

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA E
GEOCIÊNCIAS**

Joceli Augusto Gross

**EFEITOS DE DIFERENTES COMPONENTES OPTICAMENTE
ATIVOS NA REFLECTÂNCIA DA ÁGUA PARA A ESTIMATIVA
REMOTA DAS CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA-A
FITOPLANCTÔNICA**

**Santa Maria, RS
2019**

Joceli Augusto Gross

**EFEITOS DE DIFERENTES COMPONENTES OPTICAMENTE ATIVOS NA
REFLECTÂNCIA DA ÁGUA PARA A ESTIMATIVA REMOTA DAS
CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA-A FITOPLANCTÔNICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Cassol

**Santa Maria, RS
2019**

GROSS, JOCELI AUGUSTO

EFEITOS DE DIFERENTES COMPONENTES OPTICAMENTE ATIVOS
NA REFLECTÂNCIA DA ÁGUA PARA A ESTIMATIVA REMOTA DAS
CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA-A FITOPLANCTÔNICA / JOCELI
AUGUSTO GROSS.- 2019.

172 p.; 30 cm

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Geografia e Geociências, RS, 2019

1. Reflectância 2. Fitoplâncton 3. Estimativa remota da
clorofila-a. I. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728. Todos os direitos autorais reservados. Não é permitida a reprodução integral ou parcial de qualquer item deste trabalho sem prévia autorização e/ou devida citação de autoria.

Joceli Augusto Gross

**EFEITOS DE DIFERENTES COMPONENTES OPTICAMENTE ATIVOS NA
REFLECTÂNCIA DA ÁGUA PARA A ESTIMATIVA REMOTA DAS
CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA-A FITOPLANCTÔNICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Geografia.

Aprovado em 30 de agosto de 2019:

**Roberto Cassol, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**

Ana Caroline Paim Benedetti, Dra. (UFSM)

Juçara Spinelli, Dra. (UFFS)

Maria Angelica Oliveira Linton, Dra. (UFSM)

Rafael Cabral Cruz, Dr. (UNIPAMA)

**Santa Maria, RS
2019**

AGRADECIMENTOS

Principalmente aos meus pais Nelvi Gross e Arlindo Gross e irmãos Jaqueline Eliane Franke, Cesar Moacir Gross, Magali Cristina Gross e Marlon Gross, pelo incentivo a realização do meu trabalho, sendo o mesmo dedicado a eles.

A Doutora Maria Angélica Oliveira Linton pelo acesso ao Laboratório de Ficologia, equipamentos e materiais.

Ao Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo empréstimo do espectrorradiômetro que possibilitou as medições radiométricas.

A todos meus amigos.

EPÍGRAFE

Um dia me disseram que a tecnologia moderna seria uma maravilha, porque poderíamos ver e ouvir em vários lugares ao mesmo tempo. Hoje eu tenho certeza disso, eu precisava de provas...

P. F.

RESUMO

EFEITOS DE DIFERENTES COMPONENTES OPTICAMENTE ATIVOS NA REFLECTÂNCIA DA ÁGUA PARA A ESTIMATIVA REMOTA DAS CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA-A FITOPLANCTÔNICA

AUTOR: Joceli Augusto Gross
ORIENTADOR: Roberto Cassol

A importância do monitoramento da comunidade fitoplanctônica e de variáveis relacionadas aos seus organismos constituintes, como a clorofila-a, é indubitável, devido à sua relação com a qualidade das águas, mas, ainda são necessários avanços acerca da representatividade das amostras, visando o reconhecimento de padrões espaciais e temporais da referida variável. Dados e técnicas de sensoriamento remoto têm sido referenciados como uma alternativa viável para suprir esta demanda. Por outro lado, a estimativa remota das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica ainda pode ser vista como um desafio, principalmente em corpos de água do caso dois, em grande parte devido aos efeitos dos diferentes componentes opticamente ativos sobre os dados de sensoriamento remoto, inclusive dos distintos organismos fitoplanctônicos. Algoritmos foram e estão sendo desenvolvidos para este propósito, dentre eles os modelos empíricos de uma única banda espectral obtidos em análises de regressão simples, apesar de esta técnica ser aplicável somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente, o que não ocorre em corpos de água do caso dois. Neste contexto, o objetivo geral do presente trabalho foi verificar a adequabilidade de modelos empíricos desenvolvidos por regressão simples para estimar a clorofila-a fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral e demonstrar que organismos fitoplanctônicos podem ser considerados distintos componentes opticamente ativos das águas. Para cumprir com o referido objetivo, organismos fitoplanctônicos classificados como *Cyanophyceae*, *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* foram isolados e cultivados, amostras de sedimentos inorgânicos foram processadas e geometrias de iluminação e de aquisição dos dados radiométricos foram determinadas e controladas para a realização de um experimento em nível laboratorial, que constou basicamente de medições da reflectância da água de um tanque, em distintos tratamentos relacionados aos componentes opticamente ativos presentes na mesma. As análises de correlação, regressão simples e o erro quadrático médio, mostraram que os modelos empíricos de uma única banda espectral, desenvolvidos por regressão simples, podem estimar erroneamente as concentrações de clorofila-a, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton, porque os organismos fitoplanctônicos cultivados promoveram variações distintas e inversas da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a e podem ser considerados distintos componentes opticamente ativos das águas. Na presença de sólidos suspensos inorgânicos os erros de estimativa podem ser ainda maiores, porque os efeitos aditivos desse componente sobre a variação da reflectância da água, não são subtraídos pelo modelo, mas sim considerados como sendo ocasionados por clorofila-a. Portanto, os modelos empíricos desenvolvidos por regressão simples a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral são inadequados para estimar clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água, mesmo porque, não há um único comprimento de onda das regiões de visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético que seja afetado somente pela variável independente clorofila-a, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton.

Palavras-chave: Reflectância. Fitoplâncton. Estimativa remota da clorofila-a.

ABSTRACT

EFFECTS OF DIFFERENT OPTICALLY-ACTIVE COMPONENTS ON THE REFLECTANCE OF WATER TO THE REMOTE ESTIMATION OF PHYTOPLANKTON CHLOROPHYLL-A

AUTHOR: Joceli Augusto Gross

ADVISOR: Roberto Cassol

The importance of monitoring phytoplankton communities and variables related to their constituents such as chlorophyll-a is undeniable due to its relation to the quality of the water. Even so, further improvements are necessary on the representativeness of the samples, aiming spatial and temporal pattern recognition of the given variables. Data and techniques of remote sensing have been mentioned as a viable alternative to supply this demand. In contrast, the remote estimation of phytoplankton chlorophyll-a concentration may still be seen as a challenge, mainly in bodies of water of case 2 classification, mostly due to the effects of different optically-active components on the sensing data, including the distinct phytoplankton organisms. For this purpose, algorithms were and currently are being developed. Among those, there are empirical models of a unique spectral band obtained in analysis of simple linear regression. However, this technique is only applicable when a single independent variable affects the dependent variable, which does not occur in bodies of water case 2 classification. Within this context, the general objective of the present work was to verify the adequacy of empirical models developed by simple linear regression to estimate phytoplankton chlorophyll-a from reflectance data in a unique spectral band and to demonstrate that phytoplankton organisms can be considered distinct optically-active components in the water. In order to meet this objective, phytoplankton organisms classified as Cyanophyceae, Euglenophyceae and Chlorophyceae were isolated and cultivated; samples of inorganic sediments were processed and geometries of illumination and acquisition of radiometry data were determined and controlled to perform this experiment in laboratory level, which consisted basically of water reflectance measurements in a tank, in distinct treatments related to the optically-active components present on it. The correlation analysis, simple linear regression and mean squared error, showed that the empirical models of a unique spectral band, developed by simple linear regression, may miscount the concentration of chlorophyll-a even when the water contains only phytoplankton, as the phytoplankton organisms cultivated have promoted distinct and reverse reflectance variation in relation to chlorophyll-a concentration variation and they may be considered distinct optically-active components in the water. In the presence of inorganic suspended solids the estimation errors may be even larger, as additive effects of this component on the reflectance of water variations are not subtracted by the model, but rather considered as being caused by chlorophyll-a. Therefore, the empirical models developed by simple linear regression from reflectance data of a single spectral band are inappropriate for estimating chlorophyll-a phytoplankton in bodies of water, as there is no single wavelength in the visible and infrared regions next to the electromagnetic spectrum that is affected only by the independent variable chlorophyll-a, even when there are only phytoplankton in the water.

