

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**LUCAS SEGISMUNDO MOLESSANI**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE SENSORES  
REMOTOS PARA ESTIMATIVA DA CLOROFILA-A E COEFICIENTE DE  
ATENUAÇÃO DA LUZ NA ÁGUA NA RESERVA BIOLÓGICA MARINHA DO  
ARVOREDO (SC) E ENTORNO**

**FLORIANÓPOLIS, SC**

**2019**

**LUCAS SEGISMUNDO MOLESSANI**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ALGORITMOS DE SENSORES  
REMOTOS PARA ESTIMATIVA DA CLOROFILA-A E COEFICIENTE DE  
ATENUAÇÃO DA LUZ NA ÁGUA NA RESERVA BIOLÓGICA MARINHA DO  
ARVOREDO (SC) E ENTORNO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel, pelo Curso de Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Andrea Santarosa Freire

Co-orientadora: Dr<sup>a</sup>. Melissa Carvalho

**FLORIANÓPOLIS – SC**

**2019**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Molessani, Lucas Segismundo

Avaliação do desempenho de algoritmos de sensores remotos para estimativa da clorofila-a e coeficiente de atenuação da luz na água na Reserva biológica marinha do Arvoredo (SC) e entorno / Lucas Segismundo Molessani ; orientador, Andrea Santarosa Freire, coorientador, Melissa Carvalho, 2019.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Sensoriamento Remoto. 3. REBIO Arvoredo. 4. Clorofila-a. 5. Kd490. I. Freire, Andrea Santarosa. II. Carvalho, Melissa. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. IV. Título.

## Sumário

Sumário .....	4
Lista de Figuras .....	5
Lista de Equações .....	7
Lista de Tabelas .....	8
Lista de Siglas e Símbolos.....	9
Resumo .....	11
1. Introdução.....	12
2. Objetivo Geral.....	23
3. Objetivos Específicos.....	24
4. Materiais e Métodos .....	25
4.1. Área de estudo.....	25
4.2. Coleta e análise de dados <i>in situ</i> .....	26
4.3. Aquisição e processamento dos dados dos sensores MODIS e VIIRS .....	28
4.4. Avaliação do desempenho dos algoritmos globais de clorofila-a e coeficiente de atenuação da luz na água .....	29
5. Resultados.....	31
6. Discussão .....	41
7. Conclusão.....	47
8. Bibliografia.....	48

## Lista de Figuras

Figura 1.1- Níveis de reflectância para diferentes concentrações de clorofila-a (<0.1, 0.3, 0.6, 1.3 e 3.0 mg.L <sup>-1</sup> ). Fonte: CLARKE et al (1970). .....	16
Figura 1.2 - Fatores que influenciam a radiância emergente do corpo d'água detectada pelos sensores remotos: (a) retroespalhamento pelo material inorgânico em suspensão; (b) absorção pela matéria orgânica dissolvida; (c) retroespalhamento pelas moléculas de água; (d) reflexão de fundo; (e) restroespalhamento pelo fitoplâncton. Fonte: Adaptada de IOCCG (2000). .....	17
Figura 1.3 - Exemplo de imagem de concentração de clorofila-a para o dia 2 de agosto de 2014. ....	19
Figura 4.1 - (a) Localização do litoral de Santa Catarina no Brasil. (b) Localização da REBIO do Arvoredo no litoral de Santa Catarina. ....	26
Figura 4.2 - Mapa da área de estudo no entorno da REBIO do Arvoredo (polígono hachurado), e estações de coletas de dados <i>in situ</i> do projeto MAARÉ representadas pelos pontos vermelhos (estações completas) e azuis (estações simples). ....	27
Figura 4.3 - Fluxograma da aquisição de dados dos sensores e definição dos pares coincidentes. ....	30
Figura 5.1 - Histograma da distribuição da concentração de clorofila-a <i>in situ</i> (mg m <sup>-3</sup> ) das amostras superficiais que foram utilizadas neste trabalho para os intervalos de 24h e 12h. ....	33
Figura 5.2 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor MODIS para o intervalo de 24h. A banda 412 representa o violeta, as bandas 443, 469 e 488 representam o azul, as bandas 531, 547 e 555 representam o verde e o vermelho é representado pelas bandas 645, 667 e 678. N = 35. Cada linha corresponde a uma estação amostral. ....	34
Figura 5.3 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor VIIRS para o intervalo de 24h. A banda 410 representa o violeta, as bandas 443 e 486 representam o azul, a banda 551 representa o verde e o vermelho é representado pela banda 671. N = 35. Cada linha corresponde a uma estação amostral. ....	34
Figura 5.4 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor MODIS para o intervalo de 12h. A banda 412 representa o violeta, as bandas 443, 469 e 488 representam o azul, as bandas 531, 547 e 555 representam o verde e o vermelho é	

representado pelas bandas 645, 667 e 678. N = 26. Cada linha corresponde a uma estação amostral. ....	35
Figura 5.5 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor VIIRS para o intervalo de 12h. A banda 410 representa o violeta, as bandas 443 e 486 representam o azul, a banda 551 representa o verde e o vermelho é representado pela banda 671. N = 26. Cada linha corresponde a uma estação amostral.....	35
Figura 5.6 - Espectro eletromagnético da região visível com os comprimentos de onda (nm) correspondentes.....	35
Figura 5.7 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila- <i>a</i> estimada pelos sensores MODIS e VIIRS e a clorofila- <i>a</i> superficial medida <i>in situ</i> para o intervalo de 24h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 35). ....	36
Figura 5.8 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila- <i>a</i> estimada pelos sensores MODIS e VIIRS e a clorofila- <i>a</i> superficial medida <i>in situ</i> para o intervalo de 12h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 26). ....	37
Figura 5.9 - Dispersão e regressão linear entre o coeficiente de atenuação da luz na água estimado pelos sensores MODIS e VIIRS e o derivado de medidas <i>in situ</i> para o intervalo de 24h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 35). ....	38
Figura 5.10 - Dispersão e regressão linear entre o coeficiente de atenuação da luz na água estimado pelos sensores MODIS e VIIRS e o derivado de medidas <i>in situ</i> para o intervalo de 12h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 26). ....	38
Figura 5.11 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila- <i>a</i> superficial medida <i>in situ</i> e a razão máxima das bandas azuis (443, 469, 488) sobre as verdes (531, 547 e 555) para o sensor MODIS, e a razão máxima das bandas azuis (443 e 486) sobre a verde (550) do sensor VIIRS, para o intervalo de 24 h (N = 35).....	39
Figura 5.12 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila- <i>a</i> superficial medida <i>in situ</i> e a razão máxima das bandas azuis (443, 469, 488) sobre as verdes (531, 547 e 555) para o sensor MODIS, e a razão máxima das bandas azuis (443 e 486) sobre a verde (550) do sensor VIIRS, para o intervalo de 12 h (N = 26).....	39

## Lista de Equações

Equação 1 - Cálculo da reflectância a partir das medidas de radiância. ....	15
Equação 2 – Algoritmo OC3 para estimativa da concentração da clorofila- <i>a</i> ( $C_a$ ) a partir dos dados do sensor MODIS, onde R é a razão máxima entre as reflectâncias das bandas azul/verde em 443nm ou 488nm/547nm. ....	15
Equação 3 - Equação para cálculo do coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d490$ ) para o sensor MODIS.....	20
Equação 4 - Algoritmo OC3 para estimativa da concentração da clorofila- <i>a</i> ( $C_a$ ) partir dos dados do sensor VIIRS, onde R é a razão máxima entre as reflectâncias das bandas azul/verde em (443nm ou 486nm) /550nm .....	20
Equação 5 - Equação para cálculo do coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d490$ ) para o sensor VIIRS.....	21
Equação 6 - Equação utilizada para o cálculo da clorofila- <i>a in situ</i> . ....	28
Equação 7 – Cálculo do coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d$ ) em $m^{-1}$ : .....	28

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1- Comparativo descritivo entre os sensores MODIS e VIIRS, com o ano de lançamento, resolução espacial e radiométrica, e número de bandas espectrais. ....	18
Tabela 1.2 - Largura de bandas e relação sinal ruído das bandas dos sensores MODIS e VIIRS. ....	18
Tabela 5.1 - N amostral de todas as coletas <i>in situ</i> e dos dados pareados com as janelas temporais de 24 h e 12 h. ....	31
Tabela 5.2 – Médias, desvio padrão, mínimos e máximos do coeficiente de atenuação da luz na água e clorofila- <i>a</i> superficial obtidos <i>in situ</i> e estimados pelos sensores MODIS e VIIRS para o conjunto de dados obtido no intervalo de 24h (N = 35). ....	32
Tabela 5.3 – Médias, desvios padrão, mínimos e máximos do coeficiente de atenuação da luz na água e clorofila- <i>a</i> superficial obtidos <i>in situ</i> e estimados pelos sensores MODIS e VIIRS para o conjunto de dados obtido no intervalo de 12h (N = 26). ....	32
Tabela 5.4 - Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre a clorofila- <i>a</i> superficial medida <i>in situ</i> e a estimada pelos sensores MODIS e VIIRS para os intervalos de 24 h e 12h: número amostral (N), erro médio (EM), soma do quadrado dos erros (SQE), erro médio quadrado (EMQ), coeficiente angular da regressão (A), intercepto da regressão (B), coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação ( $r^2$ ). ....	36
Tabela 5.5 - Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre o coeficiente de atenuação medido <i>in situ</i> e o estimado pelos sensores MODIS e VIIRS para os intervalos de 24 h e 12h: número amostral (N), erro médio (EM), soma do quadrado dos erros (SQE), erro médio quadrado (EMQ), coeficiente angular da regressão (A), intercepto da regressão (B), coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação ( $r^2$ ). ....	37
Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre a clorofila <i>in situ</i> e as razões máximas para cada banda de reflectância do sensor MODIS para 12 h e 24 h: coeficientes de correlação (r) e coeficientes de determinação ( $r^2$ ). N para 24 h = 35 e N para 12 h = 26 .....	40
Tabela 5.7 – Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre a clorofila- <i>a</i> superficial <i>in situ</i> e as razões máximas com melhor desempenho para os sensores MODIS e VIIRS para os intervalos de 24 h e 12 h: número amostral (N), coeficiente angular da regressão (A), intercepto da regressão (B), coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação ( $r^2$ ). ....	40

## Lista de Siglas e Símbolos

ACAS - Água Central do Atlântico Sul

APP - Água da pluma do Rio da Prata

ASTP - Água Subtropical de Plataforma

AT - Água Tropical

Ca - Clorofila-a estimada pelo algoritmo

Cla - Clorofila calculada através do método espectrofotométrico

CZCS - Coastal Zone Color Scanner

e - absorbância do extrato de clorofila-a

EMQ - Erro médio quadrático

ESA - Agência Espacial Européia

HPLC - High Performance Liquid Chromatography

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IOCCG - International Ocean-Colour Coordinating Group

IVP - Infra-vermelho próximo

Kd - Coeficiente de atenuação da luz na água calculado através da medida de Secchi

Kd490 - Coeficiente de atenuação da luz na água estimado por algoritmos de sensores de satélite

$L_t$  - Radiância incidente

$L_w$  - Radiância refletida

MAArE - Monitoramento Ambiental da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e Entorno

MERIS - Medium Resolution Imaging Spectrometer

MODC - Matéria orgânica dissolvida colorida

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

N - Número de amostras

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NOAA - Administração Nacional Oceânica e Atmosférica

OC3M - algoritmo global para estimativa de clorofila-a do sensor MODIS

OC3V - algoritmo global para estimativa de clorofila-a do sensor VIIRS

PCSE - Plataforma Continental Sudeste

r - Coeficiente de correlação

$r^2$  - Coeficiente de determinação

REBIO - Reserva Biológica

Rrs - Reflectância de sensoriamento remoto

SeaWiFS - Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor

Suomi NPP - Suomi National Polar-Orbiting Partnership

VIIRS - Visible and Infrared Imager/Radiometer Suite

Zeus - Profundidade da Zona Eufótica

## Resumo

A oceanografia por satélites tem avançado bastante nas últimas décadas, e sua grande vantagem é a possibilidade de monitorar mudanças temporais que ocorrem na superfície do oceano com uma abrangência espacial muito maior do que as amostragens tradicionais feitas em cruzeiros oceanográficos. Entre os parâmetros possíveis de se monitorar através de imagens obtidas por sensores remotos está a concentração de clorofila-*a*, de grande interesse em estudos relacionados à produção primária marinha e ecologia de comunidades marinhas. Os algoritmos globais disponíveis para a estimativa de clorofila-*a* são obtidos a partir de uma grande quantidade de dados *in situ*, num amplo intervalo de concentrações, e em diversas regiões do globo, de forma que, muitas vezes, não apresentam boa acurácia em estudos regionais, sendo assim necessários ajustes ou desenvolvimento de algoritmos regionais específicos para cada região. O mesmo ocorre para outro parâmetro, o coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d490$ ), que é um indicador para a profundidade de penetração da luz na água e conseqüentemente a quantidade de luz disponível para a fotossíntese, e pode ser correlacionado à medida de disco de Secchi, tão comumente utilizada. Em ambos os casos é necessário correlacionar dados obtidos *in situ* através de cruzeiros oceanográficos com os dados obtidos a partir das imagens de satélite adquiridas nos mesmos dias e na mesma localização. Na região estudada temos uma grande influência de águas continentais, ricas em material em suspensão e matéria orgânica dissolvida, que são componentes opticamente ativos na água que contribuem para a resposta espectral da água medida pelos sensores e podem diminuir a acurácia dos algoritmos. Utilizando os algoritmos padrão dos sensores MODIS e VIIRS para estimativa de clorofila-*a* (OC3M e OC3V) e para o coeficiente de atenuação da luz na região da REBIO marinha do Arvoredo com as janelas temporais de 24 h e 12 h, foi encontrado para o sensor MODIS um  $r^2$  igual a 0,48 e 0,58, respectivamente, para a clorofila-*a*, e igual a 0,45 e 0,56, respectivamente, para o coeficiente de atenuação da luz na água. Com as janelas temporais de 24 h e 12 h para o sensor VIIRS, foi encontrado um  $r^2$  igual a 0,58 e 0,65, respectivamente, para a clorofila-*a*, e igual a 0,58 e 0,80, respectivamente, para o coeficiente de atenuação da luz na água. O sensor VIIRS mostrou um melhor desempenho em relação ao MODIS, constituindo uma boa ferramenta para o monitoramento destes parâmetros do ecossistema na qual a REBIO do Arvoredo está inserida.

## 1. Introdução

O fitoplâncton é composto por organismos microscópicos autotróficos sem capacidade de natação, ou seja, estão à deriva em uma determinada massa de água. São organismos muito importantes para o ciclo de matéria orgânica nos oceanos, pois absorvem o dióxido de carbono e o transformam em glicose através da fotossíntese (KWAITKOWSKA & FARGION, 2002). O fitoplâncton é a base da cadeia alimentar marinha, responsável pela produção de aproximadamente 90% dos carboidratos da cadeia alimentar oceânica (GARRISON, 2010), e é encontrado apenas na camada superficial da água onde existe luz necessária para a realização da fotossíntese.

