitude da absorção de luz fitoplâncton, <aph>, com o componente meridional do vento



Como o MODC não apresentou relação com os componentes zonais do vento, uma forma de tentar descobrir a fonte de MODC no CSS foi relacionar a magnitude dessa variável com a salinidade, pois, em teoria, as águas menos salinas vindas do norte do CSS apresentam maiores concentrações de MODC do que aquelas vindas do sul. No gráfico de relação entre a_{MODC} (443) e salinidade, fica evidente a relação inversa entre esses dois elementos, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,81 (Figura 77), p= 0,001.

Figura 77 – Relação entre a magnitude da absorção de luz pelo MODC e a salinidade

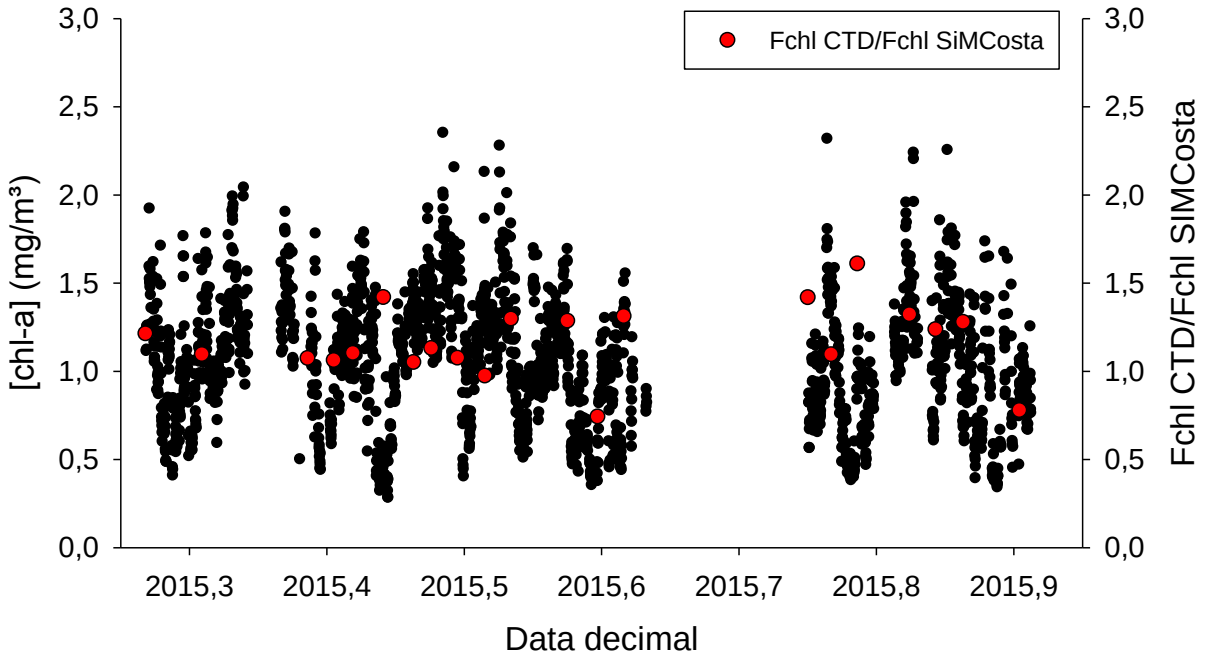


4.4 VARIAÇÃO MENSAL DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*A*

A série da média horária e noturna da concentração de clorofila-*a* que se estendeu de abril a dezembro de 2015 apresentou valores reduzidos. Esses valores de fluorescência foram obtidos pela boia SiMCosta e convertidos à concentração de clorofila-*a* por meio da Equação 4. O valor médio foi de 1,14 ± 0,74 mg/m^{-3}, com máximo de 2,35 e mínimo 0,28 mg/m^{-3} (Figura 78). A análise espectral de ondaletas revelou periodicidades significativas de 24 horas, com sinais de alta potência coincidentes com as marés de sizígia (Figura 79). Ressalta-se, ainda, que foram

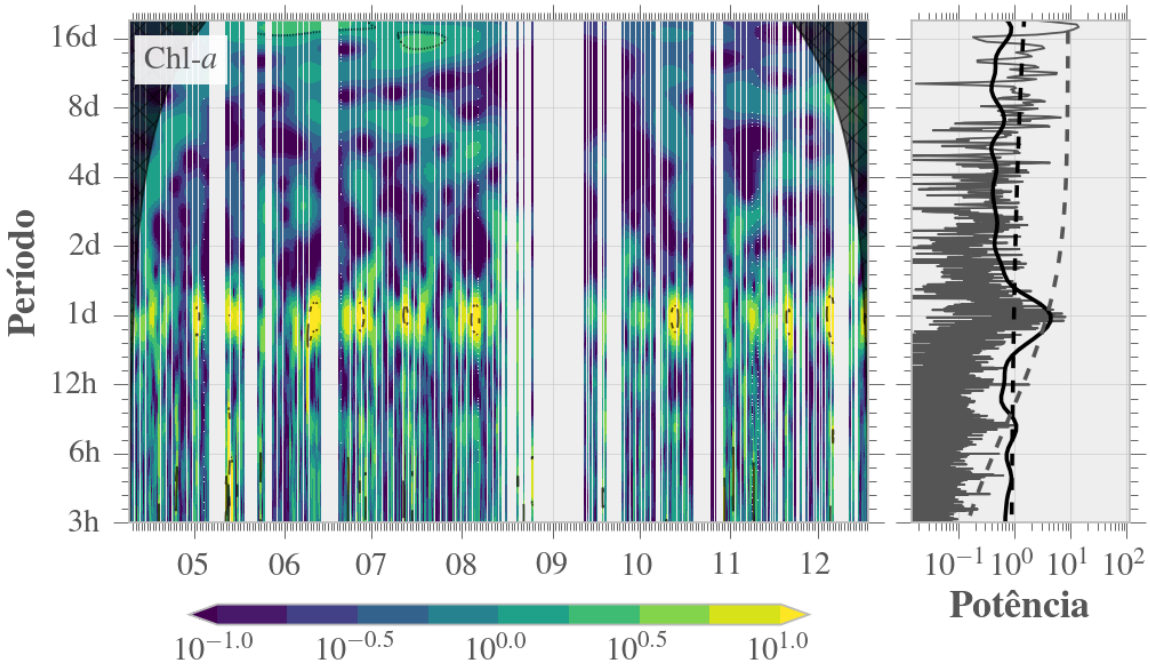
utilizados somente dados de fluorescência noturnos (coletados entre 19 horas da noite e 07 horas da manhã), a fim de simplificar os cálculos pela correção da irradiância, como foi feito para a série coletada entre dezembro e abril por meio da Equação 2.

Figura 78 – Série temporal da média horária noturna da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* (mg/m^{-3}) entre abril e dezembro de 2015



Legenda: os pontos em vermelho são representativos da validação da razão entre os dados da fluorescência da clorofila-*a* da boia SiMCosta e do sensor multiparamétrico CTD conforme Figura 3.

Figura 79 – Análise espectral da média horária noturna da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* entre abril e dezembro de 2015



Legenda: as séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

Quando se observa a série da concentração de clorofila-*a*, percebe-se sucessivos eventos de aumento e diminuição da biomassa fitoplanctônica. Com a mediana da série em 1,00 mg/m^{-3}, aqueles episódios que apresentaram valores acima e abaixo de 50% desse valor, ou seja, além de 1,50 mg/m^{-3} e aquém de 0,50 mg/m^{-3}, foram definidos como um “evento” (Figura 80). Apesar disso, em nenhum dos meses analisados, a média final da concentração de clorofila-*a* foi estatisticamente diferente quando se excluíram os eventos de aumento ou diminuição da biomassa fitoplanctônica (Tabela 2). O teste-*t* de significância, sem os episódios de aumento, foi de p=0,57 e, sem os eventos de diminuição, de p=0,38.

Chamam atenção na Figura 80 os baixíssimos valores registrados de clorofila-*a*, que chegam a 0,28 mg/m³, tendo em vista que se trata de uma região costeira. Além disso, esses eventos de baixas concentrações duram pouco tempo, assim como

os eventos de aumento, o que é consequência em um ambiente de canal com forte advecção.

Figura 80 – Série temporal da média horária da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* entre abril e dezembro de 2015, com destaque para o valor da mediana e para os eventos de aumento e de diminuição da biomassa fitoplanctônica.

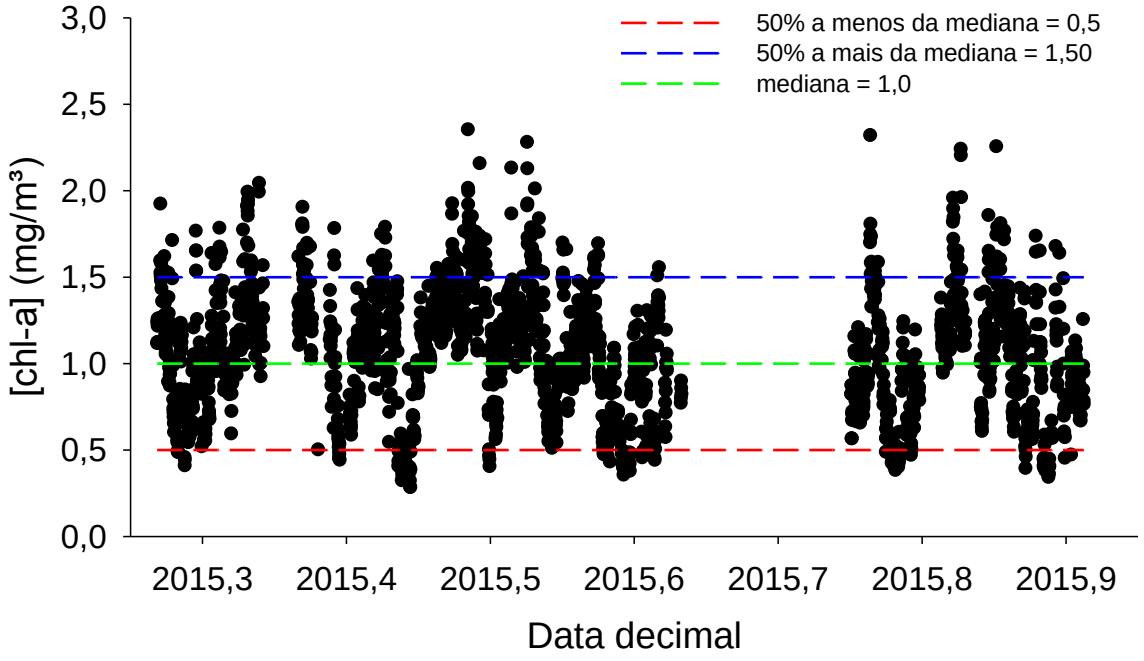


Tabela 2 − Médias mensais da fluorescência convertida em concentração de clorofila-*a* (mg/m^{-3}) entre os meses de abril e novembro de 2015 considerando a série original (1ª coluna), excluindo os eventos acima de 1,50 mg/m^{-3} (2ª coluna) e excluindo os eventos abaixo de 0,50 mg/m^{-3} (3ª coluna)

Mês	Média mensal da [clorofila-a] da série original	Média mensal da [clorofila-a] sem os eventos de aumento	Média mensal da [clorofila-a] sem os eventos de diminuição
Abril	1,02 (± 0,3)	0,97 (±0,24)	1,03 (±0,29)
Maio	1,20 (±0,34)	1,09 (±0,26)	1,22 (±0,32)
Junho	1,18 (±0,37)	1,07 (±0,32)	1,25 (±0,3)
Julho	1,12 (±0,32)	1,05 (±0,26)	1,14 (±0,31)
Agosto	0,78 (±0,29)	0,77 (±0,28)	0,87 (±0,25)
Outubro	1,00 (±0,37)	0,93 (±0,29)	1,06 (±0,34)
Novembro	0,98 (±0,35)	0,93 (±0,3)	1,04 (±0,32)

5 DISCUSSÃO

5.1 VARIABILIDADE DA CLOROFILA-*A* COM AS MARÉS

Quanto à variabilidade da clorofila-*a* em relação às marés, confirmou-se a primeira hipótese: Análises espectrais da série temporal da concentração de clorofila-*a* e da altura da maré revelaram a importância das marés no controle da variabilidade, em escalas horárias, da biomassa fitoplanctônica no CSS. No entanto, os sinais representativos da alta correlação entre as duas séries ocorrem somente durante as marés de sizígia. Uma possível explicação para esse fenômeno seria a maior entrada de águas oceânicas no CSS durante as marés de sizígia, fato que faz com que haja maior transporte de células fitoplanctônicas para dentro do canal. Mudanças similares na variabilidade de clorofila-*a* impulsionadas pelas marés foram observadas em ambientes estuarinos (CLOERN; POWELL; HUZZEY, 1989; CLOERN, 1996; LI; SMAYDA, 2001; ROEGNER et al., 2002). No entanto, a série temporal da concentração de clorofila-*a* mostrou que baixas concentrações estiveram quase sempre relacionadas com ventos constantes do quadrante S/SE, os quais transportam águas com características mais oceânicas.