Key-words: Reflectance. Phytoplankton. Remote estimation of chlorophyll-a.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectros de extinção, espalhamento e absorção da luz para um modelo de célula esférica de diferentes tamanhos e com três camadas concêntricas, para modelar as propriedades de espalhamento da luz pelo fitoplâncton marinho.....	43
Figura 2: Espectros de absorção de <i>Euglena gracilis</i>	45
Figura 3: Percentuais de reflectância da água contendo Cyanophyceae e Chlorophyceae.	46
Figura 4: Espectros de reflectância da superfície da água, considerando concentrações variadas de clorofila fitoplanctônica.....	48
Figura 5: Relação entre a reflectância da região do azul em 440 nm, do verde em 570 nm, do vermelho em 670 nm e borda do vermelho em 700 nm e as concentrações de clorofila total de representantes de quatro diferentes filos fitoplanctônicos.....	49
Figura 6: Variabilidade dos dados explicados pela predefinição do intervalo de tamanho das células do organismo dominante (Picoplankton (<2 µm); Ultraplankton (De 2 a 5µm), Nanoplankton (De 5 a 20 µm), Microplankton (>20 µm)).	51
Figura 7: Espectros de absorção, medidos em amostras de superfície da água contendo fitoplâncton na Bacia de Bedford (Nova Escócia – Canadá).....	52
Figura 8: Espectros de reflectância sobre quatro espécies de fitoplâncton cultivadas.	53
Figura 9: Espectros de reflectância modelados de diferentes espécies fitoplanctônicas.....	56
Figura 10: Coeficientes de absorção do produto da degradação do fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM).....	60
Figura 11: Concentrações de clorofila-a em relação à reflectância de 700 nm normalizada em 560 nm, para vários corpos de água. As relações entre a posição de pico de máxima reflectância em torno de 700 nm e a concentração de clorofila-a.	62
Figura 12: Fator de Reflectância Bidirecional para quatro concentrações de clorofila de <i>Chlorella vulgaris</i>	65
Figura 13: Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) para duas concentrações de clorofila (Chl) e nove combinações de matéria inorgânica particulada (MIP) e matéria orgânica dissolvida (MOD).....	66
Figura 14: Espectros de reflectância obtidos nos experimentos realizados por Han et al. (1994).....	67
Figura 15: Medidas de reflectância da água contendo sedimentos de solo argiloso e siltoso.	69
Figura 16: Razão de bandas 705 nm (NIR)/670 nm (red) e derivada de primeira ordem em 691 nm, em função de concentrações de clorofila-a.....	71
Figura 17: Reflectância da água clara e de água contendo fitoplâncton e a reflectância da água contendo fitoplâncton e várias concentrações de sedimentos inorgânicos em suspensão e os coeficientes de correlação (r) entre as variáveis	73
Figura 18: Espectros de absorção da radiação para águas costeiras da Bélgica, considerando os efeitos de partículas totais, componentes decorrentes do tripton e fitoplâncton.....	74
Figura 19: Diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por satélite (SeaWiFS-quatro algoritmos) versus a clorofila da superfície do mar medida in situ, para o período de verão.....	75
Figura 20: Diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por satélite (SeaWiFS-quatro algoritmos) versus a clorofila da superfície do mar medida in situ, para o período de inverno.....	76
Figura 21: Comportamento espectral da água, considerando uma concentração constante de Sólidos Inorgânicos em Suspensão e variações nas concentrações de Clorofila-a da espécie de fitoplâncton <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> (Cyanophyceae).	78
Figura 22: Curvas espectrais para distintas classes de água.	79
Figura 23: Modelo empírico para estimar clorofila-a (Chl-a) na Região próxima a confluência entre os rios Tapajós e Amazonas no período de cheia a partir da derivada da reflectância de primeira ordem em 691 nm dR_691 e teste de exatidão do modelo (Validação).	81

Figura 24: Geração de modelo de estimativa usando a primeira derivada da reflectância em 747 nm.	82
Figura 25: Comportamento espectral da água, contendo diferentes densidades de <i>Microcystis aeruginosa</i> .	83
Figura 26: Diagramas de dispersão entre concentrações de clorofila-a e reflectância da água no reservatório de Passo Real no Estado do Rio Grande do Sul.	84
Figura 27: Diagrama de dispersão entre as concentrações de clorofila-a e reflectância da Banda 2 de uma imagem do sensor RapidEye.	86
Figura 28: Modelo de regressão para valores de reflectância da banda 2 do sensor TM (Satélite Landsat 5) e clorofila fitoplanctônica.	87
Figura 29: Modelos de recuperação de Chl-a usando bandas OLI / Landsat-8 e considerando os índices espectrais (a) 2O e (b) SLO e bandas e índices MSI / Sentinel-2A e índices (c) 2MSI, (d) 3MSI, (e) NDCI e (f) SLMSI.	88
Figura 30: Amostras de clorofila-a extraídas para a leitura em espectrofotômetro (Fracos) e aspectos dos filtros (Fibra de vidro com poro de 0,7 µm) após a filtragem de amostras requerida no método espectrofotométrico.	95
Figura 31: Material inorgânico retirado das amostras de solo e diluídos em água destilada.	97
Figura 32: Sala escura em construção.	98
Figura 33: Espectros de reflectância coletados sobre o tanque de radiometria seco e contendo água limpa.	99
Figura 34: Geometria de aquisição e iluminação para a realização das medições radiométricas.	100
Figura 35: Aspecto interno da sala escura no decorrer das medições radiométricas.	101
Figura 36: Fotomicrografia (Aumento 400X) dos organismos fitoplanctônicos cultivados para a realização do presente trabalho.	108
Figura 37: Fotomicrografia de <i>Sphaerocavum sp.</i> (<i>Cyanophyceae</i>) (Aumento 400X).	109
Figura 38: Estantes para alocação das culturas de fitoplâncton.	110
Figura 39: Cultivo de <i>Sphaerocavum sp.</i> após mudança brusca de pH.	111
Figura 40: Experimento para ajuste de pH, amostra de campo e materiais utilizados nos cultivos de fitoplâncton.	112
Figura 41: Manutenção dos cultivos.	113
Figura 42: Cultivos em degradação.	114
Figura 43: Desenvolvimento de <i>Sphaerocavum sp.</i> em meio ASM1.	116
Figura 44: Cultivos de <i>Euglena sp.</i> (<i>Euglenophyceae</i>).	117
Figura 45: Fotomicrografia de <i>Euglena sp.</i> (<i>Euglenophyceae</i>) (Aumento 400X).	118
Figura 46: Fotomicrografia de <i>Euglena sp.</i> (<i>Euglenophyceae</i>) (Aumento 1000X).	120
Figura 47: Fotomicrografia de <i>Scenedesmus sp.</i> (<i>Chlorophyceae</i>) (Aumento 1000X).	121
Figura 48: Cepas de <i>Scenedesmus sp.</i> em isolamento.	122
Figura 49: Cultivos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>), <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena sp.</i>) e <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus sp.</i>) em caixas com capacidade de 68 litros.	124
Figura 50: Espectros de reflectância da água contendo os organismos fitoplanctônicos cultivados.	126
Figura 51: Variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a dos organismos cultivados.	127
Figura 52: Correlação entre a reflectância dos comprimentos de onda da faixa de 400 nm a 900 nm e as concentrações de clorofila-a dos organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum</i>), <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena</i>), <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus</i>), de composições aleatórias destes organismos e para todo o conjunto de dados constados na Figura 50.	129