Para realizar a fotossíntese, os organismos precisam de pigmentos específicos para absorver a luz, e o único pigmento comum a todos os organismos fotossintetizantes é a clorofila-*a* (LALLI & PARSONS, 1993).

As propriedades óticas únicas da clorofila-*a* foram utilizadas por Jeffrey e Humphrey em 1975 para desenvolver o método de detecção por espectrofotometria, e por Holm-Hansen et al. em 1965 para desenvolver técnicas de medição fluorimétrica. Com a disponibilidade e facilidade de realizar medições de rotina da clorofila-*a* com fluorômetros, esse pigmento se tornou um parâmetro universal para estimar a biomassa e a produtividade do fitoplâncton. Entretanto, estes métodos podem ser menos acurados na quantificação da clorofila-*a* devido à sobreposição das bandas de absorção e fluorescência das clorofilas co-ocorrentes *b* e *c*, e produtos de degradação da clorofila e pigmentos acessórios (MUELLER et al., 2003).

Atualmente o método mais recomendado para a quantificação da clorofila-*a* e outros pigmentos do fitoplâncton é o HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*). O método HPLC permite a quantificação exata da clorofila-*a*, feopigmentos e demais pigmentos acessórios por meio da cromatografia. Apesar disso, o método HPLC tem um custo elevado e atualmente no Brasil é restrito a poucos laboratórios.

O método fluorimétrico mede a fluorescência de uma amostra de água emitindo um feixe de luz no comprimento de 460 nm, e lendo a resposta da amostra em 670 nm. Isto ocorre porque a clorofila-*a* absorve a energia nesta região do espectro eletromagnético (~460 nm) e emite de volta em um comprimento de onda maior (~670 nm), esse fenômeno é chamado de fluorescência (BARROSO, 1998).

As vantagens do método fluorimétrico são um limite de detecção melhor em relação ao espectrofotométrico (em torno de 0.01µg), menor volume de água necessário para a amostra (1 l ou menos contra 5 a 10 l para o espectrofotométrico), porém o método fluorimétrico tem um erro 20% maior em relação ao espectrofotométrico por causa da influência de pigmentos acessórios (como a clorofila-c) que podem fluorescer junto com a clorofila-a. (HOLM-HANSEN et al., 1965).

O método espectrofotométrico é largamente utilizado por necessitar de equipamentos mais baratos, solventes diversos (acetona, metanol, etanol, entre outros) e procedimentos simples. Este método foi utilizado neste trabalho e será detalhado mais adiante, mas basicamente consiste na leitura da absorção da luz pelo extrato da clorofila-a em comprimentos de onda específicos utilizando um espectrofotômetro, e os valores de absorbâncias são relacionados em uma equação para determinação da concentração de clorofila-a.

Nas últimas décadas, os dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados para a estimativa de diversos parâmetros oceanográficos, como correntes, temperatura e cor do oceano (KLEMAS, 2012, BAILEY & WERDELL, 2006). Dentre eles, os dados de cor do oceano são utilizados para a estimativa de pigmentos fotossintéticos, principalmente a clorofila-a, que auxilia nos estudos da biomassa fitoplanctônica e suas variações no tempo e espaço (BENRENFELD & FALKOWSKI, 1997).

Outro parâmetro de grande interesse que pode ser estimado por sensores remotos à bordo de satélites é o coeficiente de atenuação da luz na coluna d'água, que pode ser utilizado para calcular a profundidade da zona eufótica, a disponibilidade de luz para a fotossíntese, medição de qualidade da água, e também é de grande interesse para operações de geração de imagens como fotografias e vídeos subaquáticos (AUSTIN & PETZOLD, 1981).

O coeficiente de atenuação da luz na água é uma propriedade ótica dependente de duas outras propriedades óticas inerentes da água, a absorção e espalhamento da luz, que são modificados de acordo com a presença de alguns componentes óticamente ativos além da própria água, como por exemplo, o fitoplâncton, material em suspensão orgânico e inorgânico e a matéria orgânica dissolvida colorida (IOCCG, 2006). Quanto menor o coeficiente de atenuação, maior é

a profundidade de penetração da luz na água, e com isso a disponibilidade de luz para a produção primária é maior.

Uma das formas de estimar o coeficiente de atenuação da luz *in situ* é através da medida da profundidade do disco de Secchi, que é a medida da profundidade em que um disco, geralmente branco, deixa de ser observado a olho nu. A grande vantagem de se usar o disco de Secchi é o seu baixo custo, fácil operação e uso universal, o que permite comparações entre as informações obtidas (CALAZANS, 2011). Outra forma de estimar o coeficiente de atenuação da luz na água é utilizando equipamentos óticos como radiômetros ou espectroradiômetros, a medida obtida por estes sensores é bem similar as medidas pelos satélites, que será detalhada adiante, com a diferença de serem equipamentos que realizam as medidas num ponto específico *in situ*.

As medições de dados oceanográficos por sensoriamento remoto, principalmente utilizando sensores a bordo de satélites, têm evoluído nos últimos anos, tanto em relação à cobertura sinótica e temporal, quanto no fornecimento de dados quase instantâneos, o que não é possível de se obter utilizando os métodos tradicionais de coleta de dados, através de expedições embarcadas ou instrumentos ancorados (BAILEY & WERDELL, 2006; DOGLIOTTI et al., 2009).

O primeiro sensor de cor do oceano desenvolvido e lançado a bordo de um satélite foi o CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) em 1978, seguido pelo SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*), que ficou em operação de 1997 a 2010. Após estes, foram lançados sensores com melhor resolução espacial, espectral e temporal, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), à bordo das plataformas Aqua e Terra, o VIIRS (*Visible and Infrared Imager/Radiometer Suite*) à bordo da plataforma *Suomi National Polar-Orbiting Partnership (Suomi NPP)*, ambos lançados e operados pela NASA (NASA, 2019a), e o MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*), à bordo do ENVISAT, lançado e operado da Agência Espacial Européia (ESA, 2019).

Embora a vida útil projetada para o sensor MODIS tenha sido de seis anos, ele continua transmitindo dados e espera-se que dure além de 2020. Ainda assim, para garantir uma série temporal contínua, a NASA se uniu à Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) para fornecer dados da nave espacial *Suomi National*

*Polar-orbiting Partnership* (NPP). Lançado em 2011, o NPP carrega o substituto do MODIS: o *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) (NSIDC, 2019).

Para estimar a concentração de clorofila-*a* nos oceanos por sensoriamento remoto, os sensores captam medidas de radiância em diversas bandas do espectro eletromagnético e utilizam a razão entre a radiância refletida pelo oceano ( $L_w$ ) e a radiância incidente calculada ( $L_t$ ) gerando a medida de reflectância (Equação 1). Os algoritmos de cor do oceano de modo geral utilizam as medidas de reflectância na região do visível do espectro eletromagnético (entre 400 nm e 700 nm), mais especificamente na região do azul e verde. De modo geral, quanto maior a concentração de clorofila-*a*, menor a reflectância na região do azul do espectro eletromagnético, enquanto pouca variação ocorre na região do verde (Figura 1.1). Essa variação nos valores de reflectância espectral está associada às propriedades de absorção e retroespalhamento do fitoplâncton marinho. Os algoritmos empíricos para estimativa de clorofila-*a* por sensoriamento remoto, como o OC3 do sensor MODIS (Equação 2) por exemplo, utilizam razões ou diferenças entre as reflectâncias ( $R_{rs}$ ) nestas regiões do espectro eletromagnético (O'REILLY et al., 2000).

Equação 1 - Cálculo da reflectância a partir das medidas de radiância, onde  $L_w$  é a radiância refletida e  $L_t$  é a radiância incidente.

$$R_{rs} = \frac{L_w}{L_t}$$

Equação 2 – Algoritmo OC3 para estimativa da concentração da clorofila-*a* ( $C_a$ ) a partir dos dados do sensor MODIS, onde  $R$  é a razão máxima entre as reflectâncias das bandas azul/verde em 443nm ou 488nm/547nm.

$$C_a = 10.0^{(0.2424 - 2.7423R + 1.8017R^2 + 0.0015R^3 - 1.2280R^4)}$$

Onde  $R$  é:

$$R = \frac{R_{rs} \max(443 > 488)}{R_{rs} 547}$$

A razão da reflectância no azul/verde é normalmente utilizada, pois o aumento e diminuição na reflectância das faixas espectrais do azul e verde, respectivamente,

conduzem a uma menor concentração de clorofila-*a*. Desta forma, como mostra a Figura 1.1, haverá uma relação inversa entre a concentração de clorofila-*a* e a razão azul/verde da reflectância, ou seja, quanto menor a concentração de clorofila maior a razão (O'REILLY et al., 1998).

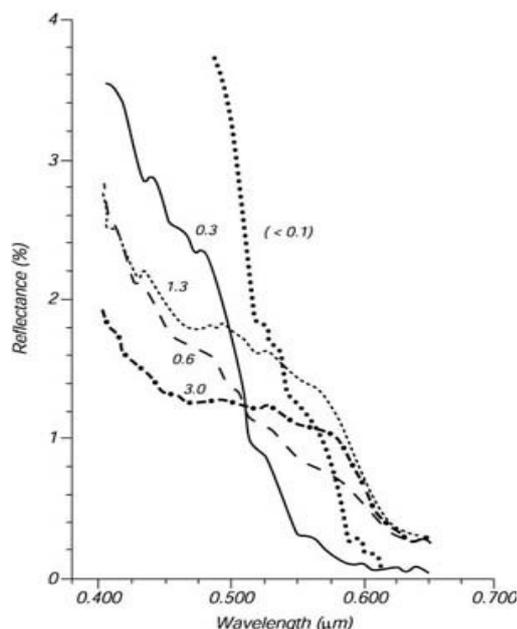


Figura 1.1- Níveis de reflectância para diferentes concentrações de clorofila-*a* (<math>< 0.1</math>, 0.3, 0.6, 1.3 e 3.0  $\text{mg.L}^{-1}$ ). Fonte: CLARKE et al (1970).

Nas últimas décadas é crescente o estudo da abundância e distribuição da clorofila-*a* nos oceanos, por esta ser um indicador da biomassa fitoplanctônica, porém, em águas costeiras, as medidas de clorofila-*a* tendem a um maior erro, devido ao material em suspensão dissolvido e particulado oriundos de descarga continental e ressuspensão de material do fundo (GARCIA & GARCIA, 2008, DARECKI & STRAMSKY, 2004).

Desta forma, é necessário considerar que além do fitoplâncton, podemos encontrar também outros componentes opticamente ativos na água, que absorvem e/ou espalham a luz em diferentes comprimentos de onda, e assim interferem na radiância total da água medida pelo sensor a bordo do satélite. Como podemos ver na Figura 1.2, a luz do sol que penetra na coluna d'água pode ser absorvida ou espalhada pelas moléculas de água e pelos materiais dissolvidos ou particulados em suspensão na água, além de, em locais rasos, ser refletida pelo fundo. Assim, a radiância medida pelo sensor é a resposta da água com todos seus componentes opticamente ativos, além da clorofila. Desta forma, quanto maior a concentração dos demais componentes opticamente ativos na água, menor tende a ser a acurácia das

estimativas de clorofila-a a partir de dados de sensores remotos a bordo de satélites (IOCCG, 2000). Neste sentido, avaliações regionais são importantes para verificar a aplicabilidade destes algoritmos em uma determinada região e efetuar as adaptações necessárias.

Uma classificação iniciada por Morel & Prieur (1977) e aprimorada por Gordon & Morel (1983), separa as águas em Caso 1 e Caso 2, onde o Caso 1 representa uma água cujo componente óptico principal é o fitoplâncton, já as águas de Caso 2 representam as águas com outros componentes opticamente ativos como material em suspensão, matéria orgânica dissolvida e efeitos do fundo oceânico, que por ser mais raso em regiões costeiras, pode influenciar na resposta ótica da água. Por isso as águas de Caso 2, assim como as águas costeiras, não respondem bem aos algoritmos globais e necessitam do desenvolvimento de algoritmos regionais onde o comportamento ótico regional da água pode ser levado em consideração (IOCCG, 2000).

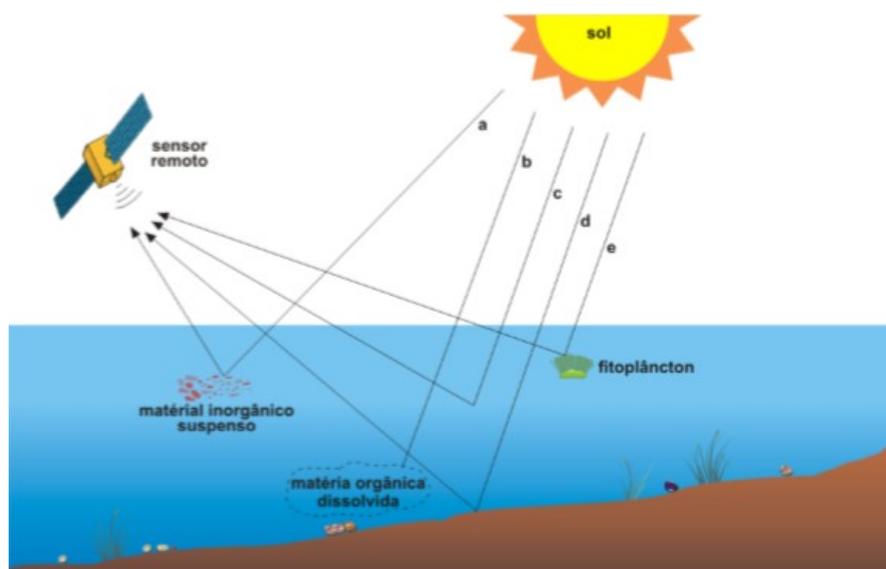


Figura 1.2 - Fatores que influenciam a radiação emergente do corpo d'água detectada pelos sensores remotos: (a) retroespalhamento pelo material inorgânico em suspensão; (b) absorção pela matéria orgânica dissolvida; (c) retroespalhamento pelas moléculas de água; (d) reflexão de fundo; (e) retroespalhamento pelo fitoplâncton. Fonte: Adaptada de IOCCG (2000)

Além dos demais componentes opticamente ativos presentes na água, outros fatores que podem prejudicar as medidas são fatores de calibração do próprio sensor e interferência atmosférica, principalmente presença de nuvens (DOGLIOTTI et al., 2009).