Outra provável explicação para esse aumento de biomassa fitoplanctônica durante as marés de sizígia é que as correntes mais intensas, comuns a esses eventos, produziriam maior atrito junto ao fundo do mar, o que levaria, por sua vez, à maior ressuspensão de sedimentos, incluindo células fitoplanctônicas, em regiões mais rasas adjacentes ao canal, fato comprovado pela análise do espectro cruzado de ondaletas, em que a turbidez flutuou em fase com a clorofila-*a*, em uma periodicidade de 24 horas durante a maré de sizígia (Apêndice B). Resultados semelhantes foram encontrados no estuário de Thames, no Mar do Norte, por Blauw et al. (2012). Ademais, Tocci (2016) observou pequenas densidades de diatomáceas penatas pertencentes ao microfitobentos (i.e. Família Raphoneidaceae) nas porções rasas do CSS, indicando pouca ressuspensão do material do fundo para a coluna de água. Em contrapartida, a boia SiMCosta está localizada em uma profundidade de 15 metros e, portanto, a ressuspensão de sedimentos do fundo é rara e associada a eventos climáticos extremos. Dessa forma, como existe um aumento da clorofila-*a* em subsuperfície (Apêndice C), conclui-se que o deslocamento horizontal das águas, que

acompanham o ciclo semidiurno das marés, faz com que ocorra ressuspensão da biomassa fitoplanctônica de subsuperfície.

Durante as marés de sizígia, os resultados mostram que as flutuações de curto prazo do fitoplâncton foram dominadas por periodicidades de aproximadamente 12 e 24 horas, refletindo as frequências típicas do deslocamento horizontal das águas e o ciclo dia/noite, respectivamente.

Tendo em vista que os dados de fluorescência da clorofila-*a* foram corrigidos a fim de evitar a subestimação desses valores em altas irradiâncias e que, na análise espectral das ondaletas, a temperatura da água superficial também apresentou sinais com periodicidades de 24 horas (vide Apêndice D para essa informação complementar), uma possível explicação para essa variabilidade diária encontrada da clorofila-*a* pode estar relacionada com o ciclo dia/noite e com a mistura convectiva daí advinda, impulsionada pela microestratificação térmica. Van Haren, Mills e Wetsteyn (1998) relataram variação diurna semelhante na fluorescência de clorofila no Mar do Norte. Esses concluíram que a mistura convectiva ocasionada pela microestratificação térmica levou à sedimentação do fitoplâncton durante o dia e à sua ressuspensão durante a noite. No entanto, análises de ondaletas referentes a temperatura no mesmo local, em 6 e 8 metros, também mostraram sinais significativos em 24h (Apêndice D), o que nos leva a crer que não existe, portanto, estratificação superficial da água do mar no CSS. Todavia, o que provavelmente explicaria essas variações diurnas na temperatura, são as brisas marinhas, apontada por Mazzini (2015) como um fenômeno responsável pela variabilidade mais energética do campo de ventos na Plataforma Continental Interna da Região Sudeste.

Algumas implicações biológicas da relação das marés e da biomassa fitoplanctônica com outros organismos marinhos podem ser vistas no trabalho de Kasten e Flores (2013). Os autores constataram que a liberação larval de populações de cracas aconteceu durante marés de quadratura em ambientes com maior oferta de alimentos, assumindo que a concentração de clorofila-*a* pode ser utilizada como um proxy de recursos alimentares para as larvas dos invertebrados. Já em lugares com baixa disponibilidade alimentar, como é o caso do CSS, as tendências temporais na liberação larval foram notavelmente diferentes e irregulares. Nesses ambientes pobres em alimento, a liberação de larvas pelas cracas não apresentou periodicidades de acordo com o ciclo de marés de quadratura ou sizígia; além disso, a reprodução das cracas ocorreu em uma ordem de magnitude menor do que teria sido em

ambientes com maior oferta de alimentos. Bueno et al. (2010) também verificaram uma estratégia de retenção larval em águas costeiras, na qual os períodos de emissão foram centrados em períodos de quadratura, quando as correntes de maré são menos intensas. Barbosa (2010) observou que durante um período com decréscimo na concentração de clorofila-a no CSS, houve diminuição do suprimento e assentamento larval de cracas, influenciando negativamente a sobrevivência das larvas.

5.2 RELAÇÕES ENTRE O COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DE LUZ E OS VENTOS

A região de estudo durante esse projeto foi ocupada principalmente pela AC, apresentando uma coluna de água praticamente homogênea, devido à mistura causada pela turbulência imposta pela tensão de cisalhamento do vento na superfície e de cisalhamento de maré com o fundo (MAZZINI, 2009). Percebeu-se que a intensidade e a direção dos ventos explicam a variabilidade da concentração de clorofila-*a* no CSS em escalas de dias, confirmando a segunda hipótese deste estudo. A intensidade dos ventos apresentou sinais significativos na análise espectral de ondaletas com frequências de 24 horas, mas somente no primeiro bloco de dados, correspondente aos meses mais quentes. Uma hipótese para tal acontecimento são as ocorrências de brisas marítimas, comuns na costa brasileira durante o verão.

Em relação ao componente zonal e meridional do vento e à variabilidade da concentração de clorofila-*a*, o espectro cruzado de ondaletas apresentou áreas com forte correlação entre as duas séries de dados sendo as periodicidades dominantes de três dias. No entanto, a biomassa fitoplanctônica flutuou em antifase com os componentes positivos dos ventos zonais e meridionais, o que significa que ventos vindos de oeste e sul transportam massas de água com baixas concentrações de clorofila-*a*. De fato, as águas vindas dessas direções são caracterizadas por apresentarem condições mais oceânicas se comparadas às águas continentais, presentes mais ao norte do CSS, como mostram os resultados dos coeficientes de absorção de luz pelos materiais dissolvidos e particulados. É interessante destacar que fortes efeitos do vento na variabilidade das flutuações da biomassa fitoplanctônica tem sido reportados para os estuários (CLOERN, 1996; ABREU et al., 2010; YIN et al., 2004; MOSER et al., 2012), uma vez que, em conjunto com as descargas de água doce, condicionam o tempo de residência da água no ambiente.

A caracterização das propriedades óticas e de suas variabilidades temporais tem sido uma ferramenta bem-sucedida para a pesquisa e gestão da qualidade das águas em ambientes costeiros (e.g., ORRICO et al., 2007; REUTER et al., 2009). Os resultados do presente trabalho sugerem que no período das observações, os ventos vindos do quadrante norte/nordeste carregaram águas com maiores concentrações de materiais particulados ou detritos, confirmando parcialmente a terceira hipótese.

Nos meses de março e abril, quando houve dominância da AC com menores salinidades no CSS, foram encontradas maiores concentrações de material particulado, detritos, MODC e <aph>. Como somente o MODC apresentou diferença significativa entre os dois blocos e a salinidade no segundo período foi reduzida, acredita-se que a fonte de MODC seja oriunda de aportes terrestres, o que se justifica na medida em que, ao norte do canal, estão a Baía do Araçá e o Rio Juqueriquerê, fontes de sedimentos e matéria orgânica. Ressalta-se que os coeficientes de absorção do MODC não se correlacionam com a concentração de clorofila-*a* (r=0,8), como observado em outras regiões costeiras (BLOUGH; DAL VECCHIO, 2002), provavelmente porque ambos os componentes sejam alóctones e não estejam relacionados à produtividade local (DEL VECCHIO; SUBRAMANIAM, 2004). O MODC presente no CSS não afetará o sinal de fluorescência de clorofila-*a* até certo limite mínimo de salinidade – abaixo desse limite a absorção de MODC aumentará e poderá começar a influenciar o sinal da fluorescência de clorofila. Outros ambientes costeiros que apresentam relações robustas entre a absorção de MODC e a salinidade são áreas estuarinas (BOSS et al., 2001; BLOUGHT; DEL VECCHIO, 2002; BERTO et al., 2010).

A intensidade dos ventos também foi significativamente maior no segundo período analisado, sugerindo que a mistura da coluna de água foi mais intensa e que, portanto, pode ter ocorrido maior ressuspensão de sedimentos e partículas fitoplanctônicas. Nesse sentido, a maior absorção de luz pelos detritos, juntamente com a baixa absorção pelo fitoplâncton, pode ser explicada, em parte, pela limitação do desenvolvimento do fitoplâncton devido ao aumento da concentração dos sedimentos (SHIBATA; TRIPATHY; ISHIZAKA, 2010). Uma possível explicação do porquê a concentração média horária da clorofila-*a* foi significativamente maior no segundo período, enquanto não ocorreu o mesmo para <aph>, é em relação ao altíssimo N amostral das medições da boia se comparadas as trinta visitas ao sítio SiMCosta para análise dos componentes óticos.

As propriedades físicas das águas da região são condicionadas por uma série de processos físicos que ocorrem em diversas escalas temporais e espaciais. Considerando-se a escala temporal interanual, podem ocorrer perturbações sobre o ciclo hidrológico climatológico médio, levando a variações nos índices de pluviosidade, as quais, por sua vez, têm como consequência variações no campo de salinidade e na escala sazonal; variações na radiação solar incidente sobre a superfície do oceano; e diferenças entre precipitação e evaporação, que influenciam o campo de temperatura e salinidade. Ademais, variações no campo de vento médio incitam mistura por processos turbulentos e são responsáveis por correntes sazonais que apresentam predomínio do quadrante nordeste durante o verão e do quadrante sudoeste durante o inverno (MAZZINI, 2009). O verão de 2015 foi relativamente seco, com exceção do alto volume de chuva nos dias 22 e 23 de dezembro de 2014, fato que levou a uma queda de 2°C na temperatura da água e baixou a salinidade, fazendo com que esta atingisse o seu valor mínimo no período.

Ventos do quadrante norte/nordeste transportam maiores concentrações de materiais particulados ou detritos, o que pode afetar a absorção de luz do fitoplâncton, limitando seu crescimento e afetando, consequentemente, os organismos marinhos que dependem de uma suficiente oferta de alimento pelágico (ver seção 5.3 para maiores detalhes). Já os ventos vindos do quadrante sul/sudoeste costumam trazer águas com características mais oceânicas, que tendem a apresentar baixas concentrações de clorofila-*a.* Peres (2013) observou maiores valores de clorofila-*a* no inverno do que no verão, o que se explica pelo fato de que entradas mais frequentes de frentes frias podem gerar maior turbulência e mistura vertical na coluna de água. Tal fenômeno apresenta um efeito parecido com o que ocorre durante as marés de sizígia, quando a força das correntes no fundo ocasiona maior ressuspensão de sedimentos e consequente incremento das células fitoplanctônicas. Portanto, como o CSS tem sua hidrodinâmica superficial fortemente associada ao regime climático, a região é bastante suscetível a qualquer alteração de ventos que possa vir a ocorrer. Estudos sobre o regime dos ventos e seu impacto na biomassa fitoplanctônica já são feitos em outros lugares (e.g., MOSER et al., 2012, ROEGNER et al., 2002, YIN et al., 2004)

5.3 EVENTOS DE ACÚMULO E DIMINUIÇÃO DA BIOMASSA FITOPLANCTÔNICA

Cushing (1969), baseado na hipótese do desacoplamento fenológico (em inglês: *match/mismatch hypothesis*), enfatiza que a massiva mortalidade das larvas de peixes pode estar relacionada à baixa abundância de alimento, ou seja, a sincronia com o ciclo de produção planctônica primária pode determinar a sobrevivência dos primeiros estágios larvais. Resultados obtidos no estudo de Kasten (2016) apontam para a importância da disponibilidade de alimento para determinar padrões de abundância e tamanho dos organismos adultos de cracas na costa sudeste do Brasil. Na mesma região de estudo de Kasten, Mazzuco (2015) concluiu que processos oceanográficos impulsionados pelos ventos, principalmente àqueles relacionados as frentes frias, podem afetar a abundância de larvas de cracas, tendo consequência na variabilidade do recrutamento larval de invertebrados marinhos.