Figura 53: Diagramas de dispersão entre as concentrações de clorofila-a de Cyanophyceae, Euglenophyceae, Chlorophyceae, composições destes organismos e equações de regressão para a estimativa das concentrações de clorofila-a.	130
Figura 54: Regressões entre concentrações de clorofila-a e a reflectância e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a em 715 nm	132
Figura 55: Regressões entre concentrações de clorofila-a e a reflectância e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância em 530 nm, 640 nm e 715 nm	133
Figura 56: Espectros de reflectância da água contendo concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos (SSI).	135
Figura 57: Aplicação do modelo gerado por análise de regressão simples a partir de dados coletados em água contendo somente organismos de Cyanophyceae (Figura 54a), sobre os dados de reflectância coletados em água contendo apenas sólidos suspensos inorgânicos (SSI) (Figura 56).	136
Figura 58: Espectros de reflectância da água contendo uma concentração constante de clorofila-a (Chl-a = 7,67 mg/m ³) e concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos (SSI).	137
Figura 59: Regressões simples entre concentrações de clorofila-a e a reflectância e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância da Figura 58, em 715 nm	138
Figura 60: Espectros de reflectância de águas contendo concentrações variadas de clorofila-a de Cyanophyceae (Sphaerocavum sp.) e sólidos suspensos inorgânicos (SSI).	140
Figura 61: Regressões simples entre concentrações de clorofila-a e a reflectância e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância da Figura 60 em 715 nm.	142
Figura 62: Espectros de reflectância coletados sobre diferentes condições da água, relacionadas às combinações de concentração dos componentes opticamente ativos.	143
Figura 63: Correlação entre a reflectância dos comprimentos de onda da faixa de 400 nm a 900 nm coletados sobre diferentes condições das águas e as concentrações de clorofila-a verificadas nos dados das Figuras 62a, 62b, 62c e para todo o conjunto de dados da Figura 62.	144
Figura 64: Estimativa das concentrações de clorofila-a sobre distintas condições das águas.	145
Figura 65: Correlação entre clorofila-a e reflectância em diferentes condições das águas.	146
Figura 66: Estimativa das concentrações de clorofila-a sobre distintas condições das águas.	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Grupos fitoplancônicos, pigmentos associados e cores predominantes.	37
Tabela 2: Tratamentos referentes aos componentes opticamente ativos presentes na água do tanque para a efetuação das medições de reflectância.	91
Tabela 3: Soluções do meio de cultura ASM1.	93
Tabela 4: Soluções do meio de cultura <i>Euglena sp.</i> e preparação de 1 litro de meio <i>Euglena sp.</i>	94
Tabela 5: Condições de cultivo.	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 Objetivo geral.....	29
1.2 Objetivos específicos.....	29
1.3 Estrutura do trabalho	29
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 O Fitoplâncton e a comunidade fitoplanctônica.....	31
2.2 Fitoplâncton e o meio ambiente aquático.....	33
2.3 Os pigmentos fitoplanctônicos	36
2.4 A Reflectância e conceitos relacionados	38
2.5 Efeitos de componentes opticamente ativos sobre dados de sensoriamento remoto para a estimativa das concentrações de clorofila fitoplanctônica	41
2.5.1 Efeitos do fitoplâncton e seus organismos constituintes	42
2.5.2 Efeitos da mistura de componentes opticamente ativos e técnicas de análise e modelagem	57
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	91
3.1 Cultivos de fitoplâncton	92
3.2 Determinação das concentrações de clorofila-a	95
3.3 Sólidos suspensos inorgânicos	96
3.4 Medições radiométricas.....	97
3.5 Volumes das alíquotas (Clorofila-a e sólidos suspensos inorgânicos).....	102
3.6 Sequência de uma medição radiométrica para um tratamento	103
3.7 Análise estatística.....	104
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
4.1 Caracterizações dos organismos e observações nos cultivos de fitoplâncton	107
4.2 Análises da reflectância da água em função de componentes opticamente ativos para a estimativa das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica	124
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	149
6.1 Análises espectrais	150
6.2 Considerações relacionadas à finalidade da pesquisa	154
REFERÊNCIAS	157

1. INTRODUÇÃO

A importância do monitoramento da comunidade fitoplanctônica e de variáveis relacionadas aos seus organismos constituintes, como a clorofila-a, é indubitável, devido às suas relações com a qualidade das águas (RICHARDSON, 1996; ESTEVES, 1998; CARVALHO, 2003; BELINGER et al. 2006; PADISÁK et al. 2006). No entanto, ainda são necessários avanços a cerca da representatividade das amostras, visando o reconhecimento de padrões espaciais e temporais desta variável (BOZZELI & HUSZAR, 2003), o que em extensas lâminas de água, como os grandes reservatórios brasileiros, fica comprometido devido ao maior número de recursos humanos, técnicos e financeiros exigidos.

Neste sentido, os dados e técnicas de Sensoriamento Remoto são referenciados como uma alternativa viável para suprir esta demanda, permitindo uma visão sinótica dos corpos de água, facilitando o mapeamento dos mesmos e a definição de áreas representativas para a coleta de amostras (LONDE et al., 2005). Apesar destas facilidades, a referenciada estimativa remota das concentrações de clorofila fitoplanctônica, por exemplo, a partir de dados de reflectância de sensores orbitais, ainda pode ser vista como um desafio, principalmente em corpos de água do Caso II¹, tanto interiores como oceânicos.

Segundo Zheng & Di Giacomo (2017), não há algoritmos universalmente aceitos para derivar com precisão a clorofila-a fitoplanctônica em águas costeiras oceânicas (Águas do Caso II), utilizando-se de dados de reflectância de sensoriamento remoto. Klemas (2012) ressalta que devido à complexidade óptica das águas do Caso II, detectar a composição e a concentração do seu conteúdo é difícil mesmo com a utilização de dados hiperespectrais.

As águas costeiras oceânicas do Caso II são altamente produtivas, onde os materiais em suspensão não clorofilados, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) variam em tipologia e concentrações dentro de pequenas áreas e em curtos períodos de tempo. Todos estes materiais vivos ou não vivos modificam a radiação emergente detectada pelos sensores remotos. A dificuldade de recuperar as variáveis das águas do Caso II está no efeito confuso ou sobreposto das mesmas nos dados espectrais. A recuperação das concentrações de clorofila torna-se difícil neste tipo de água, onde o sinal de pequenas quantidades deste pigmento fitoplanctônico é sobreposto ou “mascarado” pelos efeitos de partículas não clorofiladas e matéria orgânica dissolvida, que variam significativamente e independentemente das concentrações de clorofila. A não linearidade do sistema aquático impede a utilização de um único algoritmo para a recuperação remota das variáveis

¹ Águas caracterizadas pela presença de outras substâncias ou partículas além do fitoplâncton (GOORDON et al., 1988).

ópticamente ativas deste tipo de água (FISCHER et al., 1986; SATHYENDRANATH et al., 1989)

Em águas do Caso II interiores, a complexidade óptica se equivale às águas costeiras oceânicas, apesar de serem ambientes aquáticos distintos. Segundo Palmer et al. (2015) as águas interiores são tipicamente caracterizadas por altas concentrações de biomassa fitoplanctônica, partículas minerais, detritos e matéria orgânica dissolvida que normalmente não covariam no tempo e espaço dos corpos de água, ou seja, variam independentemente como também salientaram Sathyendranath et al. (1989) para as águas costeiras oceânicas. Além disso, as propriedades ópticas das águas interiores são altamente variáveis, entre e mesmo dentro dos corpos de água. Essas questões complicam o desenvolvimento de algoritmos para a estimativa de variáveis relacionadas ao fitoplâncton e tipicamente limitam sua aplicabilidade entre diferentes corpos de água. Somando-se a isso, os fatores como os efeitos atmosféricos e de adjacência, são desafios adicionais para a detecção remota dos componentes das águas interiores.