Para se obter um algoritmo tanto global quanto regional para a estimativa de clorofila-a a partir de dados de satélite, são necessários inicialmente dados coletados

*in situ* da reflectância espectral e da concentração de clorofila-*a*. Após definido o algoritmo a partir de dados *in situ*, o mesmo é aplicado aos valores da reflectância espectral obtida pelos sensores a bordo de satélite. Para avaliação da acurácia dos algoritmos, é possível utilizar somente os dados de clorofila-*a* obtidos *in situ* e os obtidos nas imagens de satélite. A NASA fornece gratuitamente imagens de satélite diárias obtidas por diferentes sensores, entre eles o MODIS, a bordo do satélite AQUA, que adquire dados em 9 bandas de radiância na faixa do visível e infravermelho próximo, e o VIIRS, a bordo do Suomi NPP, que adquire imagens em 7 bandas de radiância na faixa do visível e infravermelho próximo também. Uma comparação mais detalhada entre os dois sensores pode ser feita através das Tabela 1.1 e Tabela 1.2. Para ambos, as imagens podem ser obtidas desde brutas (nível 0 - L0), até em níveis mais avançados de processamento. As imagens nível 2 (L2), já passaram por diversas etapas de processamento, que envolvem desde correções radiométricas até o cálculo de variáveis biogeofísicas, entre elas a concentração superficial de clorofila-*a* obtida a partir do algoritmo global padrão, o OC3 (O'REILLY et al., 2000), e o coeficiente de atenuação da luz na água (Kd490), além dos valores de reflectância de sensoriamento remoto ( $R_{rs}$ )

	<b>MODIS</b>	<b>VIIRS</b>
<b>Ano de lançamento</b>	2002	2011
<b>Resolução espacial (m)</b>	1000	750
<b>Número de bandas</b>	36	22
<b>Resolução radiométrica (bits)</b>	12	12

Tabela 1.1- Comparativo descritivo entre os sensores MODIS e VIIRS, com o ano de lançamento, resolução espacial e radiométrica, e número de bandas espectrais.

<b>MODIS</b>		<b>VIIRS</b>	
<b>Largura de banda</b>	<b>Relação sinal ruído (SNR)</b>	<b>Largura de banda</b>	<b>Relação sinal ruído (SNR)</b>
405 - 420	880	402 - 422	352
438 - 448	838	436 - 454	380
483 - 493	802	478 - 498	416
526 - 536	754	545 - 565	362
546 - 556	750	662 - 682	242
662 - 672	910	738 - 753	199
673 - 683	1087	845 - 884	215
743 - 753	586		
862 - 877	516		

Tabela 1.2 - Largura de bandas e relação sinal ruído das bandas dos sensores MODIS e VIIRS.

O coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d$ ) pode ser usado para estimar a profundidade da zona eufótica (Zeu) que por sua vez é uma estimativa da profundidade que chega 1% da luz incidente na superfície, necessária para a fotossíntese dos produtores primários. Essa profundidade está relacionada diretamente à concentração de material em suspensão ou dissolvido na água, tanto inorgânico quanto orgânico, que são responsáveis por atenuar a luz ao longo da coluna d'água, devido suas propriedades de absorção e espalhamento da luz. A produtividade primária é maior próximo da costa devido ao aporte de nutrientes do continente ou ressurgências, porém a Zeu tende a ser mais rasa. Já em regiões mais oceânicas, a Zeu é maior, mas tende a haver uma menor concentração de nutrientes para elevar a produção primária (BEGON et al., 2006).

### Concentração média de clorofila-a ( $\text{mg m}^{-3}$ ) - 217 2014

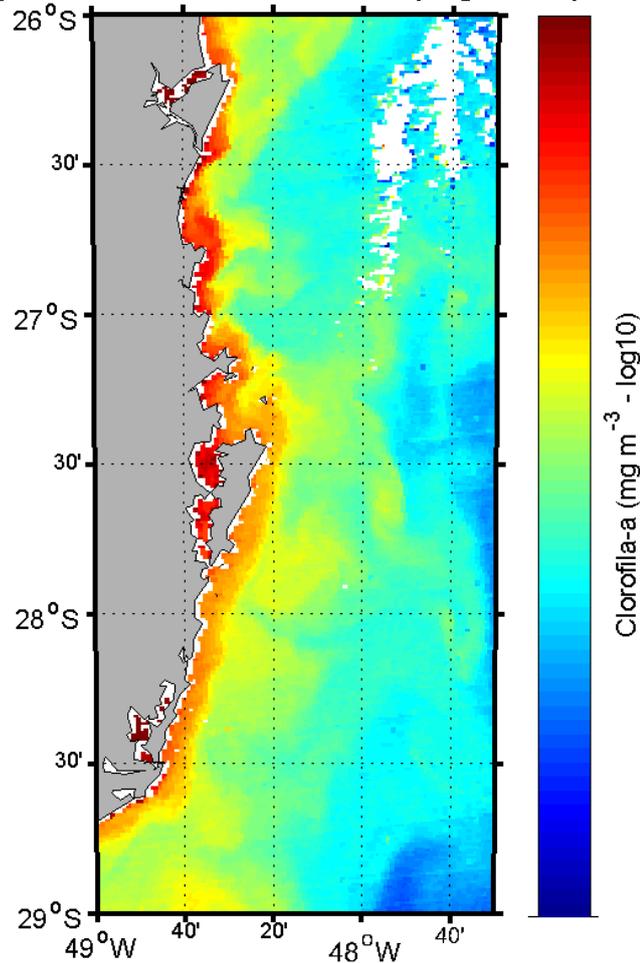


Figura 1.3 - Imagem de concentração de clorofila-a para o dia 2 de agosto de 2014 no litoral de Santa Catarina.

Para a determinação do coeficiente de atenuação da água *in situ* é comumente utilizado o disco de Secchi (CALAZANS, 2011). Já para a determinação do coeficiente de atenuação da água por imagem de satélite, é usada uma equação semelhante à da clorofila-*a*, utilizando a  $R_{rs}$  em 490nm, que é correspondente ao comprimento de onda que mais penetra na água. Para o sensor MODIS, por exemplo, é usada a Equação 3.

Equação 3 - Equação para cálculo do coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d490$ ) para o sensor MODIS.

$$K_d490 = 10.0^{(-0.8813 - 2.0584X + 2.5878X^2 - 3.4885X^3 - 1.5061X^4)} + 0.0166$$

Onde X é a razão das reflectâncias ( $R_{rs}$ ) nas bandas azul/verde dado por:

$$X = \frac{R_{rs488}}{R_{rs547}}$$

Para os dados do sensor VIIRS, as imagens de concentração de clorofila-*a* (nível 2) são obtidas com o mesmo algoritmo global padrão do MODIS, o OC3, mas com algumas modificações (Equação 4) de acordo com as bandas específicas deste sensor (Tabela 1.2), e dos coeficientes, obtidos especificamente para os dados deste sensor. Uma vantagem do sensor VIIRS em relação ao MODIS é a resolução espacial de 750 m, enquanto as imagens do sensor MODIS apresentam 1 km de resolução espacial (Tabela 1.1).

Equação 4 - Algoritmo OC3 para estimativa da concentração da clorofila-*a* ( $C_a$ ) partir dos dados do sensor VIIRS, onde R é a razão máxima entre as reflectâncias das bandas azul/verde em (443nm ou 486nm) /550nm

$$C_a = 10.0^{(0.2228 - 2.4683R + 1.5867R^2 - 0.4275R^3 - 0.7768R^4)}$$

Onde R é:

$$R = \frac{R_{rs\max(443 > 486)}}{R_{rs550}}$$

Assim como o cálculo da clorofila-a muda em relação ao sensor MODIS, o cálculo do Kd490 também é adaptado para o sensor VIIRS (Equação 5) (NASA, 2019).

Equação 5 - Equação para cálculo do coeficiente de atenuação da luz na água (Kd490) para o sensor VIIRS.

$$K_d490 = 10.0^{(-0.8730 - 1.8912X + 1.8021 X^2 - 2.3865X^3 - 1.0453X^4)} + 0.0166$$

Onde X é a razão das reflectâncias ( $R_{rs}$ ) nas bandas azul/verde dado por:

$$X = \frac{R_{rs490}}{R_{rs550}}$$

É importante também lembrar que os sensores remotos na faixa visível do espectro eletromagnético coletam apenas dados superficiais do oceano e não substituem as medidas *in situ*, estas devem ser feitas regularmente para constante validação dos algoritmos.

No Brasil existem reservas marinhas em locais onde a preservação da biodiversidade é essencial, inclusive para algumas atividades econômicas como a pesca e turismo ecológico na região entorno destas reservas. Dentre estas reservas está a Reserva Biológica Marinha do Arvoredo (REBIO Marinha do Arvoredo) localizada no litoral catarinense, ao norte da Ilha de Santa Catarina. Como em todas as reservas, é de suma importância para o órgão gestor saber sobre a eficácia da unidade de conservação, para tanto, é necessário conhecer também o entorno dessas regiões para entender os processos que ali ocorrem, sua variabilidade, e implicações para o ambiente protegido.

Segundo o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), a REBIO Marinha do Arvoredo atua na preservação de 22 espécies ameaçadas. A produção primária do fitoplâncton constitui a base da cadeia trófica marinha, e desta forma seu monitoramento dentro da reserva e entorno é de grande importância para as medidas de proteção deste ecossistema.

Este trabalho tem foco na avaliação do desempenho de algoritmos globais para estimar e mapear a biomassa fitoplancônica, assim como o coeficiente de atenuação

da luz na água, através de imagens de satélites, na região da REBIO Arvoredo. Os dados *in situ* utilizados foram obtidos durante as campanhas oceanográficas do projeto Monitoramento Ambiental da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e Entorno (MAArE), executado por pesquisadores da UFSC entre 2014 e 2016. O projeto foi resultado de uma condicionante indicada pelo ICMBio no processo de licenciamento ambiental das atividades da Petrobras nos campos petrolíferos de Baúna e Piracaba, na porção sul da Bacia de Santos, localizada na plataforma continental sudeste do Brasil.

## **2. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de algoritmos globais dos sensores MODIS e VIIRS para o monitoramento da biomassa fitoplanctônica e do coeficiente de atenuação da luz na água na região da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo.

### 3. Objetivos Específicos

- Comparar o desempenho da estimativa de clorofila-*a* pelos sensores MODIS e VIIRS.
- Comparar o desempenho da estimativa do coeficiente de atenuação da luz na água pelos sensores MODIS e VIIRS.
- Analisar as relações entre as razões de bandas azul/verde dos sensores VIIRS e MODIS e a concentração de clorofila-*a in situ*.

## **4. Materiais e Métodos**

### **4.1. Área de estudo**

A plataforma continental catarinense se encontra na porção sudoeste do Oceano Atlântico (Figura 4.1a) dentro da Plataforma Continental Sudeste (PCSE) que tem como seu limite sul o Cabo de Santa Marta (SC), e seu limite norte Cabo Frio (RJ) (CASTRO et al, 2006). Além de ser a maior região pesqueira do Brasil, é considerada um ambiente de transição entre os climas tropical e temperado. A Água Tropical (AT) é a massa d'água predominante na região, sendo que no verão, os ventos de nordeste favorecem a intrusão das águas frias e ricas em nutrientes da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) formando, eventualmente, uma região de ressurgência próxima ao Cabo de Santa Marta. Durante o inverno a região sofre influência de ventos sul/sudeste que trazem uma mistura de Água da Pluma do rio da Prata (APP) com a pluma estuarina da Lagoa dos Patos, que trazem nutrientes e material em suspensão e podem se misturar com a AT formando a Água Subtropical de Plataforma (ASTP) (FREIRE et al. 2017). A região da REBIO Arvoredo ainda é influenciada pelo aporte de água doce do Rio Tijucas e água salobra do Canal da Ilha de Santa Catarina especialmente em épocas de muita chuva (MENEZES et al., 2019; BORDIN et al., 2019)

A área de estudo (Figura 4.1b) está localizada na plataforma continental catarinense, ao norte da Ilha de Santa Catarina, entre as latitudes 27,4°S e 27,1°S, e longitudes 48,6°O e 48,2°O, no entorno do Arquipélago do Arvoredo, o qual compreende a Ilha do Arvoredo, Ilha das Galés, Ilha Deserta e Calhau de São Pedro.

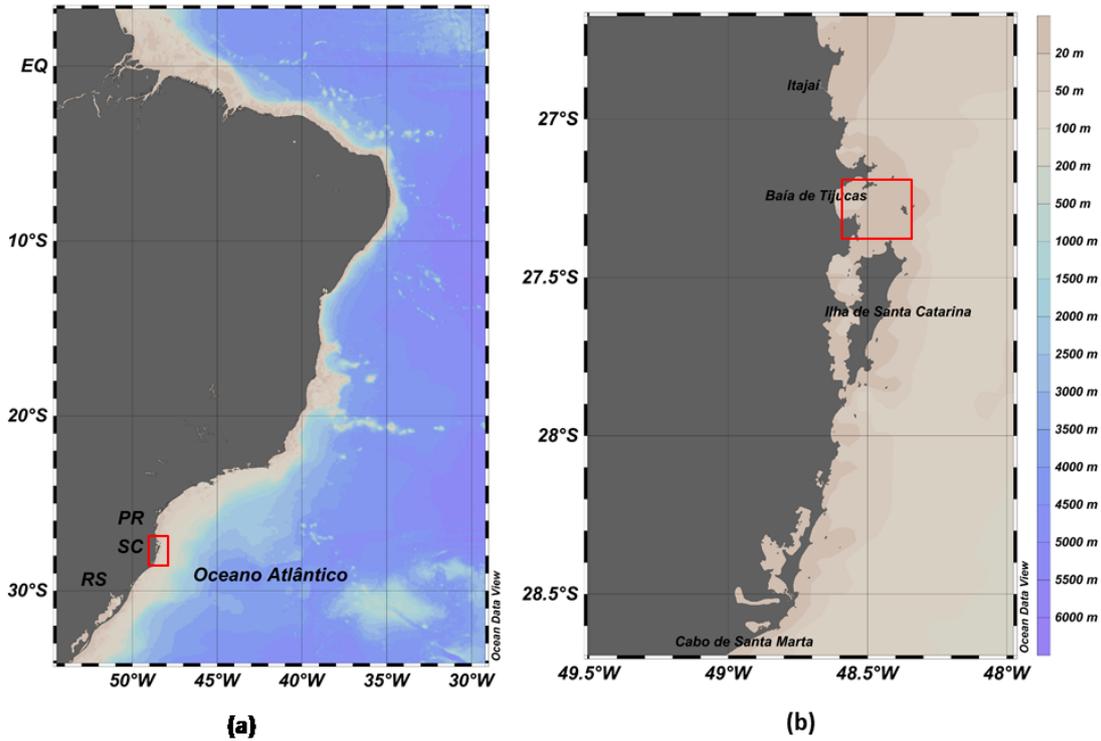


Figura 4.1 - (a) Localização do litoral de Santa Catarina no Brasil. (b) Localização da REBIO do Arvoredo no litoral de Santa Catarina.

#### 4.2. Coleta e análise de dados *in situ*

Para obtenção das concentrações de clorofila-a e Zeu, foram feitas coletas de amostras de água e medidas da profundidade do Disco de Secchi em 6 campanhas entre abril de 2014 e 2016, em cada verão e inverno, em 12 estações amostrais completas, conforme Figura 4.2 (pontos em vermelho). Cada campanha foi feita em 3 dias consecutivos, quando possível, devido à distância entre as estações e o tempo de permanência em cada uma para a realização de todos os procedimentos a bordo.