Recursos alimentares para larvas que habitam o pelagial costumam ser escassos em sistemas oligo e mesotróficos de regiões tropicais (METZLER et al., 1997; LONGHURST, 1998), que resultam em altas taxas de mortalidade. Além disso, uma má nutrição larval pode impactar negativamente os estágios juvenis de invertebrados marinhos (HENTSCHEL; EMLET, 2000; TORRES; GIMÉNEZ; PETTERSEN, 2016) e afetar a metamorfose dos estágios larvais finais responsáveis pelo recrutamento. O CSS é conhecido por ser uma região mesoligotrófica, com alguns aumentos nas concentrações de fitoplâncton, devido a eventos de entrada de ACAS resultante de ressurgência costeira no verão ou devido a eventos de mistura vertical quando as frentes frias estão presentes no inverno (PERES, 2013), de modo que a disponibilidade de alimentos para larvas de invertebrados e peixes marinhos são baixas durante a maior parte do ano. Estudos realizados no CSS e em outros ambientes mostram que uma moderada disponibilidade alimentar pode reduzir ou até mesmo suprimir a taxa de recrutamento larval (BARBOSA; GOMES; PEREIRA, 2016; KASTEN, 2016; BEAUGRAND et al., 2003; CUSHING, 1990).

A análise da concentração de clorofila-*a* ao longo do ano no CSS revelou que os valores encontrados são relativamente baixos, com média de 1,14 ± 0,74 mg/m^{-3}, característicos de ambientes mesoligotróficos. Estudos realizados por Peres (2013) durante o verão de 2012 no CSS, mostraram valores das concentrações de clorofila-*a* em superfície de micro e nanofitoplâncton de 0,46 ± 0,41 e 0,47 ± 0,42,

respectivamente. Nesse sentido, as consequências dessas variações de curta escala na oferta de alimentos podem orientar os padrões de abundância de invertebrados marinhos, modificar características reprodutivas durante diferentes estações do ano e influenciar a qualidade das larvas de recursos pesqueiros.

Os dados mostram que existe uma diferença significativa na concentração de clorofila-*a* entre as marés de sizígia e quadratura (ver Apêndice E), com maiores valores nas primeiras, independentemente do período. Por meio da análise de fina escala da série temporal anual da concentração de clorofila-*a*, observou-se que, em média, o acúmulo de clorofila é estável no tempo, com curtos episódios de lento aumento, preferencialmente durante a sizígia, e diminuições bruscas da biomassa fitoplanctônica. Essas reduções são causadas ora pelas marés de quadratura, ora pelas entradas de ventos constantes do quadrante sul, embora não tenha havido um padrão muito nítido.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados deste estudo, percebeu-se que a flutuação da clorofila-*a* ocorre com uma periodicidade aproximada de 12 horas, coincidente com o deslocamento horizontal das águas, impulsionadas pelo ciclo semidiurno das marés, e de 24 horas, seguindo o ciclo dia/noite e sendo explicado, possivelmente, pelo efeito das brisas marinhas no CSS.

É possível afirmar, ainda, que durante os meses de dezembro de 2014 a abril de 2015, a intensidade do vento se correlaciona com a clorofila-*a* em frequências de tempo aproximadas de três dias e que a biomassa fitoplanctônica se apresenta em antifase com os componentes positivos dos ventos zonais e meridionais, ou seja, dos ventos vindos do quadrante sul/sudoeste. Ventos vindos do quadrante norte/nordeste, por sua vez, transportam águas com maiores concentrações de materiais particulados ou detritos. Assim, a diferença na concentração dos componentes óticos entre os ventos de norte/nordeste e oeste/sudoeste foi significativa para a absorção do material particulado e dos detritos, mas não do MODC e do fitoplâncton.

Outro resultado observado é que o MODC apresenta uma alta correlação com a salinidade, sugerindo que as fontes de MODC são de aportes terrestres.

Em média, o acúmulo de clorofila é estável no tempo, com curtos episódios de lento aumento e diminuições bruscas da biomassa fitoplanctônica. A análise da concentração de clorofila-*a* ao longo do ano no CSS revelou que os valores encontrados são relativamente baixos, característicos de ambientes mesoligotróficos, e que existe uma diferença significativa na concentração de clorofila-*a* entre as marés de sizígia e quadratura, com maiores valores nas primeiras. Nesse sentido, as consequências dessas variações de curta escala da clorofila-a podem orientar os padrões de abundância e características reprodutivas de animais marinhos que residem nesse ambiente.

REFERÊNCIAS

ABREU, P. C. et al. Short-and long-term chlorophyll a variability in the shallow microtidal Patos Lagoon Estuary, Southern Brazil. **Estuaries and Coasts**, v. 33, n. 2, p. 554-569, 2010.

BABIN, M. et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, non-algal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C7, p. 4,1-4,20, 2003.

BANSE, K. Grazing and Zooplankton Production as Key Controls of Phytoplankton Production in the Open Ocean. **Oceanography** 7: 13–20, 1994.

BARBOSA, A; GOMES, C.; PEREIRA, G. Local biological drivers, not remote forcing, predict settlement rate to a subtropical barnacle population. **Marine Ecology Progress Series**, v. 543, p. 201-208, 2016.

BARBOSA, A. C. A. **Importância de fenômenos físicos e biológicos na regulação do assentamento larval de uma população da craca *Chthamalus bisinuatus* Pilsbry (1916) no entre-marés consolidado**. 2010. 67f. Dissertação (Mestrado em Biologia Comparada) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Riberirão Preto da USP, Ribeirão Preto, 2010.

BEAUGRAND, G. et al. Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. **Nature**, v. 426, p. 661-664, 2003.

BERTO, D. et al. Winter to spring variations of chromophoric dissolved organic matter in a temperate estuary (Po River, northern Adriatic Sea). **Marine Environmental Research**, v. 70, n. 1, p. 73-81, 2010.

BEUTLER, M. et al. A fluorometric method for the differentiation of algal populations in vivo and in situ. **Photosynthesis Research**, v. 72, n. 1, p. 39-53, 2002.

BLAUW, A. N. et al. Dancing with the Tides: Fluctuations of Coastal Phytoplankton Orchestrated by Different Oscillatory Modes of the Tidal Cycle. **PLoS ONE**, v. 7, n. 11, p. e49319, 2012.

BLOUGH, N.; DEL VECCHIO, R. Chromophoric DOM in the coastal environment. In: HANSELL, D.; CARLSON, C. (Eds.). **Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter**. Boston: Academic Press, 2002. p. 509-546.

BOSS, E. et al. Spatial and temporal variability of absorption by dissolved material at a continental shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. C7, p. 9499-9507, 2001.

BREWIN, R. J. W., HARDMAN-MOUNTFORD, N. J., LAVENDER, S. J., RAITSOS, D. E., HIRATA, T., UITZ, J., DEVRED, E., BRICAUD, A., CIOTTI, A. M., AND GENTILI, B: An intercomparison of bio-optical techniques for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing, **Remote Sens. Environ**., 115, 325–339, 2011.

BRICAUD, A., H. CLAUSTRE, J. RAS, AND K. OUBELKHEIR. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations, **Journal of Geophysical Research**, 109(C11010), 2004.

BRICEÑO, H.; BOYER, J. Climatic controls on phytoplankton biomass in a sub-tropical estuary, Florida Bay, USA. **Estuaries and Coasts**, v. 33, n. 2, p.541-553, 2010.

BUENO, M.; MOSER, G.A.O.; TOCCI, B.R.C.; FLORES, A.A.V. Retention-favorable timing of propagule release in barbacles and periwinkles. **Marine Ecology Progress Series**. 414: 155–165, 2010.

CARLSON, C. A.; DUCKLOW, H. W.; SLEETER, T. D. Stocks and dynamics of bacterioplankton in the northwestern Sargasso Sea. **Deep-Sea Research II**, v. 43, p. 491-515, 1996.

CASTRO FILHO, B. M. **Correntes e Massas de água da Plataforma Continental Norte de São Paulo**. 1996. 245 f. Tese (Livre Docência) - Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CASTRO FILHO, B. M. et al. Processos físicos: Hidrografia, circulação e Transporte. In: PIRES-VANIN, A. M. S. (Org.). **Oceanografia de um ecossistema subtropical:** Plataforma de São Sebastião, SP. São Paulo: Edusp,. p. 59-121. 2008.

CASTRO FILHO, B. M. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 15-23, 2014.

CASTRO FILHO, B. M.; MIRANDA, L. B. Hydrographic properties in the São Sebastião Channel: observed in March 1980. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n. 2, p. 111-123, 1998.

CAZELLES, B. et al. Wavelet analysis of ecological time series. **Oecologia**, v. 156, n. 2, p. 287-304, 2008.

CIOTTI, Á. M.; GARCIA, C.; JORGE, D. Temporal and meridional variability of Satellite-estimates of surface chlorophyll concentration over the Brazilian continental shelf. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 236-253, 2010.

CIOTTI, Á. M.; MAHIQUES, M.; MOLLER, O. The meridional gradients of the S-SE Brazilian continental shelf: Introduction to the special volume. **Continental Shelf Research**, v. 89, p. 1-4, 2014.

CIOTTI, A. M., M. R. LEWIS, AND J. J. CULLEN. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient**. Limnol. Oceanogr**. 47: 404–417, 2002.

CLOERN, J. E. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: a review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. **Reviews of Geophysics**, v. 34, n. 2, p. 127-168, 1996.

CLOERN, J. E.; POWELL, T. M.; HUZZEY, L. M. Spatial and temporal variability in south San Francisco Bay (USA). II. Temporal changes in salinity, suspended

sediments, and phytoplankton biomass and productivity over tidal time scales. **Estuarine**, **Coastal and Shelf Science**, v. 28, p. 599-613, 1989.

CLOERN, J. E; JASSBY, A. Patterns and scales of phytoplankton variability in estuarine–coastal ecosystems. **Estuaries and Coasts**, v. 33, n. 2, p. 230-241, 2010.

CULLEN, J. J. et al. Physical influences on marine ecosystem dynamics. In: ROBINSON, A. R.; MCCARTHY, J. J.; ROTHSCHILD, B. J. (Eds.). **The Sea – Biological-Physical Interactions in The Ocean**. New York: John Wiley & Sons Inc., 2002. p. 297-336.

CULLEN, J. J. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 39, n. 5, p. 791-803, 1982.

CUSHING, D. H. Plankton production and year-class strength in fish populations: an update of the match/mismatch hypothesis. **Advances in Marine Biology**, v. 26, p. 249-293, 1990.

CUSHING, D. H. The regularity of the spawning season of some fishes. **Journal du Conseil / Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer**, v. 33, p. 81-92, 1969.

DEL VECCHIO, R.; SUBRAMANIAM, A. Influence of the Amazon River on the surface optical properties of the Western Tropical North Atlantic Ocean. **J Geophys Res**, v. 109, p. C11001, 2004.

DOMINGUES, R. B. et al. Tidal Variability of Phytoplankton and Environmental Drivers in the Freshwater Reaches of the Guadiana Estuary (SW Iberia). **Hydrobiology**, v. 95, p. 352-362, 2010.

DOTTORI, M.; SIEGLE, E.; CASTRO, B. M. Hydrodynamics and water properties at the entrance of Araçá Bay, Brazil. **Ocean Dynamics**, v. 65, n. 12, p. 1731-1741, 2015.

EMILSON, I. The shelf and coastal Waters off Southern Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. XI, n. 2, p. 101-112, 1961.

EPPLEY, R. W. Estimating Phytoplankton Growth Rates in Oligotrophic Oceans. In: FALKOWSKI, P. G. (Org.). **Primary Productivity in the Sea**. New York: Plenum Press, 1980. p. 231-242.

FALKOWSKI, P. G.; RAVEN, J. A. **Aquatic Photosynthesis**. Oxford: Blackwell Science, 1997.

FLORES, A. A. V., R. A. CHRISTOFOLETTI, A. L. F. PERES, A. M. CIOTTI, AND S. A. NAVARRETE. Interactive effects of grazing and environmental stress on macroalgal biomass in subtropical rocky shores: Modulation of bottom-up inputs by wave action. **J. Exp. Mar. Bio. Ecol**. **463**: 39–48. 2015.

FONTES, R. F. C. **As correntes no Canal de São Sebastião**. 1995. 159 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

FRANKS, P. NPZ. Models of plankton dynamics: their construction, coupling to physics, and application. **J. Oceanogr**. 58: 379–387, 2002.