Além dos demais *componentes ópticamente ativos*², deve ser destacado que o fitoplâncton é constituído por cerca de cento e cinquenta mil espécies conhecidas (GUIRY & GUIRY, 2019), ou seja, é constituído de uma gama de organismos com diferentes características filogenéticas e não pode ser considerado constante, em termos de sua influência no comportamento espectral da água. As características de absorção da radiação eletromagnética de determinada espécie podem variar de acordo com as condições de crescimento e as mudanças na composição da comunidade fitoplanctônica tem o potencial de modificar os coeficientes específicos da clorofila, portanto, a reflectância, introduzindo incertezas em algoritmos desenvolvidos para a recuperação das concentrações deste tipo de pigmento fitoplanctônico, a partir de dados de sensores remotos (KIEFER, 1986; NAIR, et al. 2008), ou seja, quando os algoritmos são aplicados sem as *referências de campo*³ as incertezas são maximizadas.

Duas espécies de fitoplâncton com a mesma composição de pigmentos e com o mesmo espectro de absorção da radiação ao nível do tilacóide, porém, com formas de vida distintas, não terão o mesmo espectro de absorção *in vivo*. As duas espécies *in vivo*, podem proporcionar espectros com feições espectrais nos mesmos comprimentos de onda, ou seja, as formas dos espectros podem ser praticamente iguais, no entanto, as magnitudes dos valores de absorção e o coeficiente de absorção específico por unidade de pigmento em qualquer

² Toda a substância que pode afetar a absorção ou espalhamento da água pura (NOVO, 2001; POZDNYAKOV & GRASSL, 2003).

³ Amostras de campo. Concentrações dos componentes ópticamente ativos que se pretende estimar remotamente (Ex: concentrações de clorofila-a).

comprimento de onda podem ser significativamente distintos. Isso ocorre porque o espectro de absorção do fitoplâncton *in vivo*, é determinado pelo tamanho e forma dos cloroplastos, células ou colônias, bem como pela composição de pigmentos (KIRK, 1976; 1983), ou seja, as diferenciadas características filogenéticas dos organismos fitoplanctônicos influenciam a resposta espectral da água, como também salientaram Kutser et al. (2006) para a densidade de células, Gitelson et al. (1999) para a morfologia e fisiologia celular e Green et al. (2003) para o tamanho e estrutura dos organismos fitoplanctônicos.

De acordo com Quibell (1992), a reflectância da água pode diferir entre espécies de fitoplâncton para qualquer concentração de clorofila. Mudanças na composição de espécies, consequentemente, poderiam requerer o desenvolvimento de novas relações empíricas entre a radiação e as concentrações de clorofila, sendo necessários modelos específicos sobre cada espécie para estimar este tipo de pigmento fitoplanctônico. Segundo o pesquisador, os modelos empíricos gerados por análise de regressão simples não poderiam ser aplicados sobre um corpo de água para a estimativa das concentrações de clorofila, na ocorrência de variações na composição de espécies fitoplanctônicas. Constatação similar a de Quibell (1992) foi destacada por Gitelson et al. (1999) que verificou em análises de regressão simples, variações da reflectância significativamente distintas em função das variações nas concentrações de clorofila de organismos de diferentes filos fitoplanctônicos.

De fato, muitos algoritmos foram e estão sendo desenvolvidos para a estimativa das concentrações de clorofila fitoplanctônica em corpos de água, dentre eles se destacam os modelos empíricos desenvolvidos por análise de regressão simples a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral, devido à facilidade de desenvolvimento e aplicação, sendo os mesmos desejáveis para uso nos grandes corpos de água brasileiros, exigindo o mínimo de recursos técnicos, humanos e financeiros. No entanto, segundo Downing & Clark (2007) a regressão simples é aplicável somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente, o que contrapõe o uso dos referidos modelos para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a, porque a reflectância da água é afetada por diversos componentes opticamente ativos ou variáveis independentes que não covariam no tempo e espaço como salientaram Fischer et al., (1986), Sathyendranath et al., (1989) Palmer et al., (2015) e, além disso, mudanças na composição de espécies fitoplanctônicas impediria o uso de modelos desenvolvidos por esta técnica (QUIBELL, 1992), que, porém, ainda estão sendo considerados para estimar clorofila-a em corpos de água, inclusive do Caso II interiores (Ex: HAN & JORDAN, 2005; KULKARNI, 2011; FORRER, 2012; NI et al,

2014; LAILI et al., 2015; LIN et al., 2016; WANG et al., 2017; WATANABE et al., 2017; DE CASTRO et al., 2018).

Neste contexto, verificam-se contradições. Por um lado temos nos dias atuais publicações, inclusive de periódicos renomados, em que são desenvolvidos e aplicados os modelos de regressão simples para estimar clorofila fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral, sem maiores questionamentos sobre a adequabilidade dos mesmos e, frente a isso se entende que os referidos modelos de estimativa são adequados para o propósito de estimar remotamente a clorofila fitoplanctônica. Por outro lado, os conhecimentos em sensoriamento remoto, acumulados nos mais de cinquenta anos de desenvolvimento desta ciência e os conhecimentos relacionados à regressão simples, seus pré-requisitos para a aplicação, indicam que os referidos modelos não são adequados para o propósito de estimar clorofila a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral, portanto, este tipo de modelagem para estimar remotamente a clorofila fitoplanctônica deveria ter sido testada quanto a sua adequabilidade, o que ainda não foi realizado, ou seja, ainda não houve pesquisas com este foco, o que se trata da finalidade do presente trabalho.

Frente a tais contradições o presente trabalho questiona a adequabilidade dos modelos empíricos desenvolvidos por análise de regressão simples para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral e neste contexto, o fitoplâncton como um único componente opticamente ativo da água. A partir destes questionamentos, as seguintes hipóteses foram testadas:

Um modelo empírico desenvolvido por análise de regressão simples para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a, a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral estimará concentrações de clorofila-a para qualquer valor ou variações da reflectância da água, independentemente se os mesmos forem ocasionados por clorofila-a ou não e, portanto, são inadequados para estimar remotamente as concentrações de clorofila-a, mesmo em águas dominadas por fitoplâncton, porque organismos fitoplanctônicos de diferentes classificações podem promover variações distintas e inversas da reflectância em função das variações de suas concentrações de clorofila-a e serem considerados distintos componentes opticamente ativos das águas.

Segundo Londe (2008) a falta de informações sobre o comportamento espectral da água, contendo os variados componentes opticamente ativos em condições controladas de iluminação e medição é uma das limitações para a aplicação de técnicas de sensoriamento

remoto em pesquisas sobre sistemas aquáticos, portanto, são necessários. Entende-se que os experimentos controlados em sensoriamento remoto das águas, em nível de laboratório, além de fornecer informações sobre a resposta espectral dos diferenciados componentes opticamente ativos, podem ser facilmente replicados, possibilitando a outros pesquisadores a verificação ou mesmo a refutação das informações constadas em trabalhos de pesquisa que os utilizam para a comprovação de suas hipóteses, conseqüentemente responder a questão problema.

1.1 Objetivo geral

Verificar a adequabilidade dos modelos empíricos desenvolvidos por regressão simples para estimar clorofila-a fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral e o fitoplâncton como componente opticamente ativo das águas.

1.2 Objetivos específicos

- Verificar as variações da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a de distintos organismos fitoplanctônicos, isolados e em composições;
- Desenvolver e aplicar modelos empíricos por regressão simples para estimar clorofila-a fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral sobre diferentes condições das águas no que se refere às concentrações de componentes opticamente ativos;
- Contribuir com as pesquisas em sensoriamento remoto no que se refere aos efeitos de diferentes componentes opticamente ativos sobre a reflectância da água para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica.