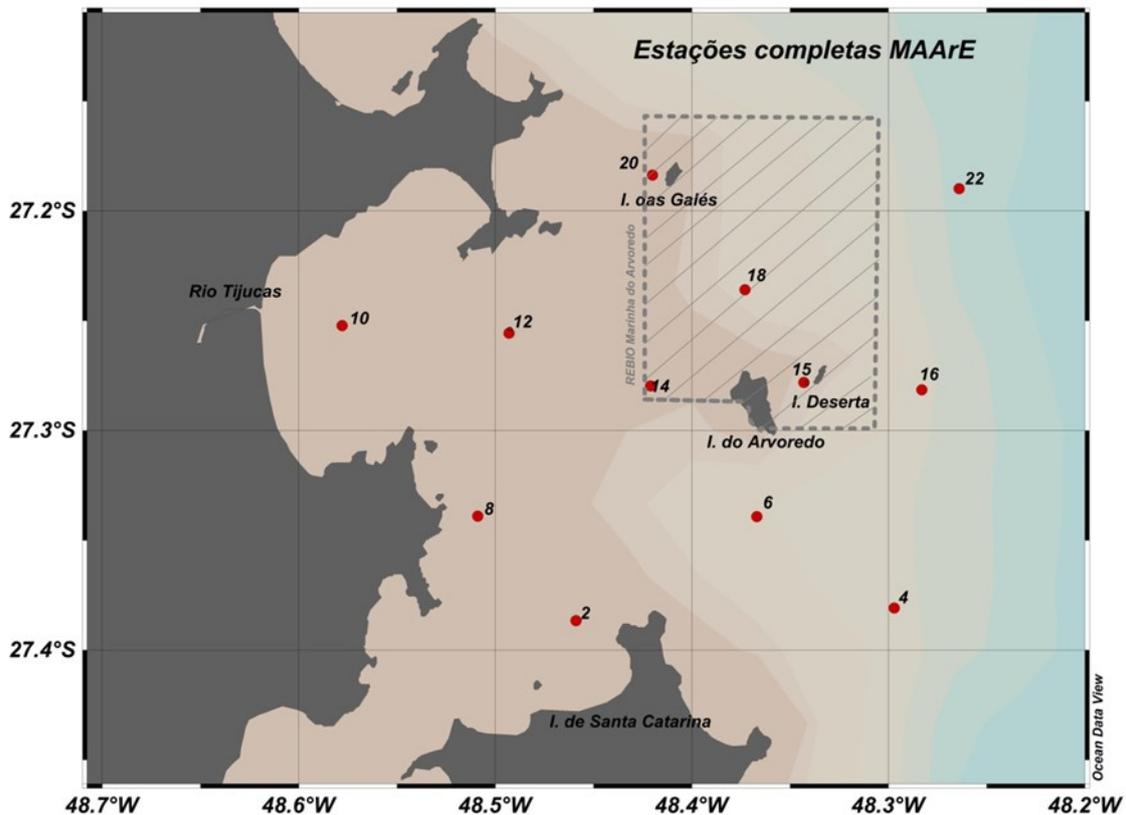


Figura 4.2 - Mapa da área de estudo no entorno da REBIO do Arvoredo (polígono hachurado), e estações de coletas de dados *in situ* do projeto MAArE representadas pelos pontos vermelhos (estações completas) e azuis (estações simples).

Para determinação da concentração de clorofila-a, foram feitas coletas de água nas 12 estações oceanográficas, em três profundidades (superfície, base da camada de mistura e fundo), utilizando garrafas de Van Dorn seguindo a metodologia descrita em SCOR/UNESCO (1966). Em seguida, as amostras de água foram armazenadas em garrafas térmicas de 5 litros e filtradas imediatamente a bordo, utilizando filtros de fibra de vidro com 47 mm de diâmetro e 0,45  $\mu\text{m}$  de poro sob pressão negativa máxima de 0,5 atm. Para cada amostra foi filtrado cerca de 2 litros de água, ou até saturar o filtro. Neste trabalho, para comparação com os dados obtidos de satélite, serão utilizadas apenas as amostras coletadas na superfície.

Os filtros para determinação de clorofila-a foram acondicionados em tubos criogênicos e armazenados em nitrogênio líquido para congelamento instantâneo e conservação da amostra. Em laboratório, as amostras foram transferidas para um freezer e mantidas no escuro até o momento da análise.

Em laboratório, a clorofila foi determinada através do método espectrofotométrico. A extração de pigmentos retidos no filtro foi feita em tubos

cilíndricos com 12ml de acetona 90%. O filtro foi macerado para facilitar o contato da acetona com as células fitoplanctônicas, e os tubos foram armazenados em local escuro e refrigerados por no mínimo 18 horas. Após esse período as amostras foram centrifugadas a 2000 rpm por 15 minutos e em seguida a leitura das absorvâncias dos extratos foi feita em um espectrofotômetro, nas bandas 480 nm, 510 nm, 630 nm, 645 nm e 665 nm, utilizando cubetas de 5 cm de caminho ótico. As concentrações de clorofila-a (Cla) foram determinadas através da equação SCOR/UNESCO (1966) (Equação 6). Em cada absorvância ( $e$ ) das bandas utilizadas na equação, foi subtraída a absorvância em 750nm. Utilizamos ainda o volume utilizado da acetona e o caminho ótico da cubeta.

Equação 6 - Equação utilizada para o cálculo da clorofila-a *in situ*.

$$Cla = (11.54e_{665} - 2.16e_{645} - 0.1e_{480}) \times \left( \frac{12ml}{5 \text{ cm} \times \text{Volume filtrado na amostra}} \right)$$

A determinação do coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d$ ) *in situ*, foi feita a partir da medida da profundidade do disco de Secchi, de acordo com a Equação 7.

Equação 7 – Cálculo do coeficiente de atenuação da luz na água ( $K_d$ ) em  $m^{-1}$ :

$$K_d(m^{-1}) = \frac{1,7}{Prof. Secchi(m)}$$

#### 4.3. Aquisição e processamento dos dados dos sensores MODIS e VIIRS

As imagens nível 2, com 1 km de resolução espacial, do sensor MODIS, e nível 2 com 750 m de resolução espacial do sensor VIIRS, relativas aos dias de amostragem *in situ*, em uma janela temporal de até 24 horas antes e 24 horas após a coleta, foram adquiridas gratuitamente através da *homepage* da NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/>). As imagens foram recortadas para a área de interesse e ajustadas ao sistema de projeção geográfica *Transversa de Mercator*, utilizando o software *Seadas*, também fornecido pela NASA para o processamento de imagens de cor do oceano.

As imagens projetadas foram então processadas no programa MATLAB, onde foram extraídos os valores de reflectância, concentrações de clorofila-a obtidas pelo algoritmo padrão OC3/MODIS e OC3/VIIRS, e o coeficiente de atenuação da luz

(Kd490/ MODIS e Kd490/VIIRS) dos pixels que correspondem às coordenadas das estações onde foram coletados os dados *in situ*. Para obter estes valores foram utilizadas as médias entre os pixels de uma janela de 3 x 3 pixels em torno da coordenada da estação oceanográfica.

Para definir os pares coincidentes entre dados de clorofila-*a* e coeficiente de atenuação da luz *in situ* e os obtidos pelos sensores remotos, foram utilizadas duas janelas temporais (12 h e 24 h). Além desse critério, foram excluídas as amostras onde a janela de pixels (3 x 3 pixels) teve um desvio padrão maior que 0,3, o que tipicamente representa bordas de nuvens e regiões com sistemas frontais que causam ruído e deixam a avaliação do algoritmo prejudicada. Segundo Bailey & Werdell (2006), o valor recomendado para esse corte é de 0,15, porém neste trabalho o número de pares coincidentes seria muito baixo e o critério foi relaxado para 0,3.

Para a construção dos espectros de reflectância, foram extraídos os valores de reflectância ( $R_{rs}(sr^{-1})$ ) de todas as bandas da região do visível do espectro eletromagnético disponíveis para cada sensor (421 nm, 443 nm, 469 nm, 488 nm, 531 nm, 547 nm, 555 nm, 645 nm, 667 nm e 678 nm do MODIS e 410 nm, 443 nm, 486 nm, 551 nm e 671 nm do VIIRS), utilizando os mesmos critérios anteriores, adotados para a extração dos valores de clorofila-*a* e Kd490.

Com os espectros dos pontos amostrais é possível inferir algumas características de comportamento ótico da água da região, o que pode auxiliar numa melhor compreensão dos resultados.

#### **4.4. Avaliação do desempenho dos algoritmos globais de clorofila-*a* e coeficiente de atenuação da luz na água**

Para a avaliação do desempenho dos algoritmos de estimativa de clorofila-*a* e coeficiente de atenuação da água em 490 nm dos sensores MODIS e VIIRS foram feitas análises de correlação e regressão linear, comparando as concentrações de clorofila-*a* superficiais obtidas *in situ* e coeficiente de atenuação da luz obtido a partir dos dados do Disco de Secchi, tanto na janela temporal de 24 horas entre a aquisição dos dados *in situ* e de satélite, quanto na janela temporal de 12 horas de acordo com a Figura 4.3.

Para avaliar a necessidade de possíveis ajustes regionais dos algoritmos, foram feitas regressões e correlações entre os dados de clorofila-*a* obtidos *in situ* e as razões

máximas entre as bandas espectrais no azul e verde de ambos os sensores, nas janelas temporais de 12 h e 24 h.

Todas as análises estatísticas, correlação e regressão linear foram conduzidas utilizando o Microsoft Excel®, assim como os gráficos aqui apresentados.

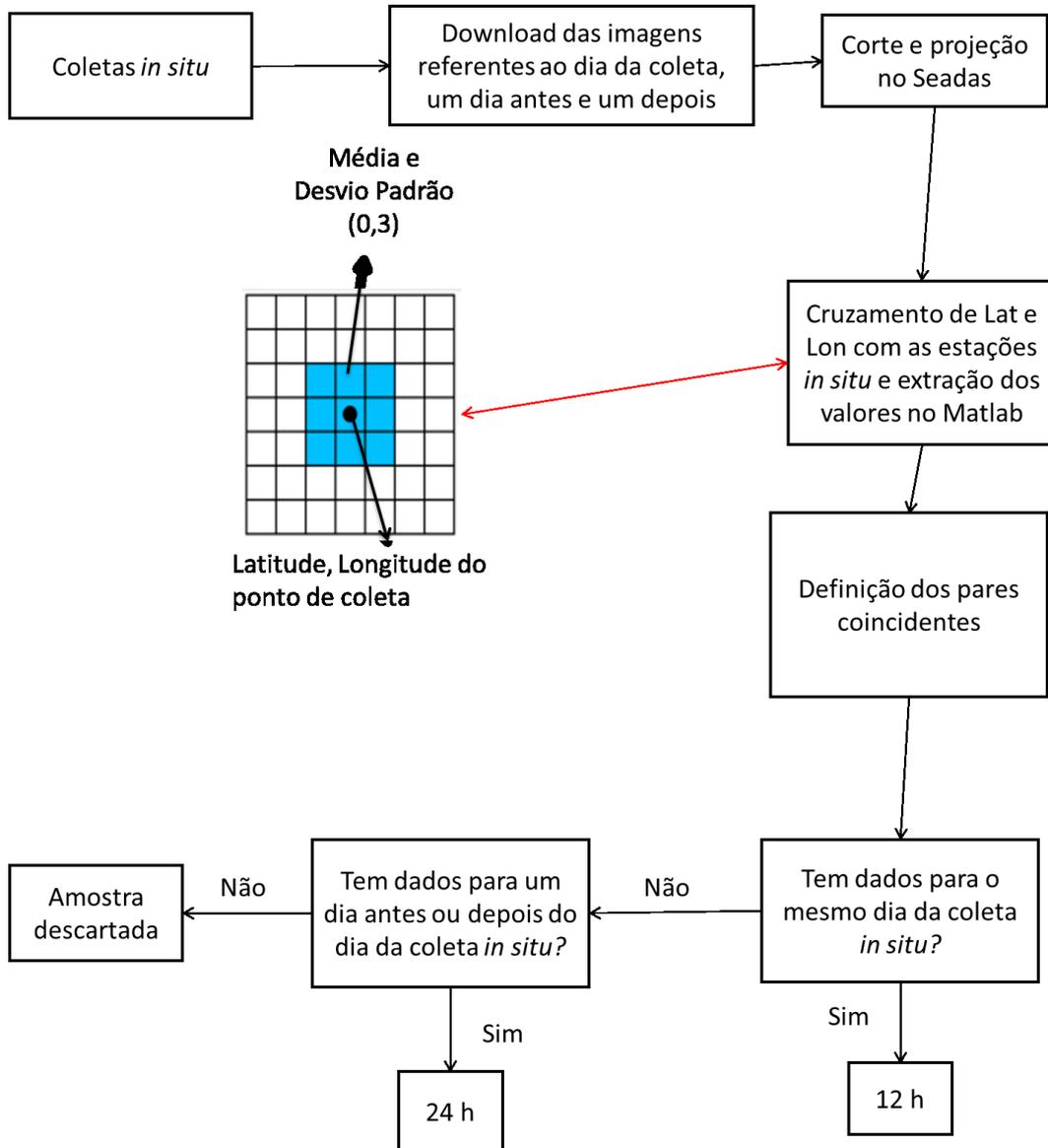


Figura 4.3 - Fluxograma da aquisição de dados dos sensores e definição dos pares coincidentes.

## 5. Resultados

Após o pareamento dos dados *in situ* e os dados de satélite, houve uma grande redução do N amostral (Tabela 5.1). Os valores mínimos, máximos, médias e desvio padrão dos parâmetros obtidos *in situ* e pelos sensores MODIS e VIIRS estão apresentados na Tabela 5.2, para o conjunto de dados obtidos em uma janela temporal de até 24 horas entre o horário da coleta de dados *in situ* e a aquisição da imagem pelos sensores, e na Tabela 5.3 para o conjunto de dados obtidos utilizando uma janela temporal de até 12 horas entre o horário da coleta de dados *in situ* e a aquisição da imagem pelos sensores.

	Dados <i>in situ</i>	Janela de 24h	Janela de 12h
N	72	35	26

Tabela 5.1 - N amostral de todas as coletas *in situ* e dos dados pareados com as janelas temporais de 24 h e 12 h.

Para o conjunto de dados em que a janela temporal foi de 24 horas (Tabela 5.2), o coeficiente de atenuação da luz *in situ* teve a média de  $0,27 \text{ m}^{-1}$ , com máximo de  $0,62 \text{ m}^{-1}$  e mínimo de  $0,08 \text{ m}^{-1}$ . Estes valores foram mais altos se comparados ao coeficiente de atenuação da luz (Kd490) obtido pelo algoritmo do sensor MODIS, que mostrou uma média de  $0,15 \text{ m}^{-1}$ , máximo de  $0,44 \text{ m}^{-1}$  e mínimo de  $0,04 \text{ m}^{-1}$ , e também que o Kd490 obtido pelo sensor VIIRS, que apresentou média de  $0,13 \text{ m}^{-1}$  com máximo de  $0,27 \text{ m}^{-1}$  e mínimo de  $0,07 \text{ m}^{-1}$ . Os valores de clorofila-a obtidos *in situ* também foram mais altos que os estimados pelos sensores MODIS e VIIRS. Para a clorofila-a *in situ*, foi encontrada um média de  $2,79 \text{ mg m}^{-3}$  com máximo de  $7,19 \text{ mg m}^{-3}$  e mínimo de  $0,57 \text{ mg m}^{-3}$ , enquanto a clorofila-a estimada a partir do algoritmo do sensor MODIS apresentou média de  $1,74 \text{ mg m}^{-3}$ , máximo de  $6,72 \text{ mg m}^{-3}$  e mínimo de  $0,29 \text{ mg m}^{-3}$ . Já utilizando o sensor VIIRS, a média foi de  $1,40 \text{ mg m}^{-3}$ , máxima de  $3,69 \text{ mg m}^{-3}$  e mínimo de  $0,47 \text{ mg m}^{-3}$ .