FURTADO, V.V.; BONETTI FILHO, J. & CONTI, L.A. Paleo River Valley Morphology and Sea Level Changes at Southeastern Brazilian Continental Shelf. **An. Ac. Bras**. Ci. 68 (supl. 1): 163-169, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

GAETA, S. A. et al. Produtividade primária, plâncton e covariáveis ambientais no Canal de São Sebastião durante o outono. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 50, n. 4, p. 963-974, 1999.

GALLEGOS, C. L.; CORREL, D. L.; PIERCE, J. W. Modeling spectral diffuse attenuation, absorption, and scattering coefficients in a turbid estuary. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 35, n. 7, p. 1486-1502, 1990.

GIANESELLA, S. M. F. et al. Assessment of plankton community and environmental conditions in São Sebastião Channel prior to the construction of a produced water outfall. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 47, n. 1, p. 29-46, 1999.

GORDON, H. R. et al. A semianalytical radiance model of ocean color. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p. 8670-8684, 1988.

GRINSTED, A.; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, p. 561-566, 2004.

HARDING, J. R.; PERRY, E. S. Long-term increase on biomass in Chesapeake Bay, 1959–1994. **Marine Ecology Progress Series**, v. 157, p. 39-52, 1997.

HARRIS, G. P. **Phytoplankton ecology; structure, function and fluctuation**. London: Chapman and Hall, 1986.

HAYS, G. C.; RICHARDSON, A. J.; ROBINSON, C. Climate change and marine plankton. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 6, p. 337-344, 2005.

HEIL, C. et al. Nutrient stoichiometry of a *Gymnodinium breve* Davis (Gymnodiniales: Dinophyceae) bloom: What limits blooms in oligotrophic environments? In: HALLEGRAEFF, G. M. et al. (Eds.). **Harmful algae**. Oostende: UNESCO, 2001. p. 165-168.

HENTSCHEL, B.; EMLET, R. Metamorphosis of barnacle nauplii: effects of food variability and a comparison with amphibian models. **Ecology**, v. 81, p. 3495-3508, 2000.

HOLM-HANSEN, O. et al. Fluorometric determination of chlorophyll. **Journale du Conseil Permanent Internationale pour l'Exploration de la Mer**, v. 30, p. 3-15, 1965.

HOUT, Y. et al. Relationship between photosynthetic parameters and different proxies of phytoplankton biomass in the subtropical ocean. **Biogeosciences**, v. 4, p. 853-868, 2007.

JASSBY, A. D.; CLOERN, J. E.; COLE, B. E. Annual primary production: patterns and mechanisms of changes of a nutrient-rich tidal ecosystem. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 47, n. 3, p. 698-712, 2002.

KARL, D. V.; LUKAS, R. The Hawaii Ocean Time-series (HOT) program: Background, rationale and field implementation. **Deep-Sea Research II**, v. 43, n. 2-3, p. 129-156, 1996.

KASTEN, P. **Efeitos da condição trófica ambiental na ecologia reprodutiva e desempenho larval em cracas do entremarés**. 2016. Tese (Doutorado em Biologia Comparada) - Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2016.

KASTEN, P.; FLORES, A. Disruption of endogenous tidal rhythms of larval release linked to food supply and heat stress in an intertidal barnacle. **Marine Ecology Progress Series**, v. 472, p. 185-198, 2013.

KIEFER, D. A. Fluorescence properties of natural phytoplankton populations. **Marine Biology**, v. 22, p. 263-269, 1973.

KIRK, J. T. O. **Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**. New York: Cambridge University Press, 1994.

KROMKAMP, J.; VAN ENGELAND, T. Changes in phytoplankton biomass in the Western Scheldt estuary during the period 1978–2006. **Estuaries and Coasts**, v. 33, p. 270-285, 2010.

LAZAR, D. Chlorophyll a fluorescence induction. **Biochimica et Biophysica Acta**, v. 1412, p. 1-28, 1999.

LESTER, K. et al. Evolution of a Gymnodinium breve (Gymnodiniales, Dinophyceae) red tide bloom on the west Florida shelf: Relationship with organic nitrogen and phosphorus. In: HALLEGRAEFF, G. M. et al. (Eds.). **Harmful algal blooms**. Paris: UNESCO, 2000. p. 161-163.

LI, Y.; SMAYDA, T. J. A cholophyll time series for Narragansett Bay: Assessment of the potential effect of tidal phase on measurement. **Estuaries**, v. 24, n. 3, p. 328-336, 2001.

LOHRENZ, S. E. et al. Seasonal variability m primary production and particle flux in the Northwestern Sargasso Sea. U.S. JGOFS Bermuda time-series study. **Deep-Sea Research**, v. 39, n. 7-8A, p. 1373-1391, 1992.

LONGHURST, A. **Ecological geography of the sea**. San Diego: Academic Press, 1998.

LORENZEN, C. J. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. **Deep-Sea Research**, v. 13, n. 2, p. 223-227, 1996.

MALONE, T. C. et al. Influence of river flow on the dynamics of phytoplankton production in a partially stratified estuary. **Marine Ecology Progress Series**, v. 48, p. 235-249, 1988.

MARAÑÓN, E. Phytoplankton growth rates in the Atlantic subtropical gyres. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 50, n. 1, p. 299-310, 2005.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence: practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000.

MAZZINI, P. L. F. **Correntes Subinerciais na Plataforma Continental Interna entre Peruíbe e São Sebastião: Observações**. 2009. 112 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MAZZUCO, A.C. A; CIOTTI, A. M., CHRISTOFOLETTI, R. A. **Variation in recruitment rates of rocky shore intertidal invertebrates in response to alterations in physical forcings, chlorophyll-a concentration and temperature: the effect of cold fronts**. 2015. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

MESQUITA, A. R. Variações do nível médio do mar nas escalas decadal e interdecadal na costa sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO SOBRE ONDAS E MARÉS OCEÂNICAS, 1., 1995., Arraial do Cabo. **Anais…** Arraial do Cabo: IEAPM, 1995. p. 52-53.

METZLER, P. et al. New and regenerated production in the South Atlantic off Brazil. **Deep-Sea Research Part I**, v. 44, n. 3, p. 363-384, 1997.

MILLS, E. L. **Biological Oceanography, An Early History, 1870-1960**. New York: Cornell University Press, 1989.

MIRANDA, L. B. **Análise de massa de água de plataforma continental e da região oceânica adjacente:** Cabo de São Tom é (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). São Paulo. 1982. 194 f. Tese (Livre Docência) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

MIRANDA, L. B. Forma de correlação T–S de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a ilha de São Sebastião (SP), Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 33, n. 2, p. 102-119, 1985.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. Variabilidade da circulação e do transporte de volume no Canal de São Sebastião (SP). **Publicação Especial do Instituto Oceanográfico**, v. 11, p. 1-9, 1995.

MOREL, A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (Case I waters). **Journal of Geophysical Research**, v. 93, n. C9, p. 10,749-10,768, 1988.

MOREL, A. Optical properties of pure water and pure seawater. In: JERLOV, N. G.; STEEMAN-NIELSEN, E. (Eds.). **Optical aspects of oceanography**. London: Academic Press, 1974. p. 1-24.

MOREL, A.; PRIEUR, E. L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

MOSER, G. A. O. et al. Changes in phytoplankton composition in response to tides, wind-induced mixing conditions, and freshwater outflows in an urbanised estuarine complex. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 1, p. 97-111, 2012.

NELSON, J. R.; GUARDA, S. Particulate and dissolved spectral absorption on the continental shelf of the southeastern United States. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. C5, p. 8715-8732, 1995.

NEVEUX, J. et al. Chlorophylls and Phycoerythrins as Markers of Environmental Forcings Including Cyclone Erica Effect (March 2003) On Phytoplankton in the Southwest Lagoon of New Caledonia and Oceanic Adjacent Area. **International Journal of Oceanography**, p. 1-19, 2009.

ORRICO, C. M. et al. WQM: a new integrated water quality monitoring package for long-term in-situ observation of physical and biogeochemical parameters. In: OCEANS, 2007., Vancouver. **Proceedings…** Vancouver: IEEE, 2007. p. 1-9.

PAIXÃO, S. V. **Transporte de volume e condições hidrográficas no Canal de São Sebastião**. 2008. 210 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PEGAU, W. S.; GRAY, D.; ZANEVELD, J. R. V. Absorption of visible and near-infrared light in water: the dependence on temperature and salinity. **Applied Optics Research**, v. 36, v. 24, p. 6035-6046, 1997.

PERES, A. L. F. **Efeito de diferentes massas de água nas classes de tamanho da biomassa fitoplanctônica na região de desembocadura da baía do Araçá (Canal de São Sebastião - SP) durante o verão e inverno de 2012**. 2013. 56 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2013.

PHILIPPART, C. et al. Long-term field observations on seasonality in chlorophyll-*a* concentrations in a shallow coastal marine ecosystem, the Wadden Sea. **Estuaries and Coasts**, v. 33, n. 2, p. 286-294, 2010.

PROCTOR, C. W.; ROESLER, C. S. New insights on obtaining phytoplankton concentration and composition from in situ multispectral Chlorophyll fluorescence. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 8, p. 695-708, 2010.

REUTER, R. et al. A hydrographic time series station in the Wadden Sea (southern North Sea). **Ocean Dynamics**, v. 59, n. 2, p. 195-211, 2009.

REYNOLDS, R. A.; STRAMSKI, D.; MITCHELL, B. G. A chlorophyll-dependent semianalytical reflectance model derived from field measurement of absorption and backscattering coefficients within the Southern Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. C4, p. 7125-7138, 2001.

RICHARDSON, T. L.; LAWRENZ, E.; PINCKNEY, J. L. Spectral fluorometric characterization of phytoplankton community composition using the Algae Online Analyser. **Water Research**, v. 44, n. 8, p. 2461-2472, 2010.

RILEY, G. A., STOMMEL, H. AND BUMPUS, D. F. Quantitative ecology of the plankton of the western North Atlantic. Bull. **Bingham oceanogr**. Coll. 12: 1-169, 1949.

ROEGNER, G. C. et al. Wind-induced plume and bloom intrusions into Willapa Bay, Washington. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 47, n. 4, p. 1033-1042, 2002.

ROESLER, A. H. et al. Using optical proxies for biogeochemical properties to study land coverage and terrestrial inputs of organic carbon into coastal waters from the Penobscot Watershed to the Gulf of Maine. In: OCEAN OPTICS, 18., 2006., Montreal. **Proceedings…** Montreal: SPIE, 2006. p. 9-13.

ROESLER, A. H.; BOSS, E. In situ measurement of the inherent optical properties (IOPs) and potential for harmful algal bloom (HAB) detection and coastal ecosystem observations. In: BABIN, M.; ROESLER, C. S.; CULLEN, J. (Eds.). **Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and harmful algal blooms:** theory, instrumentation and modeling. Paris: UNESCO, 2008. p. 153-206.

ROESLER, C. S. **Calibration and correction of the chlorophyll fluorometer on GoMOOS Buoy A01:** November 2005-June 2013. Boston: Massachusetts Water Resources Authority, 2014.

SALDANHA-CORRÊA, F. M. P. **Simulação da mistura vertical de massas de água da região de Ubatuba (SP):** Efeitos sobre a produção primária e biomassa fitoplantônica. 1993. 250 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - Instituto de Oceanografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

SALDANHA-CORRÊA, F. M. P.; GIANESELLA, S. M. F. Produção Primária e Fitoplâncton. In: PIRES-VANIN, A. M. S. (Ed.). **Oceanografia de um Ecossistema Subtropical:** Plataforma de São Sebastião, SP. São Paulo: Edusp, 2008. p. 223-252.

SHIBATA, T.; TRIPATHY, S. C.; ISHIZAKA, J. Phytoplankton pigment change as a photoadaptive response to light variation caused by tidal cycle in Ariake Bay, Japan. **Journal of Oceanography**, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2010.

SHOAF, W. T.; LIUM, B. W. Improved extraction of chlorophyll a and b from algae using dimethyl sulfoxide. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 21, n. 6, p. 926-928, 1976.

SINCLAIR, M.; SUBBA RAO, D. V.; COUTURE, R. Phytoplankton temporal distributions in estuaries. **Oceanologica Acta**, v. 4, n. 2, p. 239-246, 1981.

STEELE, J. H.; HENDERSON, E. W. A simple plankton model. **American Naturalist**, v. 117, p. 676-691, 1981.