1.3 Estrutura do trabalho

No primeiro item, ou seja, na introdução, é apresentada a justificativa para a realização do presente trabalho, ressaltando a importância e as dificuldades no que se refere à estimativa remota das concentrações de clorofila-a e algumas contradições no que se refere à utilização de modelos empíricos desenvolvidos por análise de regressão simples para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral. Além disso, deixa-se claro o problema de pesquisa, hipóteses que nortearam a pesquisa e a finalidade do presente trabalho.

O segundo item se refere à revisão de bibliografia, em que primeiramente alguns conhecimentos e conceitos relacionados ao fitoplâncton e a reflectância são apresentados, pois se tratam das principais variáveis analisadas em experimentações do presente trabalho. Posteriormente discutem-se os efeitos de componentes opticamente ativos sobre dados de sensoriamento remoto, em que é dada ênfase nos fatores que impedem a aplicação da regressão simples para desenvolver modelos de estimativa remota das concentrações de clorofila-a a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral, tendo como base o que se entende ser o principal pré-requisito de aplicação da análise de regressão simples, ou seja, a regressão simples é aplicável somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente.

O terceiro item trata dos procedimentos metodológicos, em que é apresentado o experimento necessário para a obtenção dos resultados e a comprovação das hipóteses deste trabalho.

No quarto item e adentrando aos resultados do trabalho, primeiramente são apresentados os resultados referentes aos cultivos de fitoplâncton necessários para a realização do presente trabalho, sendo neste contexto realizadas discussões, relacionando aspectos dos organismos fitoplanctônicos às pesquisas em sensoriamento remoto das águas. Seguindo no quarto item os resultados e discussões focam exclusivamente na comprovação das hipóteses do trabalho, ou seja, adentram-se as análises espectrais.

O último item se trata das considerações finais, em que se expõe a comprovação das hipóteses e outras constatações verificadas nos resultados. Além disso, em um subitem das considerações finais a finalidade do trabalho e alguns questionamentos são ressaltados frente aos resultados do presente trabalho e as hipóteses comprovadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica foi dividida em cinco subitens. Os três primeiros abordam de maneira breve conceitos relacionados à comunidade fitoplanctônica, ao fitoplâncton e o meio ambiente aquático, além das pigmentações e outras características fundamentais dos organismos que compõe o fitoplâncton. O quarto subitem aborda a reflectância e alguns conhecimentos acerca das medições desta grandeza radiométrica e às variações da mesma devido a diferentes fatores.

O quinto subitem foi elaborado com ênfase nos efeitos dos componentes opticamente ativos das águas sobre os dados de sensoriamento remoto, especialmente o fitoplâncton e seu pigmento mais abundante, ou seja, a clorofila-a, sendo este o subitem mais abrangente devido a sua importância para a realização do presente trabalho. Este subitem está dividido em duas partes, que seguem determinada ordem cronológica, referente aos períodos de publicação dos trabalhos de pesquisa citados. São abordados os conhecimentos adquiridos e expostos em pesquisas relacionadas ao sensoriamento remoto das águas, publicadas a partir da década de 1970 até os dias atuais, tanto para águas continentais como oceânicas, o que evidencia, de maneira geral, o desenvolvimento do sensoriamento remoto das águas. A busca por publicações de longa data se fez necessária, a partir da constatação de que muitos dos conhecimentos adquiridos há décadas passadas elucidam questões acerca da adequabilidade dos modelos de regressão simples para estimativa da clorofila a partir da reflectância de uma única banda espectral, os quais, aliás, ainda estão sendo desenvolvidos para estimar clorofila fitoplanctônica. Neste contexto, a finalidade da presente pesquisa é trabalhada, tendo como base os pré-requisitos de aplicação da regressão simples para expor as contradições no que se refere à adequabilidade dos referidos modelos de estimativa da clorofila fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral. Além disso, destaca-se que os conhecimentos de outras áreas das ciências ajudaram para um melhor entendimento das questões levantadas acerca da temática.

2.1 O Fitoplâncton e a comunidade fitoplanctônica

O fitoplâncton tem sua importância em ambientes aquáticos por formar juntamente com as macrófitas aquáticas e o perifiton o nível de base da cadeia trófica aquática, ou seja, os produtores primários. Neste sentido, como fixadores de carbono e geradores de biomassa, os organismos fitoplanctônicos formam um dos três grandes grupos de organismos fotossintéticos dentro do ambiente aquático. Distinguem-se das plantas superiores

(macrófitas) em termos de tamanho e taxonomia, e de bactérias fotossintéticas em termos de bioquímica. As bactérias fotossintéticas são anaeróbias rigorosas e não evoluem o oxigênio como parte do processo fotossintético. (BELLINGER, 2010).

O fitoplâncton é constituído de organismos microscópicos adaptados a viver parte ou todo o seu ciclo de vida na massa de água (REYNOLDS, 2006), geralmente águas lânticas, como lagos e reservatórios (WETZEL, 1975). O termo comunidade fitoplanctônica esta relacionado aos agrupamentos de espécies e populações que vivem juntas no espaço e tempo, conectadas por suas relações ecológicas. Uma comunidade pode ser definida em qualquer escala dentro de uma hierarquia de habitats, dependendo do tipo de questão. Se a comunidade for espacialmente definida, ela incluirá todas as populações dentro de suas fronteiras (PERONI & HERNÁNDEZ, 2011).

A determinação da composição da comunidade fitoplanctônica pode produzir informações importantes sobre a qualidade das águas, como a distribuição de algas produtoras de toxinas, ciclagem biogeoquímica aquática e eutrofização. Isso se deve à sensibilidade dos organismos fitoplanctônicos às modificações nas características químicas e físicas dos ambientes aquáticos, especialmente em relação à temperatura e às concentrações de nutrientes, como o fósforo e nitrogênio, o que pode resultar em mudanças significativas na composição da comunidade fitoplanctônica. Essas mudanças podem surtir efeitos ambientais graves, especialmente quando acompanhadas por aumentos significativos de biomassa (RICHARDSON, 1996; LOBO et al., 2004; POTAPOVA & CHARLES, 2005; BELLINGER, et al., 2006).

Um dos problemas relacionados ao aumento da biomassa fitoplanctônica é o desenvolvimento de florações de *Cyanophyceae* (algas azul-esverdeadas ou cianobactérias), fixadoras de nitrogênio. As florações destes organismos são tradicionalmente consideradas como indicadores da deterioração da qualidade das águas, em grande parte devido à produção de toxinas e comumente associadas ao aporte de nutrientes provindos de esgotos urbanos e do escoamento das águas de precipitação pluvial sobre as áreas agrícolas. Como essas florações são muitas vezes uma fonte de nutrientes adicionais (nitrogênio fixo) para os ecossistemas aquáticos, o desenvolvimento das florações agrava ainda mais o problema (RICHARDSON, 1996).

As toxinas produzidas por organismos de *Cyanophyceae* podem resultar em diversos problemas de saúde, como reações alérgicas, desordens gastrointestinais, além de problemas do fígado e formação de tumores. Essas toxinas não são removidas pelos tratamentos de água convencionais (PITTOIS et al. 2001). Em 1996 análises confirmaram a presença de

microcistina e cilindrospermopsina em carvão ativado para a purificação da água utilizada em uma clínica para o tratamento de pacientes renais crônicos, na cidade de Caruaru (PE). Além disso, em amostras de sangue e fígado dos pacientes foi verificada a presença de microcistinas. Dos 130 pacientes em tratamento 60 morreram após a intoxicação (FUNASA, 2003).

Outro problema relacionado ao fitoplâncton e a qualidade das águas é o desenvolvimento significativo de organismos do gênero *Ceratium* (*Dinophyceae*) em ambientes aquáticos interiores. Estes organismos não são considerados tóxicos como determinados gêneros de *Cyanophyceae*, no entanto, registros de condições anóxicas da água devido às florações dos mesmos, têm sido realizados em ambientes marinhos na África do Sul, onde foram reportadas mortes de lagostas em função dos eventos de florações. Além disso, mortandades de peixes foram verificadas no Canadá (NICHOLLS et al., 1980) e Argentina (BAZÁN et al., 2007) em ambientes de água doce.