	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<b>Coeficiente de atenuação da luz <i>in situ</i> (m<sup>-1</sup>)</b>	0,27	0,14	0,08	0,62
<b>Kd490 MODIS (m<sup>-1</sup>)</b>	0,15	0,07	0,04	0,44
<b>Kd490 VIIRS (m<sup>-1</sup>)</b>	0,13	0,05	0,07	0,27
<b>Clorofila-<i>a in situ</i> (mg m<sup>-3</sup>)</b>	2,79	1,68	0,57	7,19
<b>Clorofila-<i>a</i> MODIS (mg m<sup>-3</sup>)</b>	1,74	1,17	0,29	6,72
<b>Clorofila-<i>a</i> VIIRS (mg m<sup>-3</sup>)</b>	1,40	0,77	0,47	3,69

Tabela 5.2 – Médias, desvio padrão, mínimos e máximos do coeficiente de atenuação da luz na água e clorofila-*a* superficial obtidos *in situ* e estimados pelos sensores MODIS e VIIRS para o conjunto de dados obtido no intervalo de 24h (N = 35).

Para o conjunto de dados em que a janela temporal foi de 12 horas (Tabela 5.3) coeficiente de atenuação *in situ* teve a média de 0,27 m<sup>-1</sup> com máximo de 0,62 m<sup>-1</sup> e mínimo de 0,08 m<sup>-1</sup>. O coeficiente obtido pelo algoritmo do sensor MODIS mostrou uma média de 0,15 m<sup>-1</sup>, máximo de 0,44 m<sup>-1</sup> e mínimo de 0,04 m<sup>-1</sup>. Já o coeficiente obtido pelo algoritmo do sensor VIIRS mostrou uma média de 0,13 m<sup>-1</sup> com máximo de 0,27 m<sup>-1</sup> e mínimo de 0,07 m<sup>-1</sup>.

Para a clorofila-*a in situ*, foi encontrada uma média de 2,82 mg m<sup>-3</sup> com máximo de 7,19 mg m<sup>-3</sup> e mínimo de 0,57 mg m<sup>-3</sup>. Para a clorofila-*a* calculada a partir do sensor MODIS, a média foi de 1,76 mg m<sup>-3</sup>, máximo de 6,72 mg m<sup>-3</sup> e mínimo de 0,29 mg m<sup>-3</sup>. Já utilizando o sensor VIIRS, a média foi de 1,40 mg m<sup>-3</sup>, máxima de 3,69 mg m<sup>-3</sup> e mínimo de 0,48 mg m<sup>-3</sup>.

	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
<b>Coeficiente de atenuação <i>in situ</i> (m<sup>-1</sup>)</b>	0,27	0,14	0,08	0,62
<b>Kd490 MODIS (m<sup>-1</sup>)</b>	0,15	0,08	0,04	0,44
<b>Kd490 VIIRS (m<sup>-1</sup>)</b>	0,13	0,05	0,07	0,27
<b>Clorofila-<i>a in situ</i> (mg m<sup>-3</sup>)</b>	2,82	1,80	0,57	7,19
<b>Clorofila-<i>a</i> MODIS (mg m<sup>-3</sup>)</b>	1,76	1,30	0,29	6,72
<b>Clorofila-<i>a</i> VIIRS (mg m<sup>-3</sup>)</b>	1,40	0,82	0,48	3,69

Tabela 5.3 – Médias, desvios padrão, mínimos e máximos do coeficiente de atenuação da luz na água e clorofila-*a* superficial obtidos *in situ* e estimados pelos sensores MODIS e VIIRS para o conjunto de dados obtido no intervalo de 12h (N = 26).

A concentração de clorofila-*a* medida *in situ* ficou distribuída entre 0,57 e 7,19 mg m<sup>-3</sup> com a maior parte apresentando concentrações na faixa entre 1 e 2 mg m<sup>-3</sup>

para o intervalo de 24 h e entre 2 e 3 mg m<sup>-3</sup> para o intervalo de 12 h (Figura 5.1 a e b). Em ambos os intervalos percebe-se que a maioria das amostras estão abaixo de 4 mg m<sup>-3</sup>.

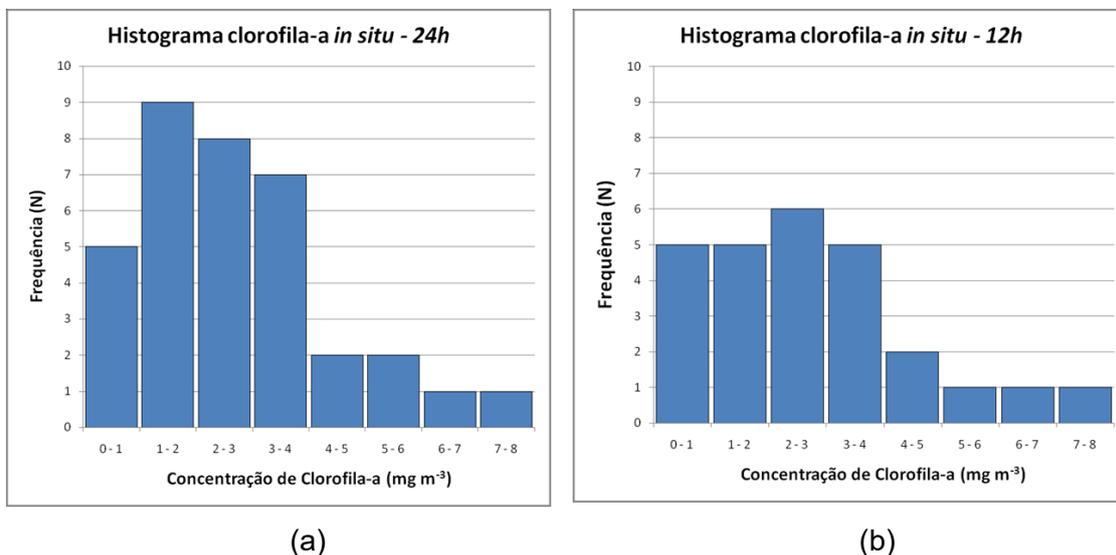


Figura 5.1 - Histograma da distribuição da concentração de clorofila-a *in situ* (mg m<sup>-3</sup>) das amostras superficiais que foram utilizadas neste trabalho para os intervalos de 24h e 12h.

Podemos observar que, exceto pelo desvio padrão do conjunto de dados de Kd490 dos sensores MODIS e VIIRS, os parâmetros estatísticos descritivos do conjunto de dados de coeficiente de atenuação da luz permaneceram o mesmo para as janelas temporais de 12 h e 24 h. Também para o conjunto de dados de clorofila-a, pouca diferença entre os parâmetros estatísticos descritivos foram observados entre as janelas temporais utilizadas.

As Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 mostram os espectros de reflectância obtidos a partir dos dados dos sensores MODIS e VIIRS em cada estação de coleta de dados, nas janelas temporais de 24 h e 12 h. As diferentes curvas dentro do mesmo gráfico representam o comportamento espectral da reflectância nas bandas da região do visível dos sensores MODIS e VIIRS em cada estação de amostragem.

Podemos observar nos espectros de reflectância (Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5) uma maior reflectância na região do verde (bandas em 531 nm, 547 nm e 555 nm do MODIS e banda 551 nm do VIIRS) e uma menor reflectância na região do vermelho (bandas 645 nm, 667 nm e 678 nm do MODIS e banda 671 nm do VIIRS) e azul (bandas de 412nm, 443 nm, 469 nm e 488nm do MODIS, e bandas 410nm, 443 nm e 486 nm do VIIRS), como esperado para águas opticamente

complexas, classificadas como águas Caso 2 (MOREL & BÉLANGER, 2006; BRICAUD et al., 1981).

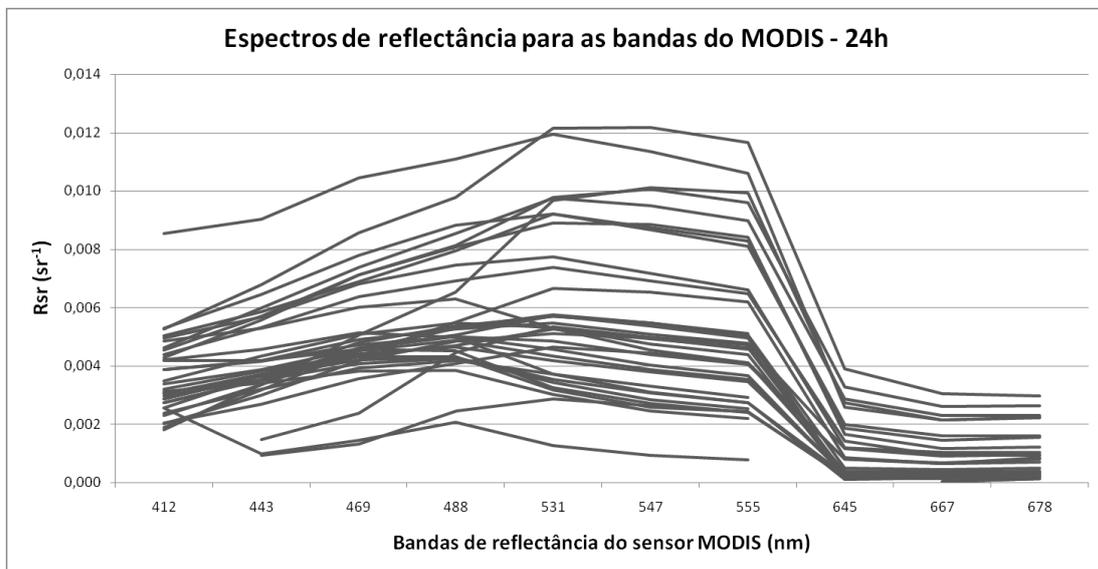


Figura 5.2 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor MODIS para o intervalo de 24h. A banda 412 representa o violeta, as bandas 443, 469 e 488 representam o azul, as bandas 531, 547 e 555 representam o verde e o vermelho é representado pelas bandas 645, 667 e 678. N = 35. Cada linha corresponde a uma estação amostral.

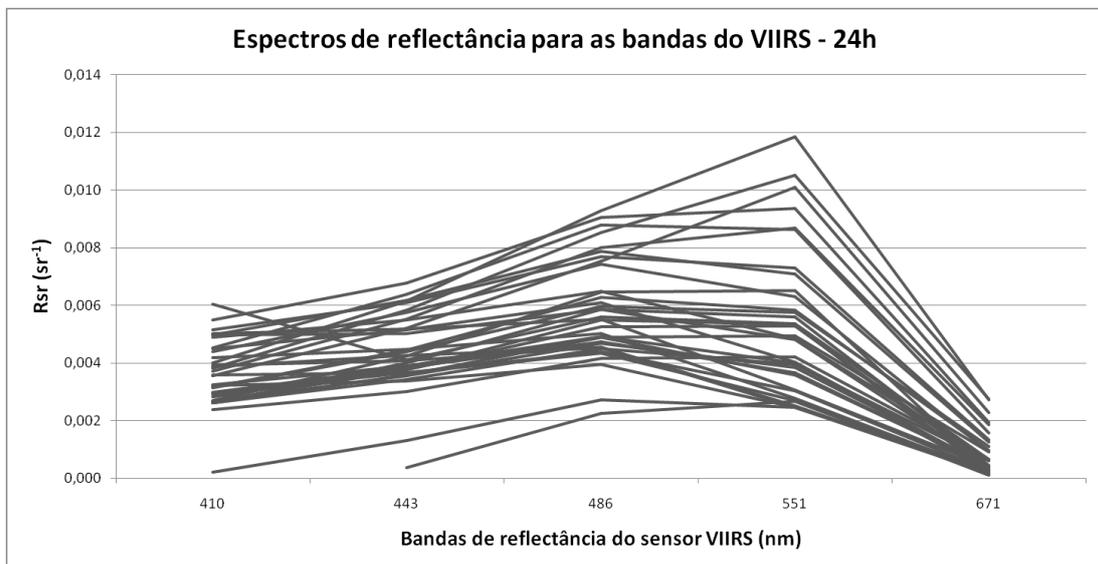


Figura 5.3 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor VIIRS para o intervalo de 24h. A banda 410 representa o violeta, as bandas 443 e 486 representam o azul, a banda 551 representa o verde e o vermelho é representado pela banda 671. N = 35. Cada linha corresponde a uma estação amostral.

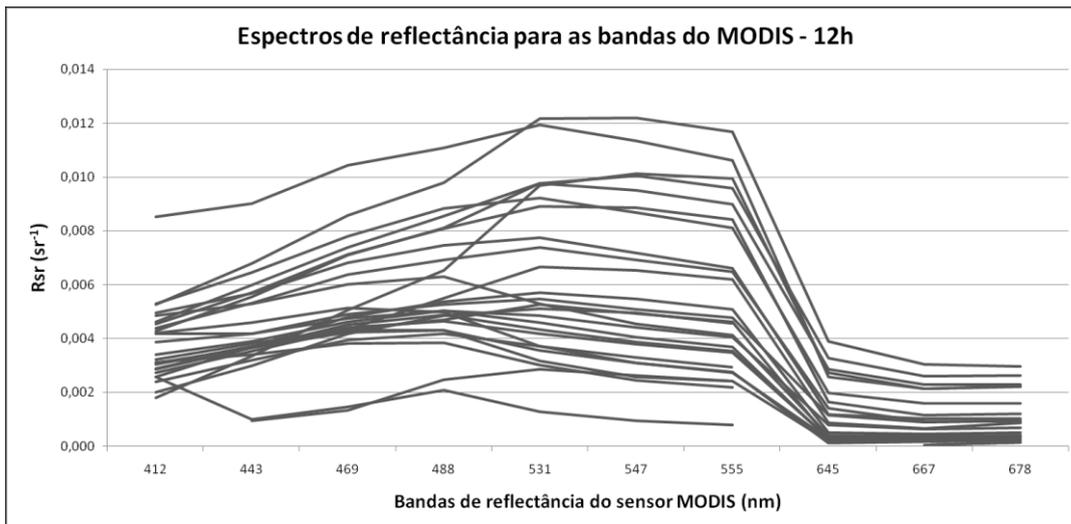


Figura 5.4 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor MODIS para o intervalo de 12h. A banda 412 representa o violeta, as bandas 443, 469 e 488 representam o azul, as bandas 531, 547 e 555 representam o verde e o vermelho é representado pelas bandas 645, 667 e 678. N = 26. Cada linha corresponde a uma estação amostral.