TASSAN, S.; FERRARI, G. M. An alternative approach to absorption measurements of aquatic plants retained on filters. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 40, p. 1358-1368, 1995.

THIMIJAN, R. W.; HEINS, R. D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. **HortScience**, v. 18, n. 6, p. 818-822, 1983.

TOCCI, B. R. C. **Ocorrência e coexistência de cianobactérias diazotróficas no Canal de São Sebastião-SP com o aumento da pluviosidade.** 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet Analysis. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.

TORRES, G.; GIMÉNEZ, L.; PETTERSEN, A. Persistent and context-dependent effects of the larval feeding environment on post-metamorphic performance through the adult stage. **Marine Ecology Progress Series**, v. 545, p. 147-160, 2016.

VAN BEUSEKOM, J. E. E. et al. Phytoplankton, protozooplankton and nutrient dynamics in the Bornholm Basin (Baltic Sea) in 2002–2003 during the German GLOBEC Project. **International Journal of Earth Sciences**, v. 98, p. 251-260, 2009.

VAN HAREN, H.; MILLS, D. K.; WETSTEYN, L. P. M. J. Detailed observations of the phytoplankton spring bloom in the stratifying central North Sea. **Journal Of Marine Research**, v. 56, p. 655-680, 1998.

VILLAMARIN, B. C. **Alterações morfológicas da Baía do Araçá: Implicações em sua dinâmica**. 2014. Monografia (Bacharelado em Oceanografia) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

WANG, C. F.; HSU, M. H.; KUO, A. Y. Residence time of the Danshuei River estuary, Taiwan. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 60, p. 381-393, 2004.

WATERBURY, J. B. et al. Biological and ecological characterizations of the marine unicellular cyanobacterium Synechococcus. **Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 214, p. 71-120, 1986.

WELSCHMEYER, N. A. Fluorometric analysis of chlorophyll *a* in the presence of chlorophyll *b* and pheopigments. **Limnology and Oceanography:** Methods, v. 39, n. 8, p. 1985-1992, 1994.

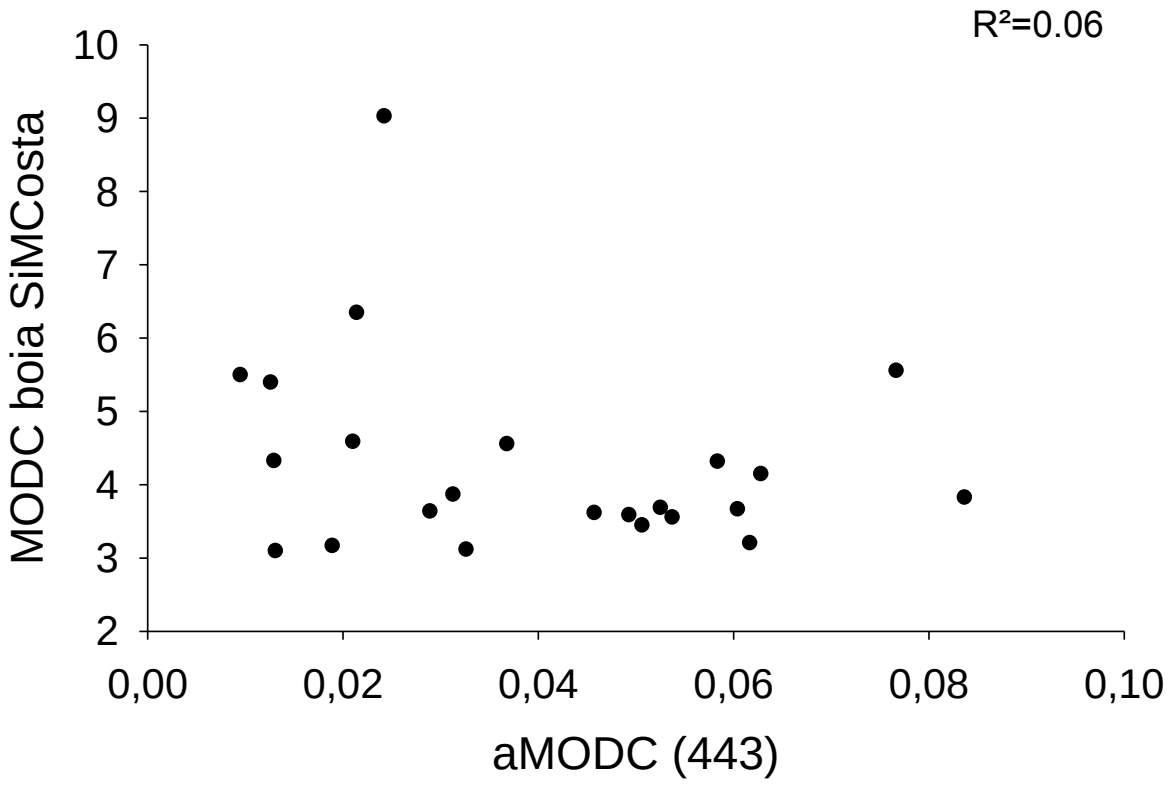
WINDER, M.; CLOERN, J. E. The annual cycles of phytoplankton biomass. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 365, p. 3215-3226, 2010.

YENTSCH, C. S.; MENZEL, D. W. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll a and phaeophytin by fluorescence. **Deep-Sea Research**, v. 10, p. 221-231, 1963.

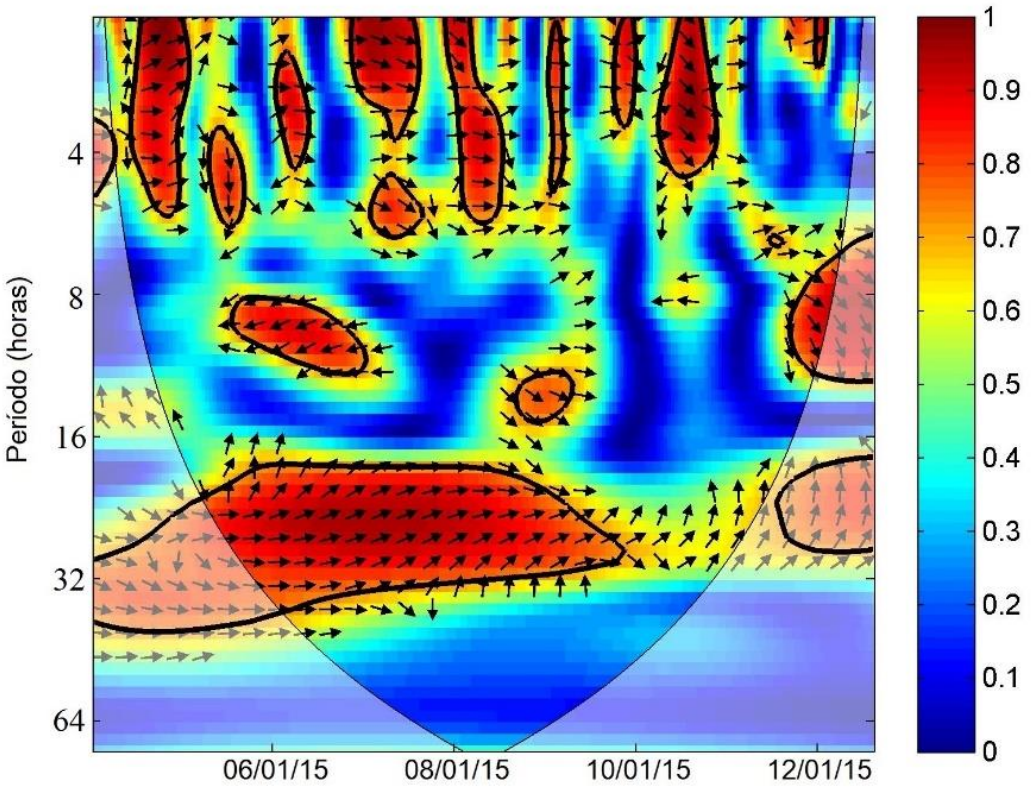
YIN, K. et al. Effect of wind events on phytoplankton blooms in the Pearl River estuary during summer. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 16, p. 1909-1923, 2004.

ZINGONE, A.; PHLIPS, E. J.; HARRISON, P. J. Multiscale Variability of Twenty-Two Coastal Phytoplankton Time Series: a Global Scale Comparison. **Estuaries and Coasts**, v. 33, p. 224-229, 2010.

APÊNDICE A – RELAÇÃO ENTRE A ABSORÇÃO DE LUZ PELO MATERIAL ORGÂNICO DISSOLVIDO COLORIDO (AMODC_443NM) MEDIDO NO WPI E A FLUORESCÊNCIA DE MODC MEDIDA NA BOIA SIMCOSTA

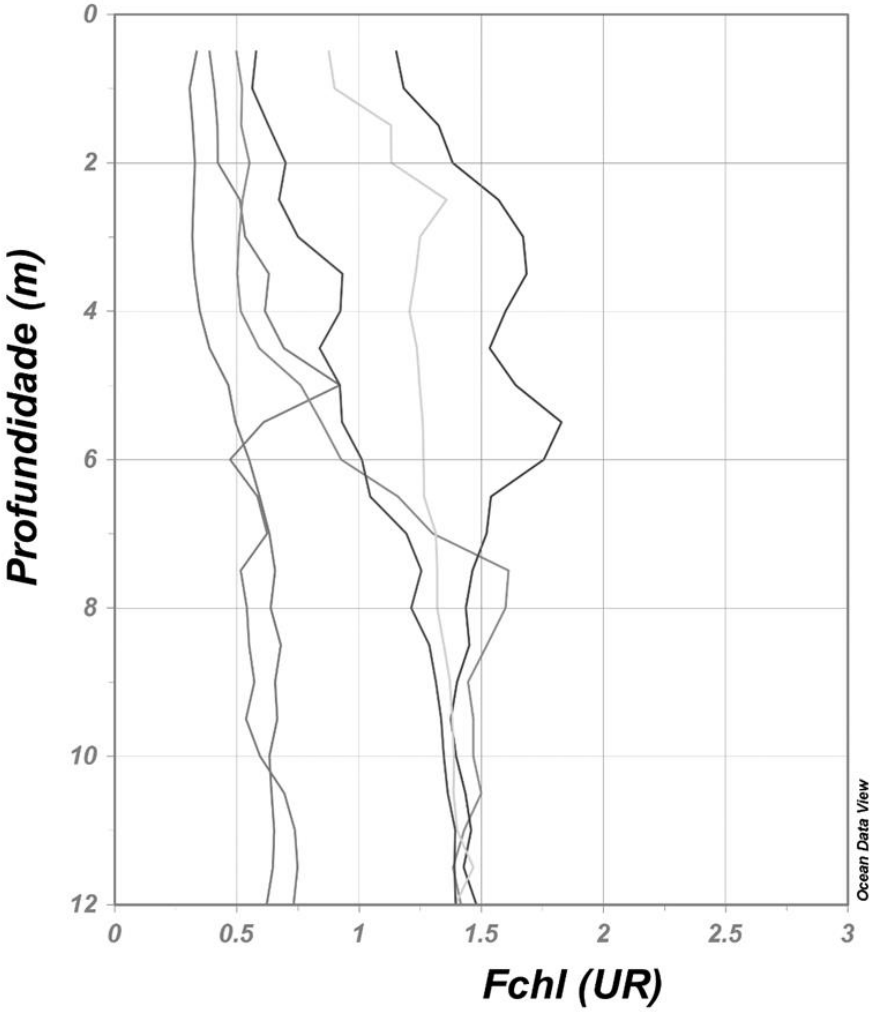


APÊNDICE B – ESPECTRO CRUZADO DE ONDALETAS DA MÉDIA HORÁRIA DA TURBIDEZ E CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-*A* DURANTE UMA SEMANA COM MARÉ DE SIZÍGIA