As menções referentes aos organismos do gênero *Ceratium* ocorriam comumente no Hemisfério Norte e muito pouco no Sul (MARGALEF, 1983; MEICHTRY et al., 2014). No entanto, a partir da década de 1990, ocorrências destes organismos vem sendo registradas na América do Sul e África (GUERRERO & ECHENIQUE, 1997; GINKEL et al., 1999; SILVA et al., 2012). A espécie *Ceratium hirudinella* (O. F. MÜLLER – Schrank) foi verificada em grandes densidades de organismos em ambientes aquáticos eutróficos na Argentina (CLAPS & ARDOHAIN, 2007; BAZÁN et al., 2007), Austrália (WHITTINGTON et al., 2000) e Espanha (PÉREZ-MARTÍNEZ & SÁNCHEZ-CASTILLO, 2001).

No Brasil, o primeiro registro da ocorrência de *Ceratium* foi realizado por Ferrareze & Nogueira (2006) no Rio Paranapanema na divisa entre os Estados do Paraná e São Paulo. A partir de então, estes organismos foram verificados em ambientes aquáticos no Semiárido Nordeste (OLIVEIRA et al., 2011), nos Estados do Paraná e Rio Grande do Sul (CAVALCANTE et al., 2013), e florações dos mesmos nos Estados de São Paulo (MATSUMURA-TUNDISI, 2010), Minas Gerais (SILVA et al. 2012) e Rio Grande do Sul (CASSOL, 2014).

2.2 Fitoplâncton e o meio ambiente aquático

Os organismos fitoplanctônicos constituem-se em elementos importantes para as avaliações referentes às condições ambientais (ESTEVEZ, 1998). Estes tipos de organismos

respondem rapidamente as mudanças no seu meio de vivência, principalmente em relação às alterações na disponibilidade de luz e de nutrientes (Fósforo e Nitrogênio). A sua estrutura e dominância podem ser modificadas por períodos muito curtos em função de sua rápida taxa de crescimento, que em alguns casos pode ser menor que vinte e quatro horas. A sucessão de espécies pode ocorrer em um período de algumas semanas (REYNOLDS et al., 1984).

Devido à alta diversidade taxonômica dos organismos fitoplanctônicos, uma comunidade fitoplanctônica contém classes e conseqüentemente gêneros e espécies coexistindo, sendo as variações dependentes das condições do ambiente aquático e das necessidades fisiológicas dos organismos. Neste sentido, se a comunidade pode ser definida como um agrupamento de espécies que vivem juntas no espaço e tempo e conectadas por suas relações ecológicas (PERONI & HERNÁNDEZ, 2011), a composição da comunidade fitoplanctônica pode ser diferenciada no tempo e espaço de um corpo de água, devido às modificações em relação às variáveis físicas e químicas como a luz, temperatura e regime de nutrientes. Estas modificações podem não favorecer a determinados organismos, mas, no entanto, gerar condições ideais para o domínio de outros (WETZEL, 1993).

Na busca pelos recursos necessários para a sobrevivência os organismos fitoplanctônicos podem passar por adaptações, a depender das modificações ocorridas em um meio aquático. Estas adaptações se relacionam em grande parte às suas características morfológicas (REYNOLDS et al. 2002; WEITHOFF 2003; FINKEL et al. 2010; KRUK et al. 2010).

As formas dos organismos podem ser robustas como as esféricas, cilíndricas, elípticas e outras podem ser achatadas, alongadas ou exibirem complexas ornamentações. Em relação aos tamanhos dos organismos fitoplanctônicos, as unidades de volume podem variar de oito a nove ordens de magnitude a partir de organismos de *Cyanophyceae* unicelulares com $\sim 1\mu\text{m}^3$ até grandes colônias de *Microcystis* (*Cyanophyceae*) com 1mm de diâmetro ($>109\mu\text{m}^3$ em volume) (REYNOLDS, 2006; BRASIL & HUSZAR, 2011).

Segundo Margalef, (1978) e Reynolds, 1980, as condições do ambiente aquático, como a disponibilidade de nutrientes ou outros recursos como a luz, além da estrutura física, escoamento hidráulico, sedimentação e herbivoria, podem determinar quais organismos ocorrerão em determinado lugar no ambiente aquático, em termos espaciais e temporais. As condições do ambiente aquático seriam filtros, gerando ambientes favoráveis a grupos de organismos com características adaptativas similares, como as formas e tamanhos (REYNOLDS 1988), mas que, no entanto, podem ou não ser relacionadas filogeneticamente.

As formas e tamanhos dos organismos fitoplanctônicos inserem-se nos denominados Grupos Funcionais Baseados na Morfologia (GFBM) do fitoplâncton, do inglês "*Morphologically Based Functional Group*", sendo estes uma classificação de organismos fitoplanctônicos desenvolvida por Kruk et al. (2010) denominada de Classificação Funcional Baseada na Morfologia (CFBM). Os autores ressaltam que os GFBM podem ser bem mais relacionados com as condições ambientais do ecossistema aquático do que os grupos filogenéticos, como ressaltou Pacheco et al. (2010) sobre a eficiência desta classificação em prever o estado trófico de lagos.

A classificação dos grupos funcionais baseados na morfologia do fitoplâncton leva em conta nove traços morfológicos: máxima distância linear; volume, área superficial; razão superfície/volume; presença de mucilagem, flagelos, aerótopos, heterocitos e demanda por sílica, além disso, considera as formas de vida dos organismos (colonial, filamentosos, unicelular livre). Uma das vantagens desta classificação é que os traços funcionais são facilmente mensuráveis e, além disso, esse sistema de classificação não requer conhecimento de traços fisiológicos das espécies, condicionamento ambiental ou afiliação taxonômica, de maneira que organismos de classes filogenéticas diferentes podem fazer parte de um mesmo grupo funcional (BRASIL & HUSZAR, 2011; KRUK, et al. 2010).

Um dos recursos essenciais para o fitoplâncton, além dos nutrientes, é a luz. A distribuição deste recurso em ecossistemas aquáticos é heterogênea e fortemente atenuada, devido às condições do meio aquático em relação às substâncias dissolvidas e material particulado em suspensão, incluindo o próprio fitoplâncton (KIRK, 1994). Tundisi & Tundisi (2008) ressaltaram que o coeficiente de atenuação da radiação na coluna de água é dominado pelo Tripton (matéria orgânica morta), quando as concentrações de clorofila-a estão abaixo de 20 mg/m³. Por outro lado, quando as concentrações de clorofila-a forem superiores aos mencionados 20 mg/m³ o coeficiente de atenuação da radiação na coluna de água é dominado pela clorofila.

Os organismos fitoplanctônicos possuem um conjunto de traços funcionais que garantem a captura da luz e a utilização eficiente da mesma em diferentes comprimentos de onda, dentro da faixa que utilizada pelos referidos organismos para a fotossíntese (400 a 700 nm), usualmente referida como radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Esses traços funcionais podem ser vistos como adaptações dos organismos, são mecanismos que permitem maior eficiência na captura da luz mesmo em baixos níveis de irradiação, sendo um destes mecanismos, o aumento do número de centros de captação da luz, onde a clorofila é um elemento essencial (BRASIL & HUSZAR, 2011).

Neste sentido, a distorção das formas permite aos organismos fitoplanctônicos utilizarem baixas intensidades de luz. A forma esférica, por exemplo, é limitada pela superfície mínima possível, sendo que sua distorção aumentará a área superficial para o mesmo volume, e conseqüentemente aumentará a razão superfície/volume, ou seja, as algas fitoplanctônicas que apresentam maior razão superfície/volume são mais tolerantes a ambientes aquáticos com condições limitantes de luz (NASELLI-FLORES & BARONE, 2007).