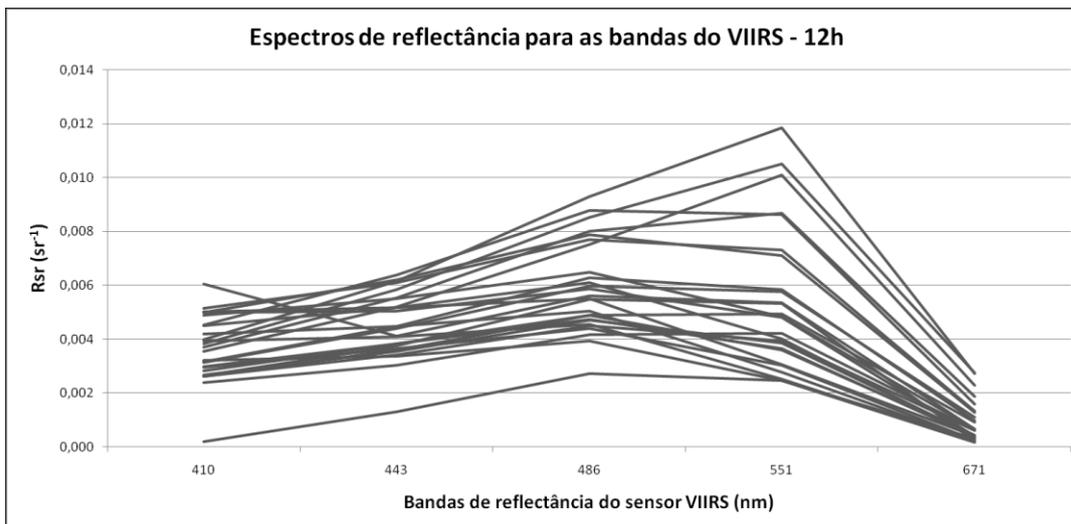


Figura 5.5 - Espectros de reflectância da água obtidos pelo sensor VIIRS para o intervalo de 12h. A banda 410 representa o violeta, as bandas 443 e 486 representam o azul, a banda 551 representa o verde e o vermelho é representado pela banda 671. N = 26. Cada linha corresponde a uma estação amostral.

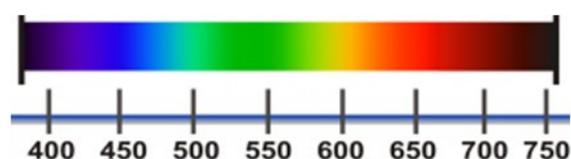


Figura 5.6 - Espectro eletromagnético da região visível com os comprimentos de onda (nm) correspondentes.

A Figura 5.7 (a e b) mostra a dispersão entre a clorofila-*a* superficial medida *in situ* e a estimada pelos sensores MODIS e VIIRS, obtidas na janela temporal de 24 h, para a qual foi obtido um número amostral (N) igual a 35. Para o sensor MODIS foi obtido um coeficiente de correlação (r) de 0,690, um coeficiente de determinação (r<sup>2</sup>)

de 0,476, e um erro médio quadrático (EMQ) de 0,102, e para o sensor VIIRS foi obtido um r de 0,758,  $r^2$  de 0,575 e EMQ de 0,133.

A Figura 5.8 mostra a dispersão entre a clorofila-a superficial medida *in situ* e a estimada pelos sensores MODIS e VIIRS, obtidas em uma janela temporal de até 12 h do horário da coleta da amostra *in situ*, para a qual foi obtido um N = 26. Para o sensor MODIS foi obtido um r = 0,763,  $r^2$  = 0,583 e EMQ = 0,067, e para o sensor VIIRS foi obtido um r = 0,804,  $r^2$  = 0,646, e EMQ = 0,093.

Clorofila - a				
	24 horas		12 horas	
Sensor	MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS
N	35	35	26	26
EM	0,099	0,129	0,088	0,122
SQE	3,452	4,520	2,277	3,163
EMQ	0,102	0,133	0,067	0,093
A	0,480	0,347	0,553	0,364
B	0,398	0,427	0,200	0,370
r	0,690	0,758	0,763	0,804
$r^2$	0,476	0,575	0,583	0,646

Tabela 5.4 - Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre a clorofila-a superficial medida *in situ* e a estimada pelos sensores MODIS e VIIRS para os intervalos de 24 h e 12h: número amostral (N), erro médio (EM), soma do quadrado dos erros (SQE), erro médio quadrado (EMQ), coeficiente angular da regressão (A), intercepto da regressão (B), coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

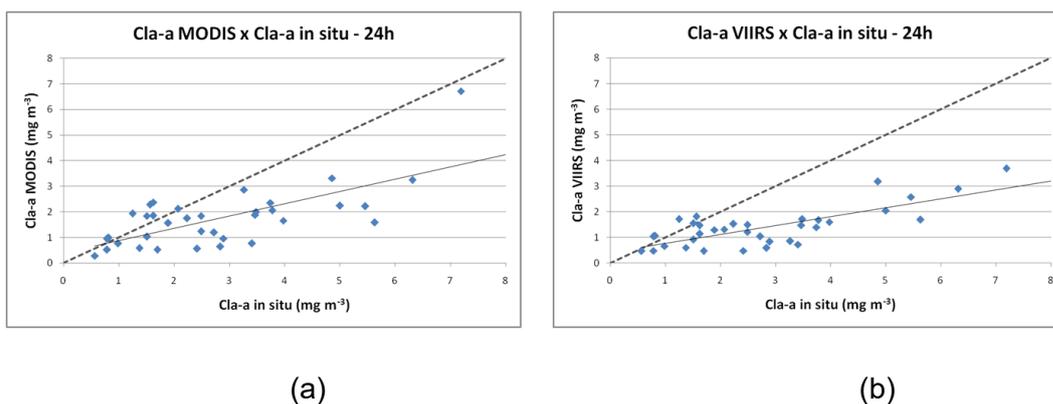
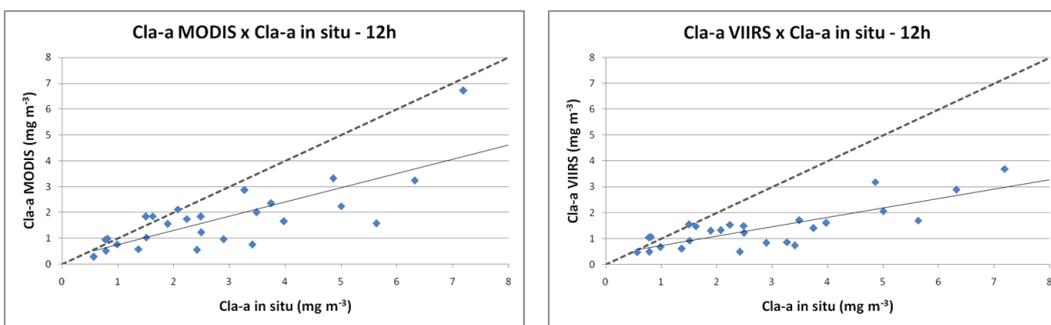


Figura 5.7 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila-a estimada pelos sensores MODIS e VIIRS e a clorofila-a superficial medida *in situ* para o intervalo de 24h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 35).



(a)

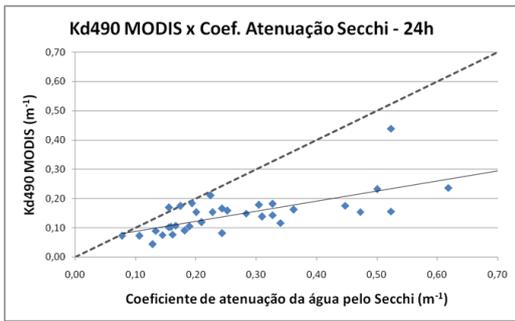
(b)

Figura 5.8 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila-*a* estimada pelos sensores MODIS e VIIRS e a clorofila-*a* superficial medida *in situ* para o intervalo de 12h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 26).

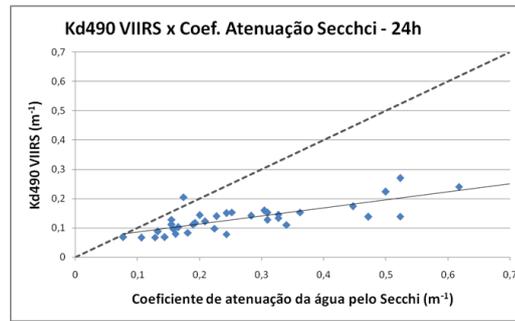
As Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram a dispersão entre o coeficiente de atenuação da luz na água derivado de medidas da profundidade do disco de Secchi e os estimados pelos sensores MODIS e VIIRS ( $K_d490$ ) para a janela temporal de 24 h e 12 h, respectivamente. Para a janela temporal de 24 h foi obtido um N = 35 com um r igual a 0,673 e  $r^2$  igual a 0,453 para o sensor MODIS (Figura 5.8 a), e um r igual a 0,762 e  $r^2$  igual a 0,580 para o sensor VIIRS (Figura 5.8 b). Já para a janela temporal de 12 h, foram obtidas 26 amostras “simultâneas” (N = 26), com um r igual a 0,747 e  $r^2$  igual a 0,558 para o MODIS (Figura 5.9 a), e r igual a 0,896 e  $r^2$  de 0,803 para o sensor VIIRS (Figura 5.9 b).

Coeficiente de atenuação da luz na água				
	24 horas		12 horas	
Sensor	MODIS	VIIRS	MODIS	VIIRS
N	35	35	26	26
EM	0,085	0,099	0,081	0,092
SQE	2,981	3,473	2,117	2,403
EMQ	0,088	0,099	0,062	0,071
A	0,344	0,274	0,404	0,323
B	0,054	0,058	0,039	0,045
r	0,673	0,762	0,747	0,896
$r^2$	0,453	0,580	0,558	0,803

Tabela 5.5 - Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre o coeficiente de atenuação medido *in situ* e o estimado pelos sensores MODIS e VIIRS para os intervalos de 24 h e 12h: número amostral (N), erro médio (EM), soma do quadrado dos erros (SQE), erro médio quadrado (EMQ), coeficiente angular da regressão (A), intercepto da regressão (B), coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação ( $r^2$ ).

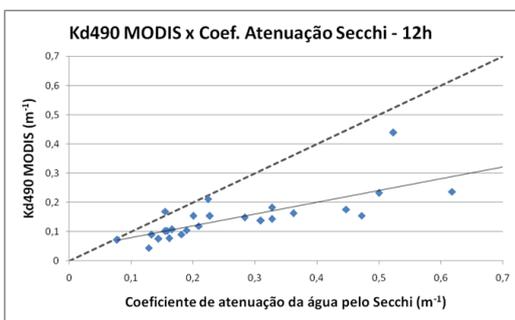


(a)

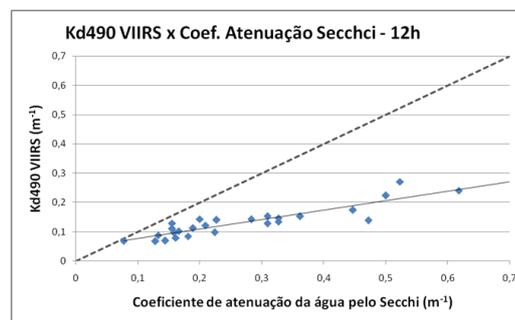


(b)

Figura 5.9 - Dispersão e regressão linear entre o coeficiente de atenuação da luz na água estimado pelos sensores MODIS e VIIRS e o derivado de medidas *in situ* para o intervalo de 24h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 35).



(a)



(b)

Figura 5.10 - Dispersão e regressão linear entre o coeficiente de atenuação da luz na água estimado pelos sensores MODIS e VIIRS e o derivado de medidas *in situ* para o intervalo de 12h. A linha tracejada representa a proporção 1:1 e a linha contínua representa a regressão linear (N = 26).

As figuras Figura 5.11 e Figura 5.12 representam a dispersão e regressão linear entre a clorofila-*a* medida *in situ* e a razão máxima das bandas azuis e verdes de cada sensor para o intervalo de 24 h e para o intervalo de 12 h respectivamente, sendo que o MODIS tem a razão máxima entre cada banda do azul, 443, 469 e 488 nm, para cada do verde, 531, 547 e 555 nm, já o sensor VIIRS tem a razão máxima entre cada banda do azul, 443 e 486 nm, para sua única banda no verde a 550 nm.

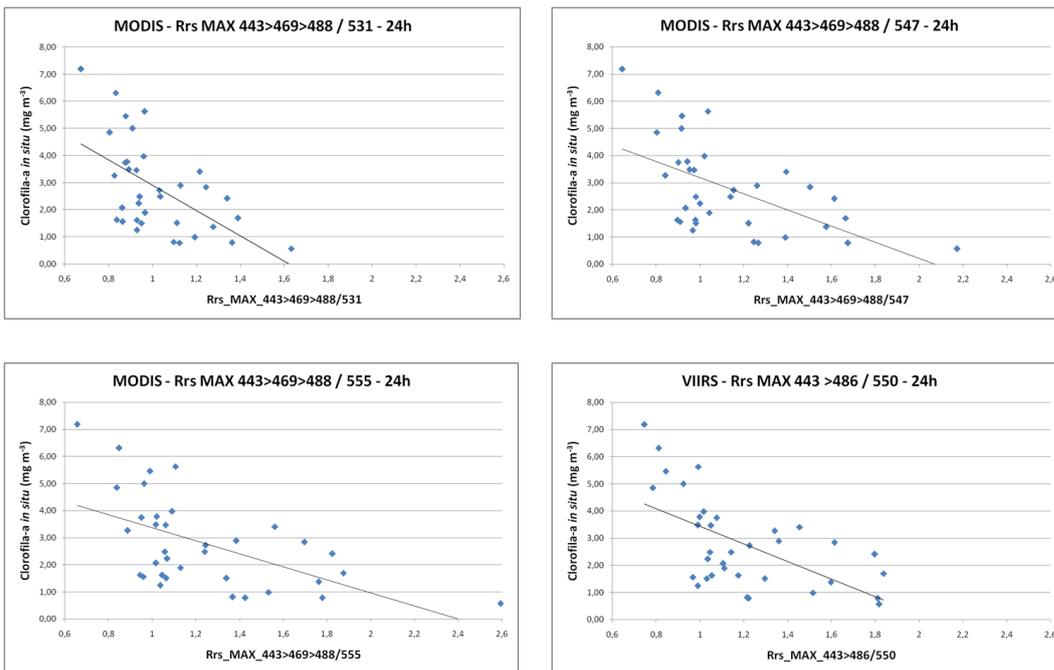


Figura 5.11 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila-*a* superficial medida *in situ* e a razão máxima das bandas azuis (443, 469, 488) sobre as verdes (531, 547 e 555) para o sensor MODIS, e a razão máxima das bandas azuis (443 e 486) sobre a verde (550) do sensor VIIRS, para o intervalo de 24 h (N = 35).