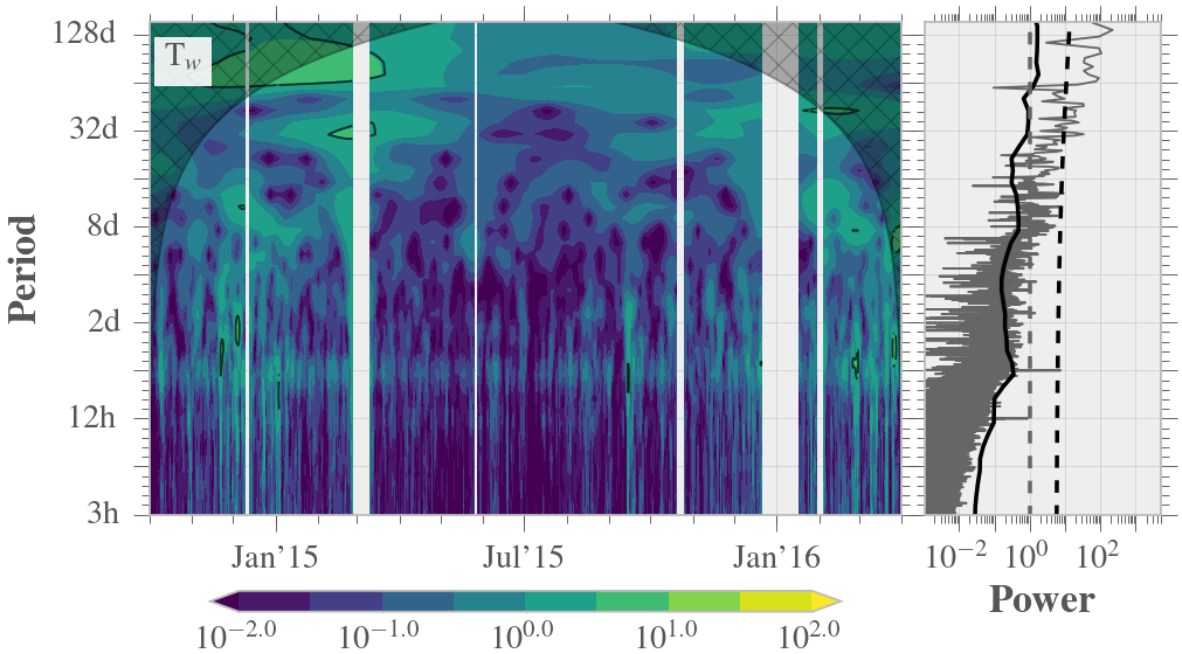
Espectro cruzado de ondaletas da média horária da turbidez e concentração da clorofila-*a* durante uma semana com maré de sizígia (04 de janeiro de 2015 a 12 de janeiro 2015). A escala de cores expressa a coerência entre as duas séries temporais. As flechas indicam o ângulo de fase entre as flutuações das séries, de modo que flechas apontando para a direita representam as flutuações em fase e flechas apontando para a esquerda indicam flutuações em antifase. Conferir a legenda da Figura 24 para maiores explicações acerca do espectro de ondaletas.

APÊNDICE C – PERFIL VERTICAL DE CTD COM A PROFUNDIDADE MOSTRANDO UM AUMENTO DA CLOROFILA-A EM SUBSUPERFÍCIE



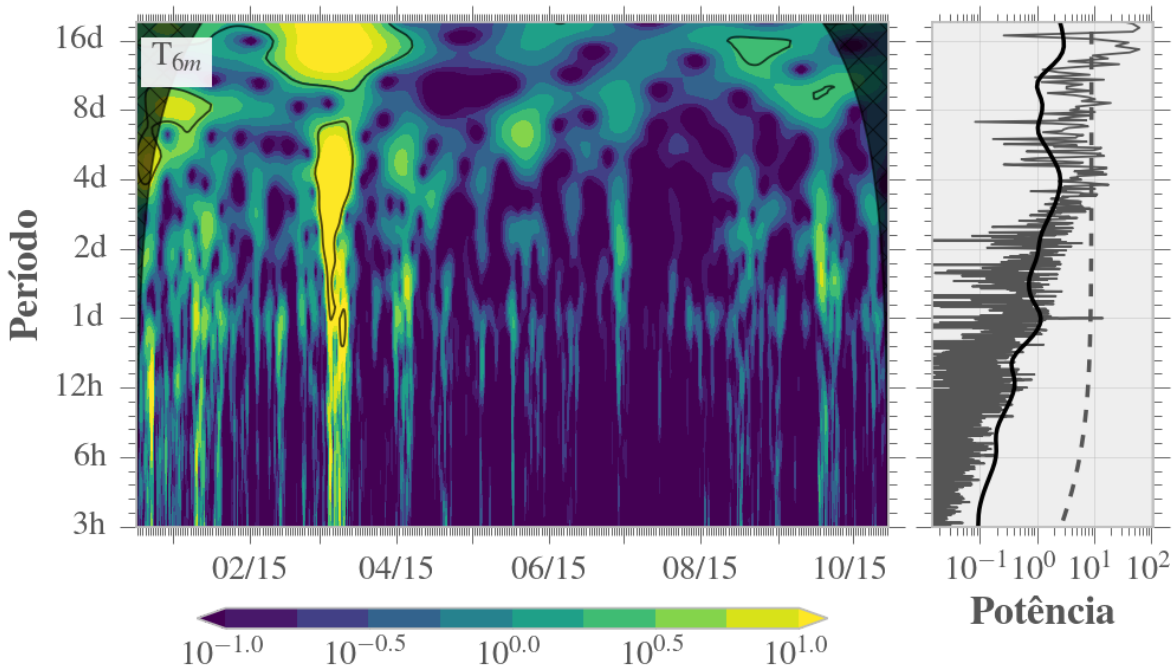
APÊNDICE D – ANÁLISE ESPECTRAL DA TEMPERATURA DA ÁGUA (°C) HORÁRIA MEDIDA POR MEIO DA BOIA SIMCOSTA ENTRE OUTUBRO E MARÇO DE 2016 (FIGURA A). E DOS TIDBITS PRESOS A CORRENTE DA BOIA EM 6 METROS (FIGURA B), E 8 METROS (FIGURA C)

Figura A – Análise espectral da temperatura da água superficial (°C) horária medida por meio da boia SiMCosta entre outubro de 2014 e março de 2016



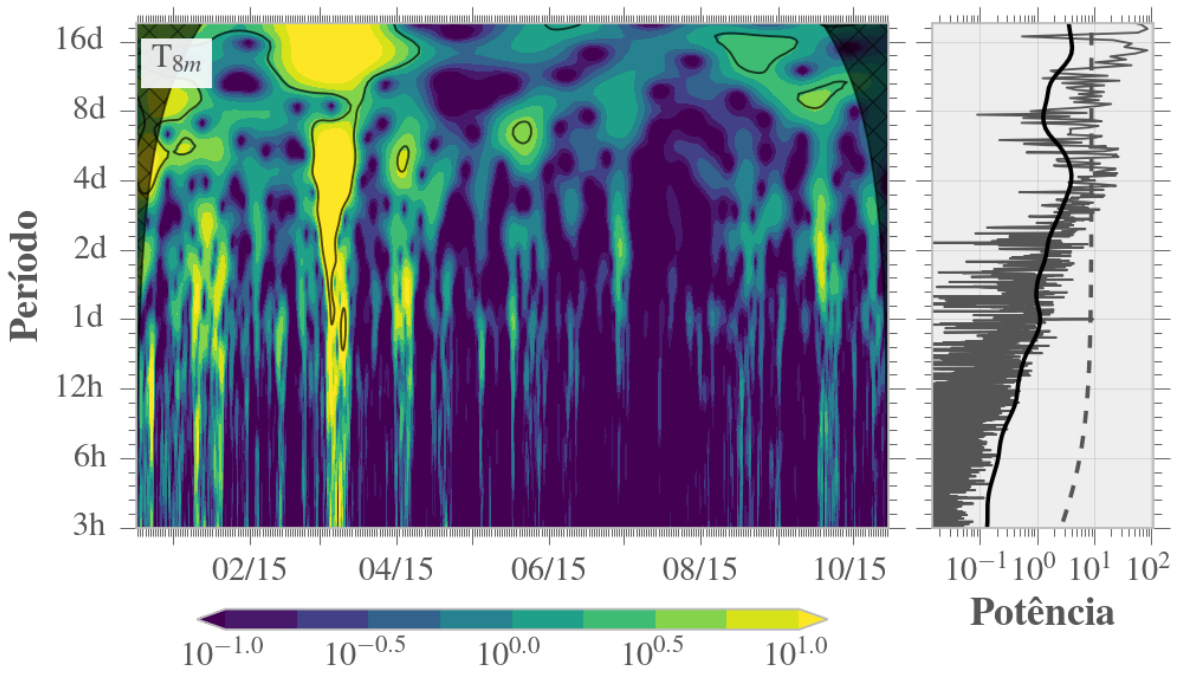
Análise espectral da temperatura horária da água do mar entre outubro de 2015 e março de 2016. As séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

Figura B – Análise espectral da temperatura da água (°C) horária medida por meio os tidbits presos à corrente da boia em seis metros entre janeiro e outubro de 2015



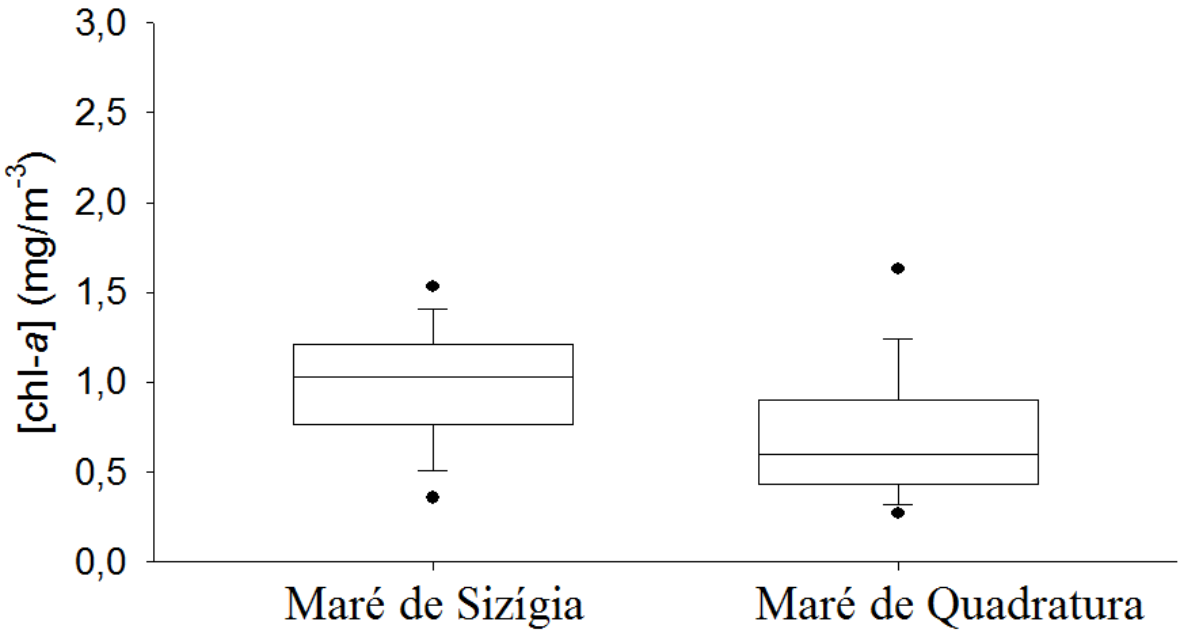
Análise espectral da temperatura horária da água do mar em 6 metros de profundidade entre janeiro e outubro de 2015. As séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

Figura D – Análise espectral da temperatura da água (°C) horária medida por meio os tidbits presos à corrente da boia em oito metros entre janeiro e outubro de 2015



Análise espectral da temperatura horária da água do mar em 8 metros de profundidade entre janeiro e outubro de 2015. As séries temporais foram normalizadas pelo desvio padrão de cada parâmetro. A linha de contorno delimita as regiões com potência significativa de 95% em relação a um espectro teórico de ruído vermelho (α= 0,8). A área sombreada e hachurada indica a região afetada pelo cone de influência da função ondaleta. Direita do gráfico: espectros de Fourier − linha contínua cinza; espectros de ondaleta global − linha contínua preta; espectro de Fourier teórico para ruído vermelho − linha tracejada cinza; nível de significância do espectro de ondaleta global − linha tracejada preta. Os períodos e os espectros de potência estão em escala logarítmica. Lacunas nos dados são representadas por faixas brancas.