Neste sentido, os organismos com maior atenuação da forma tem maior flexibilidade para garantir suas eficiências de crescimento dependente de luz, ou seja, são melhores receptores de luz, pelo menos quando orientados corretamente no campo do fluxo de fótons (REYNOLDS, 1997; NASELLI-FLORES & BARONE, 2007). As cadeias filamentosas de *Oscillatoriales* (*Cyanophyceae*) e os organismos filamentosos de *Cylindrospermopsis racborkii* (*Cyanophyceae*) são exemplos de eficiência na captura de luz, ou mesmo, adaptação à sombra (PADISÁK & REYNOLDS, 1998). Por outro lado, outras espécies necessitam e toleram altas intensidades de luz, como por exemplo, as *Cyanophyceae Anabaena*, *Aphanizomenon* e *Microcystis* (PADISÁK, 2003).

Outras adaptações ou traços morfológicos, como flagelos e aerótopos permitem aos organismos selecionarem condições ótimas de luz na coluna de água para a realização da fotossíntese (KRUK et al., 2010). Além disso, a adaptação fisiológica dos organismos fitoplanctônicos relacionada ao aumento dos pigmentos fotossintéticos acessórios, permitem aos mesmos desenvolverem-se em ambientes limitados por luz. Esses pigmentos aumentam a faixa de amplitude do espectro luminoso que pode ser utilizado, o que permite aos organismos absorver a radiação em outros comprimentos de onda, além daqueles relacionados à clorofila (FALKOWSKI & RAVEN 2007).

2.3 Os pigmentos fitoplanctônicos

A clorofila é o pigmento em maior quantidade nos organismos fitoplanctônicos, estando relacionada à biomassa dos mesmos. Todos os organismos fotossintéticos que produzem oxigênio (todas as algas, todas as plantas superiores e dois grupos de bactérias fotossintéticas (*Cyanophyceae* e *Prochlorofitas*) contêm clorofila. No entanto, outros pigmentos também são encontrados no fitoplâncton, se dividindo em três categorias, sendo elas as clorofilas, os carotenoides e as ficobiliproteínas (KIRK, 2011; BUKATA et al., 2000; NOVO, 2010; RUDORFF, 2006), conforme Tabela 1.

Tabela 1: Grupos fitoplanctônicos, pigmentos associados e cores predominantes.

Grupos fitoplanctônicos	Clorofilas	Carotenóides (Além do β -caroteno)	Ficobilinas	Cor predominante
Cyanophyceae	a	Flavicina Zeaxantina Oxclaxantina Myxoxantofila	Aloficocianina, Ficocianina, Ficoeritrina	Verde/Azul
Prochlorophyceae	a; b	-----	-----	Verde
Rodophyceae	a; d	α -Caroteno	Aloficocianina, Ficocianina, Ficoeritrina	Vermelho
Fucophyceae	a; c	Luteína	-----	Marron
Bacillariophyceae	a; c	Fucoxantina	-----	Dourada
Dinophyceae	a; c	Peridinina	-----	Marron
Chlorophyceae	a; b	Luteína, Sifonoxantina	-----	Verde
Euglenophyceae	a; b	Sifonoxantina	-----	Verde

Fonte: Adaptado de Oliveira (2003); Richardson (1996).

A função biológica dos pigmentos fotossintéticos é absorver a energia da luz, que é então transferida para centros de reação fotossintética para conduzir a fotossíntese ou é reemitida em comprimentos de onda mais longos para evitar a fotoinibição das células. A clorofila-a funciona tanto como centro de reação fotossintética ou como um dos vários pigmentos de absorção da luz. Este pigmento tem dois picos de absorbância, um na região do azul (433 nm) e um na região do vermelho (686 nm) do espectro eletromagnético e reflete a radiação em comprimentos de onda do verde. Todos os demais tipos de clorofilas (b, c1, c2, c3, d) são pigmentos verdes, e seus espectros de absorbância são semelhantes aos da clorofila-a (RICHARDSON, 1996).

Em contraste com o pequeno número de clorofilas, há mais de 60 tipos de carotenóides, sendo a função primária de quase todos estes pigmentos, a fotoproteção. Estes pigmentos absorvem luz de alta energia (comprimentos de onda curtos), geralmente abaixo de 500 nm (das regiões do ultravioleta ao azul do espectro eletromagnético). Alguns carotenóides, como o β -caroteno e a zeaxantina, estão amplamente distribuídos em grupos de fitoplâncton, enquanto outros são altamente específicos para grupos individuais. Por exemplo, a *mixoxantofila* é encontrada apenas em *Cyanophyceae*. A especificação de absorbância de todos os diferentes carotenóides cobre a mesma área do espectro eletromagnético, mas a forma dos espectros de absorção é única para cada tipo destes pigmentos (RICHARDSON, 1996).

2.4 A Reflectância e conceitos relacionados

A relação entre a medida de irradiância com a radiância estabelece o conceito de reflectância. Reflectância é a razão entre a quantidade de energia radiante que deixa uma unidade de área no terreno (Radiância) pela quantidade de energia incidente naquela área (Irradiância), medidas ao mesmo tempo, como uma função do comprimento de onda (AGGARWAL, 2004). A irradiância e a radiância são densidades de fluxo, sendo o resultado da razão entre estas grandezas, um valor adimensional, que pode ser expresso em porcentagem. Neste sentido, os alvos sobre a superfície terrestre podem refletir determinada porcentagem ($>0\%$ e $<100\%$) da radiação incidente sobre os mesmos.

As características da superfície do objeto alvo definem o comportamento da reflectância, ou seja, especular ou difuso (JENSEN, 2009). A reflexão especular ocorre na grande maioria das superfícies que constituem a fronteira entre fases (YAMAMOTO & ISHIDA, 1994; BORN & WOLF, 1980). Este tipo de reflexão da radiação ocorre quando a superfície é essencialmente lisa, como os corpos de águas calmos em dias sem a ocorrência de ventos (JENSEN, 2009). A reflexão especular perfeita pode ser vista como o resultado da igualdade dos ângulos de iluminação e do sensor em relação ao alvo (ângulo de visada). No entanto, a reflexão especular pode ocorrer mesmo sem a igualdade dos referidos ângulos e influenciar as medições com aumentos da radiância medida.

Em alvos rugosos que exibem diferentes orientações das superfícies refletoras, a radiação solar incidente pode ser refletida em muitas direções, não produzindo uma imagem espelho como a reflexão especular, mas sim a reflexão difusa. Uma superfície perfeitamente difusa é denominada de superfície *Lambertiana*, definida por *Johann Heinrich Lambert*, onde a radiação refletida é constante em qualquer ângulo de reflectância. Nos refletores difusos não perfeitos, devido à variação na rugosidade de suas superfícies, a radiação é refletida em várias direções, no entanto, com magnitudes diferentes, ou seja, se considerarmos ângulos distintos e direções distintas, inscritos entre um determinado alvo e o sensor, mantendo o ângulo de iluminação e as condições do alvo constantes, as medições de reflectância podem resultar em valores diferentes (JENSEN, 2009).

Em um ambiente aquático sem ondulações da água (sem rugosidade; superfície lisa) a reflexão especular pode influenciar substancialmente os valores de reflectância, principalmente se os ângulos do sensor e da fonte de iluminação em relação ao alvo forem iguais (JENSEN, 2009). Por outro lado, considerando toda a geometria de aquisição dos dados, num ambiente aquático com muita rugosidade da água, tanto a reflexão especular

como a difusa podem influenciar as medições. A depender das ondulações podem ocorrer diferentes ângulos entre o sensor e o alvo, além de variações na magnitude da radiação registrada pelo sensor o que torna de fundamental importância à aquisição de informações referentes às condições de tempo atmosférico durante a coleta dos espectros de reflectância, como a velocidade e direção do vento.