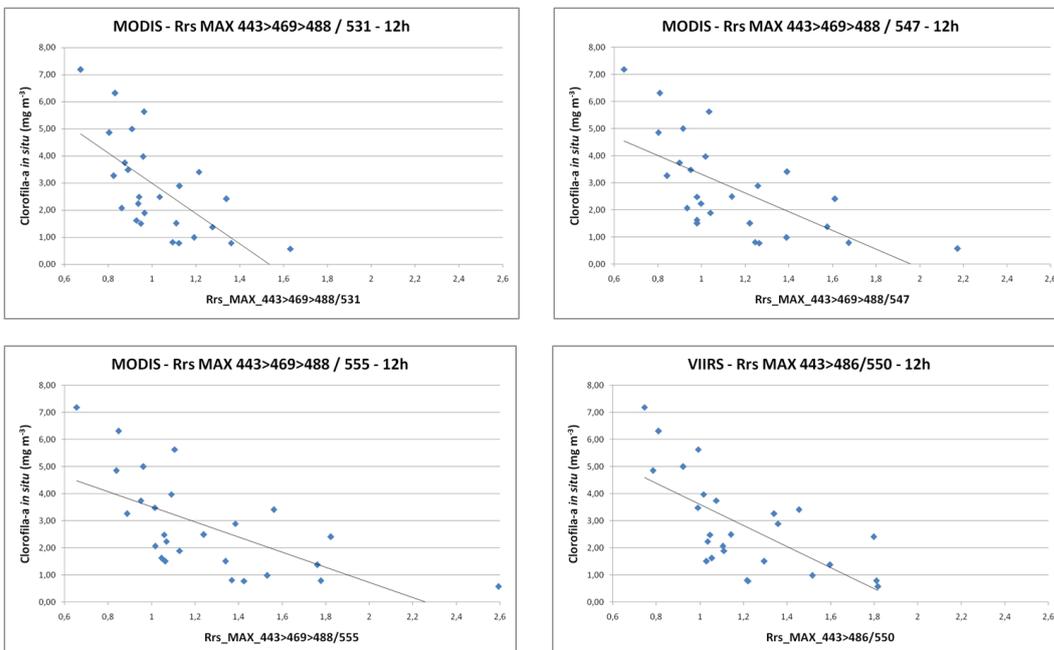


Figura 5.12 - Dispersão e regressão linear entre a clorofila-*a* superficial medida *in situ* e a razão máxima das bandas azuis (443, 469, 488) sobre as verdes (531, 547 e 555) para o sensor MODIS, e a razão

máxima das bandas azuis (443 e 486) sobre a verde (550) do sensor VIIRS, para o intervalo de 12 h (N = 26).

A Tabela 5.6 mostra que a melhor correlação é obtida pela razão máxima entre as três bandas do azul pela banda 531, do verde, com o coeficiente de determinação de 0,43. Apesar desta melhor correlação, o coeficiente não foi muito superior ao obtido pelas demais razões avaliadas.

<b>Razões entre o máximo de azul (443, 469, 488) e cada verde (531, 547 e 555) do sensor MODIS</b>			
<b>Coefficientes de correlação e determinação</b>	<b>MODIS_Rrs_MAX 443&gt;469&gt;488/531</b>	<b>MODIS_Rrs_MAX 443&gt;469&gt;488/547</b>	<b>MODIS_Rrs_MAX 443&gt;469&gt;488/555</b>
<b>r (24 h)</b>	-0,567	-0,566	-0,558
<b>r<sup>2</sup> (24 h)</b>	0,321	0,320	0,312
<b>r (12 h)</b>	-0,653	-0,644	-0,637
<b>r<sup>2</sup> (12 h)</b>	<b>0,426</b>	0,415	0,406

Tabela 5.6 – Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre a clorofila *in situ* e as razões máximas para cada banda de reflectância do sensor MODIS para 12 h e 24 h: coeficientes de correlação (r) e coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>). N para 24 h = 35 e N para 12 h = 26

A Tabela 5.7 apresenta os índices de correlação e regressão para o intervalo de 24 h e 12 h entre a medida da clorofila-*a in situ* e as razões máxima de reflectância (Rrs MAX) para o MODIS (443>469>488/531) e para o VIIRS (443>486/550).

<b>Razões máximas das bandas</b>				
	<b>24 horas</b>		<b>12 horas</b>	
<b>Razão</b>	<b>MODIS RrsMAX 443&gt;469&gt;488/531</b>	<b>VIIRS RrsMAX 443&gt;486/550</b>	<b>MODIS RrsMAX 443&gt;469&gt;488/531</b>	<b>VIIRS RrsMAX 443&gt;486/550</b>
<b>N</b>	35	35	26	26
<b>A</b>	-0,069	-0,108	-0,076	-0,113
<b>B</b>	1,214	1,502	1,246	1,520
<b>r</b>	-0,567	-0,592	-0,653	-0,661
<b>r<sup>2</sup></b>	0,321	0,351	0,426	0,437

Tabela 5.7 – Parâmetros obtidos pela análise de regressão entre a clorofila-*a* superficial *in situ* e as razões máximas com melhor desempenho para os sensores MODIS e VIIRS para os intervalos de 24 h e 12 h: número amostral (N), coeficiente angular da regressão (A), intercepto da regressão (B), coeficientes de correlação (r), coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>).

## 6. Discussão

O desempenho dos algoritmos para determinação da clorofila-*a* foram satisfatórios ( $r^2$  de 0,59 para o MODIS e 0,65 para o VIIRS) na janela temporal de 12 h, considerando que foram avaliados num ambiente de águas óticamente complexas. Estes resultados foram ainda um pouco superiores que os encontrados por outros autores, como Kampel et al. (2007) e Doglioti et al. (2009), que tiveram coeficientes de determinação inferiores a 0,55 em regiões com águas de Caso 2. Os diferentes resultados entre as janelas temporais de 12 h e 24 h mostram a importância de serem feitas coletas *in situ* no menor intervalo de tempo possível da aquisição dos dados de satélite. Isto ocorre devido à dinâmica dos oceanos, que muda constantemente as condições físicas e biogeoquímicas, e conseqüentemente a resposta espectral da água. Como era esperado, a janela de 12 h teve um resultado melhor quando comparada à janela de 24 h que teve o  $r^2$  de 0,48 para o MODIS e 0,58 para o VIIRS.

O desempenho do algoritmo para a determinação do coeficiente de atenuação da luz na água para o sensor VIIRS foi bastante satisfatório, e muito superior ao obtido pelo sensor MODIS, no intervalo de 12 h ( $r^2$  de 0,56 para o MODIS e 0,80 para o VIIRS). No intervalo de 24 h o desempenho foi bem reduzido para ambos ( $r^2$  de 0,45 para o MODIS e 0,58 para o VIIRS).

Entre os dois sensores, o VIIRS mostrou um melhor desempenho para a determinação da clorofila-*a* e para o coeficiente de atenuação da luz na água, tanto na janela de 12 h quanto na janela de 24 h, apesar do menor número de bandas espectrais. Este melhor resultado possivelmente se deve a melhor resolução espacial, 750 m, em comparação ao MODIS com 1000 m, o que resulta em menor variância da janela amostral de 3 x 3 pixels. O posicionamento das bandas e sua largura também podem ser fatores responsáveis pelo melhor desempenho. Como vimos na Tabela 1.2, também é importante considerar que o sensor VIIRS foi lançado em 2012 e o MODIS em 2002, assim, o VIIRS contou não apenas com melhor tecnologia, quanto à maiores erros de efemérides orbitais aos quais o sensor MODIS está sujeito, devido ao maior período em órbita, 17 anos, apesar de sua vida útil projetada para 6 anos (NASA, 2019b).

Na determinação do coeficiente de atenuação da luz na água, o VIIRS mostrou um desempenho ainda melhor sobre o MODIS, com  $r^2$  de 0,80 e 0,56 respectivamente para a janela de 12 h. Aqui novamente temos o melhor desempenho do VIIRS

possivelmente relacionado ao posicionamento de bandas, melhor resolução espacial e menor erros de efemérides orbitais, devido a sua menor vida útil.

Os resultados obtidos mostraram que a concentração da clorofila-*a* e do coeficiente de atenuação da luz na água foram subestimados pelos algoritmos padrão de ambos sensores avaliados, VIIRS e MODIS, na região costeira em torno da REBIO do Arvoredo, com valores de clorofila-*a* variando entre 0,57 e 7,19 mg m<sup>-3</sup>, com a maior parte das concentrações entre 0 e 4 mg m<sup>-3</sup> para o conjunto de dados da janela temporal de 12 h.

Estes resultados estão de acordo com o observado por outros autores, que identificaram que os algoritmos padrão podem superestimar em concentrações de clorofila-*a* mais baixas e subestimarem concentrações mais altas. Carvalho et al. (2014) utilizando imagens de 1 Km do MODIS e uma janela temporal de 24 h na região da Baía de Santos mostrou que o algoritmo OC3M superestimou em concentrações até 2,5 mg m<sup>-3</sup> e subestimou em concentrações maiores que 2,5 mg m<sup>-3</sup>, resultado semelhante ao encontrado por Garcia et al. (2005) para a região influenciada pela descarga do Rio da Prata e Lagoa dos Patos, utilizando o algoritmo OC4v4 para imagens de 9 km do sensor SeaWiFS. Na região do Oceano Antártico compreendida entre as longitudes 20° E e 160° E, e utilizando imagens do sensor MODIS diárias ou compostas de 8 dias consecutivos devido à alta cobertura de nuvens, com resolução de 9 km, Johnson et al. (2013) encontrou uma superestimação para valores inferiores a 0,1 mg m<sup>-3</sup> de clorofila-*a*, e uma subestimação para valores maiores que 0,1 mg m<sup>-3</sup>, sendo que a concentração de clorofila-*a* encontrada *in situ* variou de 0 a 3,97 mg m<sup>-3</sup>. Já Dogliotti et al. (2009), utilizando imagens do sensor MODIS com resolução de 1 km, e em um intervalo de até 3 h entre os dados obtidos *in situ* e pelo sensor, na região da plataforma continental patagônica, encontrou uma superestimação para valores abaixo de 1,0 mg m<sup>-3</sup>, e uma subestimação para valores maiores que 1,0 mg m<sup>-3</sup>, sendo que a concentração da clorofila-*a* do conjunto de dados variou de 0,2 e 6,1 mg m<sup>-3</sup>.

Utilizando também imagens do sensor MODIS com 1 km de resolução, Kampel et al. (2007) mostrou superestimação dos valores obtidos pelo algoritmo OC3 em uma região oceânica, na plataforma continental sudeste brasileira, utilizando uma janela temporal de 12 h, para concentrações de clorofila-*a* entre 0,3 à 2,0 mg m<sup>-3</sup>, com a média de 0,7 mg m<sup>-3</sup>.

Dogliotti et al. (2009), e também Johnson et al. (2013), apontam a composição e fisiologia das espécies que compõem a comunidade fitoplanctônica de cada região estudada como um fator determinante para a subestimação da clorofila-*a* observada em seus estudos. Segundo Sathyendranath et al. (2001), citado por Dogliotti et al. (2009), quando grandes células fitoplanctônicas, por exemplo as diatomáceas, estão presentes no ambiente, elas causam a redução do coeficiente de absorção do fitoplâncton por unidade de clorofila-*a*, devido ao “efeito partícula”. Efeito este que, em teoria, prevê a diminuição da eficiência de absorção com o aumento do tamanho das células e concentração de pigmentos (DOGLIOTTI et al., 2009 apud DUYSSENS, 1956, SATHYENDRANATH et al., 1987). Na região da REBIO do Arvoredo já foi mostrado por Menezes et al. (2019) que existe uma grande população de diatomáceas, assim como Brandini et al. (2014), que também encontrou maior concentração de diatomáceas na plataforma catarinense, na altura de Itajaí, principalmente em profundidades menores que 60 m.

Outro fator importante para a acurácia dos algoritmos é a presença de outros componentes opticamente ativos na água. Os espectros de reflectância (Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5) apresentam um comportamento típico de águas Caso 2, com menor reflectância na região do azul (comprimentos de onda entre 400 nm e 500 nm aproximadamente), crescente em direção à região do verde (comprimentos de onda entre 500 nm e 600 nm aproximadamente), na qual a reflectância é mais alta (MOREL & BÉLANGER 2006). A água, na ausência de componentes óticos como a clorofila-*a* e a matéria orgânica, reflete a luz na região do azul, sendo por isso o comprimento de onda no azul (~490 nm) utilizado para a estimativa do coeficiente de atenuação da luz na coluna d’água. Assim, esse comportamento ótico observado, com menor reflectância no azul e maior no verde, em todas as bandas, resulta da presença de outros componentes opticamente ativos na água além do fitoplâncton, como substâncias dissolvidas ou em suspensão oriundas de aporte de água continental e ressuspensão de sedimentos do fundo oceânico.

A região estudada é influenciada por aporte de águas continentais, como a água da pluma do Prata, a pluma do rio Tijucas e água salobra vinda do Canal da Ilha de Santa Catarina (MENEZES et al, 2019), com altas concentrações de material em suspensão e fitoplâncton, que alteram as propriedades óticas inerentes da água, como a absorção e espalhamento da luz, assim como a reflectância da superfície da água, utilizada tanto para a estimativa de clorofila-*a* quanto do Kd490 pelos sensores remotos. A presença dessas substâncias interfere no desempenho dos algoritmos

empíricos, sendo necessária a utilização de algoritmos regionais ou até mesmo semi-analíticos (IOCCG, 2000).

A matéria orgânica dissolvida colorida (MODC) possui uma grande absorção na região do azul, influenciando diretamente a resposta espectral nestes comprimentos de onda medida pelos sensores de satélite, e conseqüentemente na acurácia do algoritmo. A MODC aparece principalmente em águas de origem continental e pode ser usada como indicador de presença de águas continentais na região (CARVALHO et al, 2014).

Carvalho et al. (2014) analisou as propriedades óticas das águas da plataforma continental ao largo de Santos (SP) e o desempenho do algoritmo global do MODIS para a região em duas épocas, outubro/2005 e março/2006, e observou que a MODC dominou o espectro de absorção e teve forte correlação com a salinidade nos dados obtidos em outubro/2005, enquanto o mesmo não foi observado para os dados obtidos em março/2016, sugerindo forte influência da pluma do rio da Prata na região. O desempenho do algoritmo global para clorofila-a, OC3M, foi bem inferior em outubro/2005 comparado a março/2006. Como não houve mudanças substanciais nos espectros de absorção pelo fitoplâncton entre as duas épocas, os resultados mostram que as propriedades de absorção da luz pela MODC devem ser consideradas prioritariamente na otimização de algoritmos bio-óticos na região. Essa diferença no desempenho do algoritmo global é também esperada para a região da REBIO do Arvoredo, que como observado pelos pesquisadores do projeto MAArE, sofre influência sazonal da Água da Pluma do Prata, assim como da pluma do rio Tijucas (FREIRE et al. 2017).

A região estudada possui características bem distintas entre verão e inverno, no verão possui forte termoclina com presença da ACAS no fundo e ATSP na superfície com menores concentrações de material em suspensão, causando uma Zeu mais profunda, podendo chegar à termoclina, beneficiando a produção primária que consome os nutrientes oriundos da ACAS. No inverno a região é influenciada por fortes ventos causando uma grande mistura na coluna d'água e maiores concentrações de material em suspensão além da forte presença da pluma do rio da Prata trazendo nutrientes e aumentando a produtividade primária. (FREIRE et al., 2017). Apesar desta variação sazonal, o desempenho do algoritmo no verão e no inverno não foi avaliado neste trabalho, devido ao baixo número de amostras para cada época separadamente.