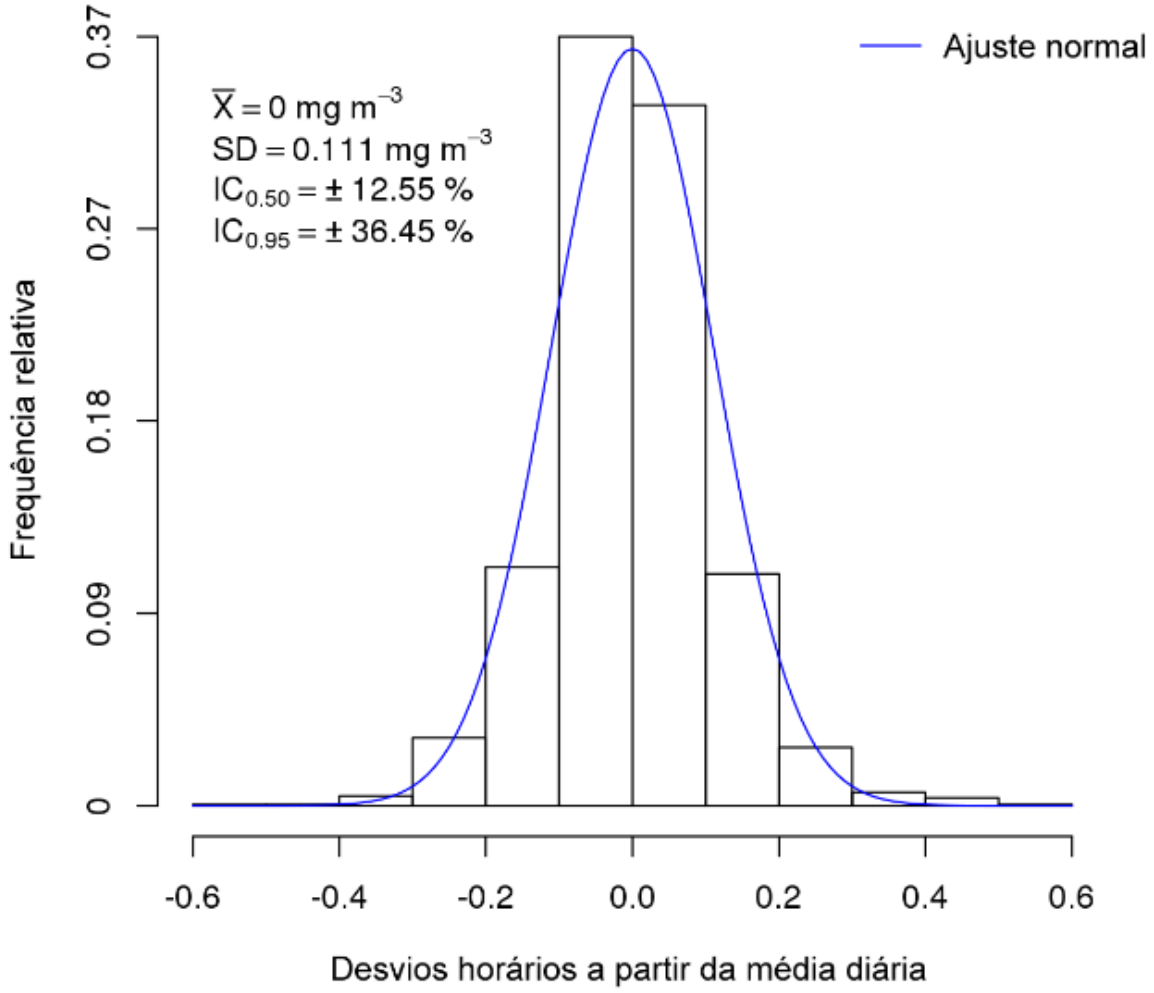
APÊNDICE E – BOX-PLOTS COMPARANDO AS DIFERENTES CONCENTRAÇÕES MÉDIAS HORÁRIAS DE CLOROFILA-*A* OBTIDAS PELA BOIA SIMCOSTA DURANTE DEZEMBRO DE 2014 A ABRIL DE 2015, E AS MARÉS DE SIZÍGIA E QUADRATURA (P=0,000)

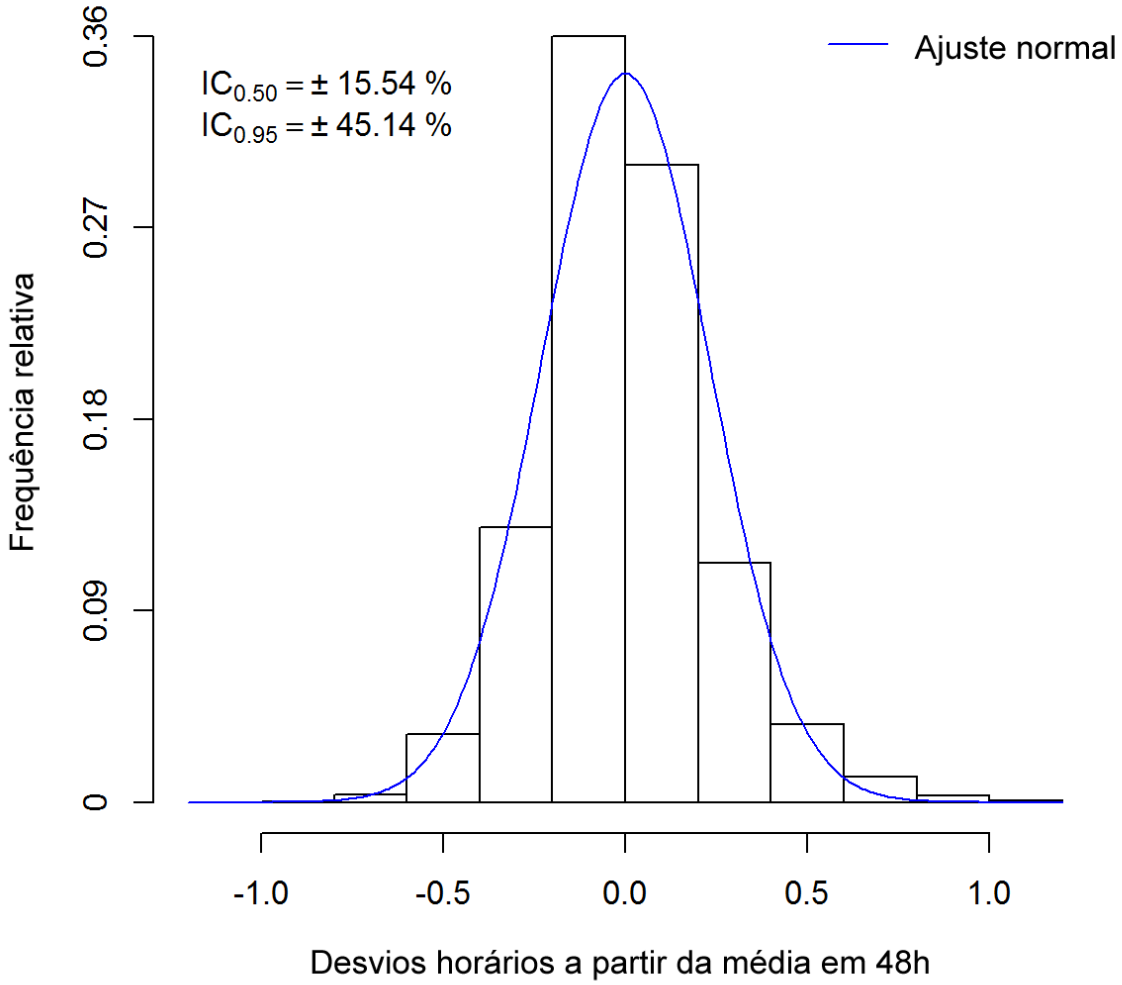


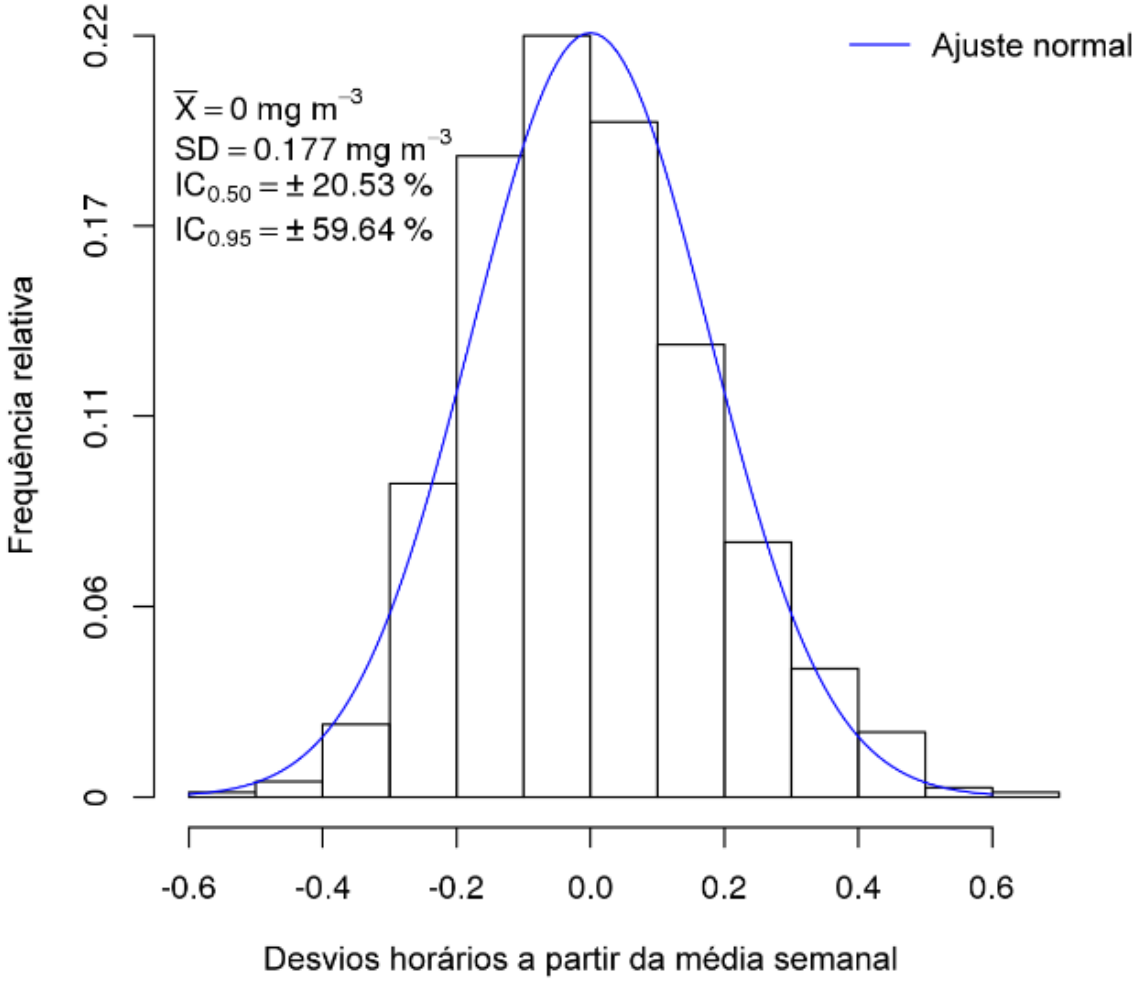
APÊNDICE F – IMPLICAÇÕES PARA O MONITORAMENTO MARINHO