Além do aporte de água continental, pode ocorrer também ressuspensão de material de fundo, devido à sua pouca profundidade, com máximas em torno de 50 m e mínimas em torno de 5 m na baía do Rio Tijuca, e eventuais ressurgências (FREIRE et al., 2017).

As subestimativas da concentração de clorofila-*a* também podem estar associadas à presença de aerossóis, segundo autores como Darecki & Stramski (2003) e Gregg & Casey (2007). Como os aerossóis absorvem na faixa do azul, assim como a clorofila-*a*, quando não corrigidos corretamente, alteram o resultado clorofila-*a* estimada pelos sensores a bordo de satélites (DARECKI & STRAMSKY, 2003). Assim, a influência dos aerossóis na subestimação da clorofila-*a* ocorre devido a modelos inapropriados de correção atmosférica das imagens para a região estudada. O método mais comum para a determinação da presença de aerossóis e correção atmosférica de imagens, e que está implementado no processamento padrão pela NASA de imagens nível 2 dos sensores MODIS e VIIRS, como as utilizadas aqui, se baseia na reflectância da água na faixa do IVP (Infra-vermelho Próximo), com comprimento de onda próximo ao 865 nm por exemplo, porém regionalmente os aerossóis podem responder de forma diferente, necessitando um ajuste regional.

Juntamente com os dados *in situ* apresentados neste trabalho, dentro do projeto MAArE, foram coletadas amostras de fitoplâncton nas mesmas estações de coleta de água para determinação da clorofila-*a*. Atualmente estas amostras de fitoplâncton estão sendo analisadas, e poderão corroborar para uma melhor interpretação dos resultados dos algoritmos em termos da composição da comunidade fitoplanctônica da região.

Assim como a clorofila-*a*, o coeficiente de atenuação foi subestimado pelos sensores VIIRS e MODIS neste trabalho. Al Kaabi et al. (2016) utilizaram também imagens nível 2 do sensor MODIS e janela de 6h para o Golfo da Arábia, e analisaram o algoritmo padrão do MODIS para o Kd490, além de outros dois algoritmos, um desenvolvido por Morel em 1988 usando a clorofila como medida de base para o cálculo e outro semi-analítico desenvolvido por Lee em 2005 visando melhorar o desempenho em águas costeiras, e todos superestimaram os valores de Kd490 para a região. O autor atribuiu este erro à reflexão de fundo em áreas rasas e à necessidade de melhor correção atmosférica principalmente devido à alta presença de aerossóis nesta região muito próxima a grandes desertos e por isto, sujeita a grandes nuvens de sedimentos, que podem atenuar a radiância na faixa do azul medida pelo sensor.

As relações observadas entre as diferentes razões de bandas azul/verde e a clorofila-*a* mostraram que melhores correlações são obtidas pela razão máxima 443>486/550 do sensor VIIRS (Tabela 5.7), neste caso a mesma utilizada pelo algoritmo padrão do VIIRS, sendo a única combinação possível para o VIIRS. Esse resultado está de acordo com o já observado anteriormente na avaliação do algoritmo global, em que fatores como melhor resolução espacial, localização mais precisa das bandas, menor erros de efemérides orbitais e tecnologia mais recente podem explicar o melhor desempenho.

Já para o MODIS, as análises mostraram que uma melhor correlação foi obtida quando utilizada a razão máxima entre 443>469>488/531 (Tabela 5.6), enquanto o algoritmo padrão do MODIS, OC3, utiliza a razão máxima 443>488/547. No caso do MODIS, essa diferença pode ser atribuída ao conjunto de dados avaliado, composto por águas mais costeiras, com maior presença de material em suspensão, as quais podem ter um comportamento um pouco diferente na região do verde que as águas do conjunto de dados global, utilizado para o desenvolvimento do OC3M.

Estes resultados apontam para a possibilidade de desenvolvimento de um algoritmo regional, que considere a utilização de uma diferente razão de bandas no caso do MODIS, ou apenas a utilização de coeficientes específicos, obtidos através de um conjunto de dados regional no caso do VIIRS. Esse algoritmo poderá ser proposto quando tivermos em mãos um maior conjunto de dados de clorofila-*a* superficial, através do qual será possível desenvolver o algoritmo, e um conjunto de dados independente, através do qual este algoritmo poderá ser avaliado.

## 7. Conclusão

Os resultados indicam um melhor desempenho para o sensor VIIRS tanto para a clorofila-*a* quanto para o coeficiente de atenuação da luz na água, na menor janela temporal entre os dados (12 horas), demonstrando ser uma boa ferramenta para o monitoramento da região. Como foi possível observar, outros componentes óticamente ativos na água podem ter interferido nas estimativas de clorofila-*a* e do coeficiente de atenuação da luz, e seria interessante realizar mais estudos para o possível desenvolvimento de um algoritmo regional. Uma melhor acurácia também poderia ser obtida com a utilização de imagens nível 1, e com correção atmosférica específica para a região, considerando as características atmosféricas e a presença de aerossóis marítimos.

Para o desenvolvimento de um algoritmo regional, será imprescindível um maior conjunto de dados, com amostras independentes para o desenvolvimento do algoritmo e avaliação do seu desempenho, obtidas em uma janela temporal menor.

Os resultados mostram que os algoritmos padrão do VIIRS podem fornecer informações com boa acurácia sobre a concentração de clorofila-*a* superficial e coeficiente de atenuação da luz na água, especialmente para este segundo parâmetro. Esta acurácia poderia ainda ser aumentada com o desenvolvimento de algoritmos regionais, os quais poderiam ser aplicados rotineiramente, de forma operacional, para o gerenciamento do ecossistema na qual a REBIO do Arvoredo está inserida, fornecendo indicadores de mudanças neste ecossistema, tanto naturais quanto provocadas pelo homem.

## 8. Bibliografia

AL KAABI, M.R.; ZHAO, J.; GHEDIRA, H. 2016. MODIS-Based Mapping of Secchi Disk Depth Using a Qualitative Algorithm in the Shallow Arabian Gulf. *Remote Sensing*, v.8, p.423.

AUSTIN, R.W.; PETZOLD, T.J. 1981. The Determination Of The Diffuse Attenuation Coefficient Of Sea Water Using The Coastal Zone Color Scanner. *Oceanography from Space*, New Yourk, U.S.A..

BARROSO, G.F.; LITTLEPAGE, J. 1998. Protocolo para análise de clorofila a e feopigmentos pelo método fluorimétrico. Vitória.

BAILEY, S.W.; WERDELL, P. J.A. 2006. Multi-sensor approach for the on-orbit validation of ocean color satellite data products. *Remote Sensing of Environment*, v.102, p.12–23.

BEGON, M.; TOWNSEND, C. R.; HARPER, J. L. 2006. *Ecology: from individuals to ecosystems*. 4th ed. Malden, MA : Blackwell Pub, 738p.

BENRENFELD, M. J.; FALKOWSKI, P. G. 1997. Photosynthetic Rates Derived From Satellite-Based Chlorophyll Concentration. *Limnology and Oceanography*, Upton, New York, v. 42, p.1-20.

BORDIN, L.; MACHADO, E. C.; CARVALHO, M.; FREIRE, A. S.; FONSECA, A. L. D. O. 2019. Nutrient and carbon dynamics under the water mass seasonality on the continental shelf at the South Brazil Bight. *Journal of Marine Systems*, v.189, p.22-35.

BRANDINI, F. P.; NOGUEIRA, M.; SIMIÃO, M.; CODINA, J. C. U.; NOERNBERG, M. A. 2014. Deep chlorophyll maximum and plankton community response to oceanic bottom intrusions on the continental shelf in the South Brazilian Bight. *Continental Shelf Research*, v.89, p.61-75.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L. 1981. Absorption Of Dissolved Organic Matter Of The Sea (Yellow Substance) In The UV And Visible Domains. *Limnology and Oceanography*, v. 26, p.43-53.

CALAZANS, D. (Org.). 2011. Estudos Oceanográficos: do Instrumental ao Prático. Ed. Textos, Pelotas, 462p.

CARVALHO, M.; CIOTTI, A. M.; GIANESELLA, S. M. F.; CORRÊA, F. M. P. S.; PRINOTTO, R. R. C. 2014. Bio-Optical Properties of The Inner Continental Shelf Off Santos Estuarine System, Southeastern Brazil, And Their Implications For Ocean Color Algorithm Performance. Brazilian Journal of Oceanography, v.62(2), p.71-87.

CASTRO, B. M.; LORENZETTI, J. A.; SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B. 2006. Estrutura termohalina e circulação na região entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). In: ROSSI-WONGTSHOWSKI, C. L.; MADUREIRA, L. S. (Org.). O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região Sudeste-Sul do Brasil. São Paulo: EDUSP, p.11-120

CLARKE, G. L.; EWING, G. C.; LORENZEN, C. J. 1970. Spectra of backscattered light from the sea obtained from aircraft as a measure of chlorophyll concentration. Science, v.167, p.1119-1121.

DARECKI, M.; STRAMSKI, D. 2004. An Evaluation Of MODIS And Seawifs Bio-Optical Algorithms In The Baltic Sea. Remote Sensing of Environment, v.89, p.326–350.

DOGLIOTTI A. I.; SCHLOSS, I. R.; ALMANDOZ, G. O.; GAGLIARDINI, D. A. 2009. Evaluation of Sea WiFS and MODIS chlorophyll-a products in the Argentinean Patagonian Continental Shelf (38° S–55° S). International Journal of Remote Sensing, v.30, p. 251-273.

ESA, European Space Agency. 2019. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments/meris>>. Acesso em: agosto de 2019.

GARCIA, C. A. E.; GARCIA, V. M. T., MCCLAIN, C. R. 2005. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans. Remote Sensing of Environment, v.95, p.125-137.

GARCIA, C. A. E.; GARCIA, V. M. T. 2008. Variability Of Chlorophyll-A From Ocean Color Images In The La Plata Continental Shelf Region. Continental Shelf Research, v.28, p.1568 – 1578.

GARRISON, T. 2010. Fundamentos de Oceanografia. 4<sup>a</sup> ed. Cengage Learning: São Paulo. 426 p.

GORDON, H. R.; MOREL, A. 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery — A review. Lecture notes on coastal and estuarine studies, New York: Springer-Verlag, 144 p.

GREG, W. W.; CASEY, N. W. 2007. Sampling biases in MODIS and SeaWiFS ocean chlorophyll data. Remote Sensing of Environment, v.111, p.25-35.

HOLM-HANSEN, O.; LORENZEN, C. J.; HOLMES, R. W., STRICKLAND, J. D. H. 1965. Fluorimetric Determination of Chlorophyll. Copenhagen.

IOCCG. 2000. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada, No. 3.

IOCCG. 2006. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada, No. 5.

JEFFREY, S. W.; HUMPHREY, G. F. 1975. New Spectrophotometric Equations for Determining Chlorophylls a, b, c1 and c2 in Higher Plants, Algae and Natural Phytoplankton, Biochemie und Physiologie der Pflanzen, v.167, p.191-194

JOHNSON, R.; STRUTTON, P. G.; WRIGHT, S. W., MCMINN, A.; MEINERS, K. M. 2013. Three improved satellite chlorophyll algorithms for the Southern Ocean. Journal of Geophysical Research, v.118, p.3694-3703.

KAMPEL, M.; GAETA, S. A.; LORENZETTI, J. A.; POMPEU, M.; RUDORFF, F. M.; FROUIN, R. J. 2007. Bio-Optical Variability in Coastal Waters of Southeast Brazil. Coastal Ocean Remote Sensing, v.6680.

KLEMAS, V. 2012. Remote sensing of coastal and ocean currents: an overview. Journal of Coastal Research, West Palm Beach (Florida), V.28(3), p.576–586

KWAITKOWSKA, E.; FARGION, G. 2002. Merger of Ocean Color Data from Multiple Satellite Missions within the SIMBIOS Project. Greenbelt.

LALLI, C. M.; PARSONS, T. R. 1993. Biological Oceanography: An introduction. 2<sup>a</sup> ed. Vancouver: Elsevier.

FREIRE, A. S.; VARELA, A. R. D.; FONSECA, A. L.; MENEZES, B. S.; FEST, C. B.; OBATA, C. S.; GORRI, C.; FRANCO, D.; MACHADO, E. C.; BARROS, G.; MOLESANI, L. S.; MADUREIRA, L. A. S.; COELHO, M. P.; CARVALHO, M.; PEREIRA, T. L. 2017. O Ambiente Oceanográfico. In: SEGAL, B.; FREIRE, A. S.; LINDNER, A.; KRAJEVSKI, J. P.; SOLDATELI, M. (Eds.), Monitoramento da Reserva Biológica Marinha do Arvoredo e Entorno (MAArE). 1. ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. p. 159–200.

MENEZES, B. S.; MACEDO-SOARES, L. C. P.; FREIRE, A. S. 2019. Changes in the plankton community according to oceanographic variability in a shallow subtropical shelf: SW Atlantic. *Hydrobiologia*, v.835, p.165-178.

MOREL, A.; PRIEUR, L. 1977. Analysis of variations in ocean colour. *Limnology and Oceanography*, v.22, p.709– 722.

MOREL, A.; BÉLANGER, S. 2006. Improved Detection Of Turbid Waters From Ocean Color Sensors Information. *Remote Sensing of Environment*, v.102, p.237–249

MUELLER, J. L.; BIDIGARE, R. R.; TREES, C.; BALCH, W. M.; DORE, J.; DRAPEAU, D. T.; KARL, D.; HEUKELEM, L. V.; PERL, J. 2003. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 5, Volume V: Biogeochemical and Bio-Optical Measurements and Data Analysis Protocols. Greenbelt, Maryland, 2003.

NASA, National Aeronautics and Space Administration. 2019a. Ocean Color Homepage. Disponível em: <<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: agosto de 2019.

NASA, National Aeronautics and Space Administration. 2019b. Terra & Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Disponível em: <<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/modis/>>. Acesso em: agosto de 2019.

NSIDC, National Snow& Ice Data Center. 2019. MODIS to VIIRS: Building a time series. Disponível em: <<https://nsidc.org/nsidc-monthly-highlights/2017/08/modis-viirs-building-time-series>>. Acesso em: Outubro de 2019.

O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B. G.; SIEGEL, D. A.; CARDER, K. L.; GARVER, S. A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C. 1998. Ocean Color Chlorophyll Algorithms For Seawifs, Journal Of Geophysical Research, v.103, N.C11, p. 24937-24953.

O'REILLY, J. E. *et al.* (mais de 20 autores) 2000. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3. NASA Technical Memorandum 2000–206892, v.11.

POOLE, H.H.; ATKINS, W.R.G. 1929. Photo-eletric measurements of submarine illumination throughout the year. Journal of Marine Biology Assessment of United Kingdom, v.16, p.297-324.

SCOR-UNESCO. 1966. Determination of photosynthetic pigments in seawater. Monographs on Oceanographic Methodology.