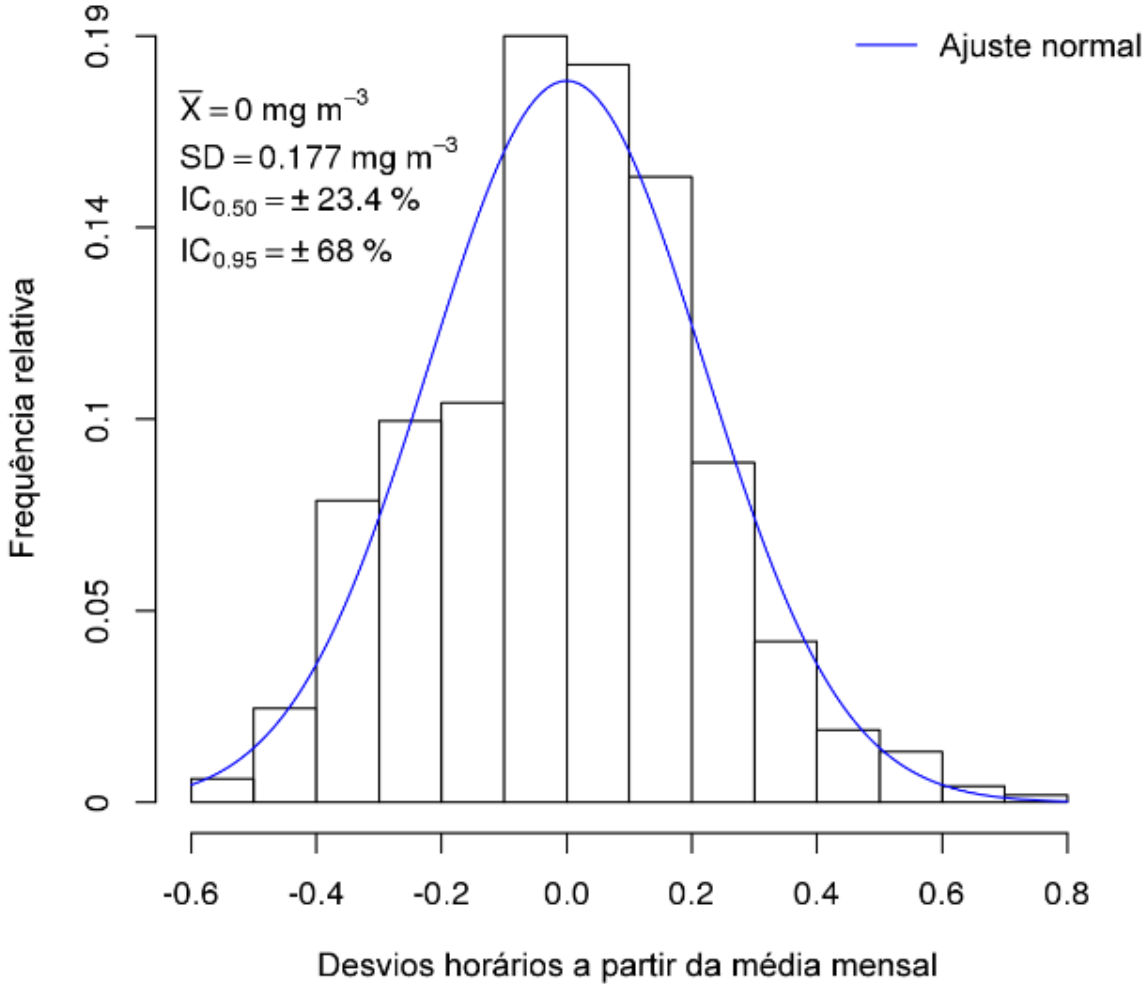
Com o intuito de investigar como seria a variabilidade das medidas de concentração da clorofila-*a* se houvesse apenas uma amostragem diária em oposição às 12 medições horárias noturnas que o SiMCosta oferece, construíram-se histogramas relativos a diferentes tamanhos amostrais. De acordo com esses histogramas, percebe-se que a variabilidade associada a apenas uma coleta diária é de aproximadamente 18%, com um intervalo de confiança (IC) de 0,95 de ± 36,45, o que indica que 95% das amostras coletadas dessa forma estariam dentro de 36% do valor da média para esse dia. Se, ao invés de realizar a coleta diariamente, o intervalo aumentasse para uma coleta a cada dois dias, o erro aumentaria para ± 22%. Já se a coleta fosse efetuada uma única vez por semana, haveria um erro associado de 30%, isto é, 95% das amostras estariam entre ± 60% da média semanal real. Por fim, se houvesse apenas uma coleta no mês, a fim de caracterizar este período, o erro aproximado ficaria em torno de 34%, significando que 95% das amostras coletadas estariam dentro de ± 68% da média mensal.

A seguir, são apresentados os histogramas relativos à amostragem diária, a cada 48 horas, semanal e mensal, com os respectivos erros associados e intervalos de confiança (IC).

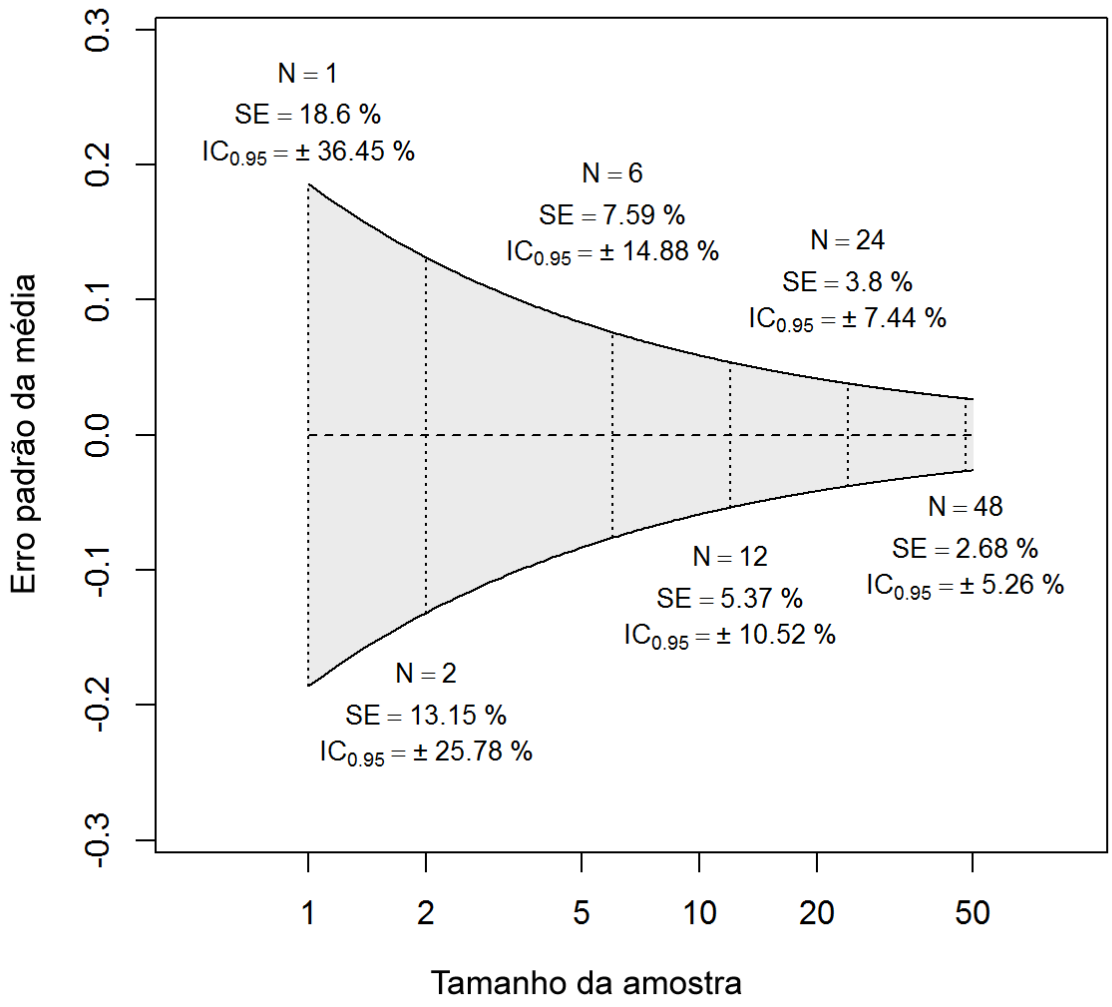

Ajuste normal
$\overline{X} = 0$ mg m^{-3}
SD = 0.111 mg m^{-3}
$IC_{0.50} = \pm 12.55$ %
$IC_{0.95} = \pm 36.45$ %
Frequência relativa
0
0.09
0.18
0.27
0.37
-0.6
-0.4
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
Desvios horários a partir da média diária


Ajuste normal
IC0.50 = ± 15.54 %
IC0.95 = ± 45.14 %
Frequência relativa
0
0.09
0.18
0.27
0.36
-1.0
-0.5
0.0
0.5
1.0
Desvios horários a partir da média em 48h


Ajuste normal
$\overline{X} = 0$ mg m^{-3}
SD = 0.177 mg m^{-3}
$IC_{0.50} = \pm 20.53$ %
$IC_{0.95} = \pm 59.64$ %
Frequência relativa
0
0.06
0.11
0.17
0.22
-0.6
-0.4
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
Desvios horários a partir da média semanal



A seguir, está a curva da redução do erro padrão da média com o aumento do N amostral.



A estimativa para a boia SiMCosta, programada para ter uma medida horária (24 por dia), mostra que o erro padrão da média com essa frequência de amostragem é de aproximadamente 4%. Se o N amostral fosse reduzido para somente 12 amostragens diárias, o erro associado aumentaria para 5,37%. E, por fim, se houvesse apenas uma amostragem diária, o erro padrão da média atingiria o valor de 18%, com o IC mostrando que 95% das amostras estariam em um intervalo de ± 36% da média diária real.

Sinclair, Subba Rao e Couture (1981) destacam a importância de considerar a variabilidade dos processos físicos no estudo da distribuição do fitoplâncton. Somado a isso, amostragens em baixa frequência, usualmente empregadas nos programas de

monitoramento, podem caracterizar incorretamente valores máximos, mínimos e médios e tendências de longo prazo, uma vez que muitos processos físicos, químicos e biológicos característicos dos ambientes costeiros ocorrem em frequências horárias (DOMINGUES et al., 2010).

A esse respeito, Harris (1986) indicou o perigo de criar falsas tendências em séries de dados devido a amostragens esporádicas e sugeriu que a variabilidade de curto prazo é perdida durante observações oceanográficas esparsas. Nesse sentido, a superposição de várias flutuações periódicas da concentração e composição da biomassa fitoplanctônica é um desafio para o desenho amostral do monitoramento marinho. Por exemplo, o ciclo de maré semidiurna leva em torno de 12 horas, de modo que, se as medidas forem feitas uma vez todos os dias ao meio-dia, estas podem sugerir erroneamente grandes mudanças na concentração da biomassa ao longo de vários dias, quando, na verdade, esses dados representam simplesmente diferentes fases do ciclo de maré semidiurna. Da mesma forma, o ciclo sizígia/quadratura demora um pouco mais de 14 dias; assim, se um corpo de água é amostrado uma vez a cada duas semanas, os dados podem erroneamente sugerir grandes mudanças na concentração e composição do fitoplâncton ao longo de um período de vários meses, em vez de refletir diferentes fases do ciclo de sizígia/quadratura.

Para evitar tais desvios amostrais, a resolução temporal das medições deve ser suficientemente refinada a fim de capturar as periodicidades no sistema. Na prática, isso implica que as concentrações de clorofila-*a* devem ser medidas em intervalos mínimos de uma hora para capturar o ciclo de maré semidiurna. Alternativamente, se os recursos são limitados, podem-se considerar medições menos frequentes, sempre respeitando, contudo, os ciclos da maré semidiurna e sizígia/quadratura.

A estimativa que se tem para a boia SiMCosta, programada para ter uma medida horária, mostra que o erro padrão da média com essa frequência de amostragem é de aproximadamente 4%, com um IC 0,95 de ± 7,44, indicando que 95% das amostras coletadas dessa forma estão dentro de 7% do valor da média para o dia. Sendo assim, se o número amostral fosse reduzido para somente uma amostragem diária, por exemplo, o erro padrão da média atingiria o valor de 18%, com o IC mostrando que 95% das amostras estariam em um intervalo de ± 36% da média diária real. Esses erros padrões devem ser levados em consideração para futuros modelos oceanográficos, ecológicos e climáticos no ambiente do CSS.

ANEXO A – PROJETO SIMCOSTA

No Brasil, as pesquisas relacionadas com impactos, vulnerabilidades e adaptações às mudanças climáticas são limitadas pelas deficiências do conhecimento sobre a dinâmica natural dos ecossistemas costeiros e pela escassez de longas séries temporais. Para a criação e o estabelecimento de sistemas observacionais costeiros eficientes, é fundamental a ação de redes de pesquisas integradas e interinstitucionais, bem como a aplicação de tecnologias modernas. Nessa perspectiva, foi estabelecido o Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta), financiado em 2012 pelo Fundo Nacional sobre Mudanças Climáticas (Fundo Clima do Ministério do Meio Ambiente - MMA) e projetado segundo os objetivos da Subrede Zonas Costeiras da Rede Brasileira de Mudanças Climáticas (REDE CLIMA) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para Mudanças Climáticas. O SiMCosta é um sistema observacional integrado, com metodologias avançadas e robustas, que visa ao monitoramento contínuo, automático e em tempo real de parâmetros meteorológicos e oceanográficos em diversos pontos da costa brasileira. Em médio e longo prazo, o sistema fornecerá informações ambientais mais precisas e robustas para os estudos oceanográficos, ecológicos e climáticos, permitindo, assim, avaliações sobre os impactos das mudanças climáticas e os riscos de eventos extremos em zonas costeiras brasileiras. Os dados meteorológicos e oceanográficos coletados pelo SiMCosta estão disponibilizados *on-line* e gratuitamente pela internet, através do sítio www.simcosta.furg.br.