A natureza da radiação refletida depende das propriedades ópticas dos alvos, além disso, é dependente da natureza da radiação incidente (TRASFERETTI & DAVANZO, 2001). A radiância emergente de uma área projetada no terreno é medida por sistemas de Sensoriamento Remoto em um ângulo sólido específico, sendo este orientado em uma direção específica. Apesar deste ideal de medição da radiância emergente do terreno, outras energias radiantes podem interferir nas medições. Estas energias são denominadas de radiâncias de trajetórias, sendo um exemplo, a reflectância de um alvo vizinho que adentra ao IFOV (Campo de Visada Instantâneo) sem antes entrar em contato com o alvo de interesse e chega até o sensor remoto. Essas radiâncias de trajetórias ou interferências nos dados de radiância ou reflectância medidos por um sensor são decorrentes de vários fatores, como ressaltado por Jensen (2009):

- O que se denomina de radiância de Trajetória 1, é composta pela irradiância solar, quando muito pouco atenuada pela atmosfera. Para este tipo de trajetória, cabe ressaltar que o pesquisador interessa-se por um ângulo de irradiância solar específico e, portanto, as condições nas camadas atmosféricas por onde este ângulo é inscrito, definirão a quantidade de radiação que vai incidir sobre o alvo, ou seja, o quanto a atmosfera permite a transmitância da radiação em direção ao alvo de interesse. Ressalta-se que este tipo de radiação de trajetória, mesmo que atenuada pela atmosfera, quando incide sobre o alvo é refletida, dentro do ângulo sólido em direção ao sensor, portanto, carrega consigo informações intrínsecas ao alvo de interesse;
- A energia proveniente da irradiância espectral solar difusa, que nunca atinge a superfície terrestre ou mesmo o alvo, é a energia radiante denominada de radiância de Trajetória 2. Esse tipo de energia pode ser espalhada para dentro do IFOV (Campo de Visada Instantâneo), ocasionando alterações nas medições da radiância emergente do alvo de interesse, pois não contém informação relativa ao mesmo. A irradiância espectral solar difusa é em grande parte influenciada pelo *Espalhamento Rayleigh* da luz azul, sendo que o efeito deste fenômeno pode ser visto na maior claridade da banda azul, em relação às demais bandas de imagens produzidas por sistemas de Sensoriamento Remoto;
- Energias radiantes que são afetadas também por outros tipos de espalhamento além do *Rayleigh*, como os espalhamentos *Mie* e *Não Seletivo*, e ainda algum tipo de absorção ou reemissão antes de incidir sobre o alvo de interesse, compõe a radiância de Trajetória 3. Esse tipo de energia radiante se diferencia daquela que integra a energia radiante de Trajetória 1, pela sua composição e polarização que podem ser distintas.

- Quando a radiação proveniente do sol incide sobre alvos vizinhos, sendo refletida para a atmosfera e para dentro do IFOV, sem antes interagir com o alvo de interesse, tem-se a energia radiante de Trajetória 4. Esse tipo de energia não contém informações do alvo em estudo e sua influência na radiância medida pelo sensor deve ser detectada e minimizada o quanto possível.
- Por outro lado, aquela energia que incide sobre alvos vizinhos e é refletida para a atmosfera e em direção ao alvo de interesse, contém informações do mesmo. Esta energia radiante compõe a radiação de Trajetória 5.

O espalhamento *Rayleigh* mencionado anteriormente em relação à energia radiante de Trajetória 2 ocorre quando o diâmetro efetivo da matéria, geralmente moléculas de ar como oxigênio e nitrogênio na atmosfera, é muitas vezes menor que o comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. O espalhamento Mie, mencionado anteriormente em relação à energia radiante de Trajetória 3, ocorre nos 4,5 km inferiores da atmosfera, onde podem estar partículas essencialmente esféricas com diâmetro aproximadamente iguais ao tamanho do comprimento de onda da energia incidente (THOMAS & STAMNES, 1999; JENSEN, 2009).

A reflectância pode ser medida pelos sistemas de sensoriamento remoto a grandes distâncias, como aqueles instalados em plataformas orbitais ou mesmo com a utilização de espectrorradiômetros a poucos centímetros acima do alvo. Uma das grandes vantagens da utilização de espectrorradiômetros para a obtenção de dados de reflectância é a minimização dos efeitos dos fenômenos atmosféricos sobre a radiação que interage com o alvo e é direcionada ao sensor, devido a pouca distância entre o detector (Sensor) e o alvo, no entanto, determinadas precauções são requeridas, como a efetuação das medições em uma mesma estação amostral sem alterações significativas das condições atmosféricas. Em caso de medidas em laboratório com a utilização de iluminação artificial (Lâmpadas Halógenas) o efeito da atmosfera sobre a radiação incidente é eliminado. Devido a estas características importantes, os dados coletados por espectrorradiometria podem ser utilizados para corrigir as medições realizadas por sensores orbitais, influenciadas pelas condições atmosféricas (TEILLET et al. 2002; JENSEN, 2009).

As coletas de espectros de reflectância em campo, por espectrorradiometria, levam em consideração duas medidas radiométricas. Uma primeira medida de radiância (L_r) é realizada sobre um material de referência (Placa de referência - Lambertiana - reflexão difusa perfeita), geralmente o Spectralon, que é uma resina termoplástica branca ou cinza com reflexão difusa superior a outros materiais utilizados para as medições da reflectância no âmbito do Sensoriamento Remoto. A outra medida de radiância (L_T) é realizada sobre o

alvo. Destaca-se que ambas as medidas são realizadas sobre o mesmo intervalo de comprimentos de onda. Além disso, é levada em consideração a razão (k) entre a Irradiância solar e a exitância da placa de referência, que idealmente deve ser igual a um (1), como salientou Jensen (2009).

Em laboratório as medidas espectrorradiométricas podem ser úteis para a obtenção das características espectrais dos alvos, considerando um ambiente controlado em relação à geometria de iluminação (iluminação artificial) e de visada, além da eliminação dos efeitos de fatores como o vento a temperatura e vapor de água. Além disso, podem-se controlar variáveis intrínsecas a água (componentes opticamente ativos), simulando variações das mesmas. Essas medições fornecem informações específicas sobre os componentes ópticos de interesse, como demonstrado por Lodhi et al. (1997), Han (1997) e Mantovani (1993).

2.5 Efeitos de componentes opticamente ativos sobre dados de sensoriamento remoto para a estimativa das concentrações de clorofila fitoplanctônica

Ao longo dos mais de cinquenta anos de desenvolvimento do sensoriamento remoto, muitas pesquisas foram desenvolvidas no sentido de elucidar questões a cerca das relações de causa e efeito entre os dados de sensoriamento remoto e os componentes opticamente ativos das águas, visando à estimativa remota dos mesmos, especialmente das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica. No entanto, a estimativa das concentrações deste pigmento fitoplanctônico, a partir de dados de sensoriamento remoto, de forma confiável e sem o auxílio de referências de campo, ainda pode ser considerada como um objetivo a ser alcançado, para não descaracterizar o que é fundamental no sensoriamento remoto, ou seja, o ato de obter dados e informações de um alvo na superfície terrestre sem a necessidade de entrar e contanto com o mesmo, apesar de Jensen (2009) ter essa definição como globalizante.

De fato, muitos pesquisadores, desenvolveram algoritmos para a estimativa das concentrações de clorofila fitoplanctônica em corpos de água, do Caso I e II, sejam eles empíricos ou semi-analíticos (Ex: CARDER et al., 1986; CARDER et al., 1991; GARVER & SIEGEL, 1997; CLARK, 1997; O'REILLY et al., 1998; LEE et al., 1998, 1999; GROSS et al., 2000; O'REILLY et al., 2000; MITCHELL, 2001; DOERFFER & SCHILLER, 2000, 2006; CARDER et al., 2004; DOERFFER et al., 2002; LEE et al., 2002; MARITORENA et al., 2002; DARECKI & STRAMSKI, 2004; PINKERTON et al., 2005; SMYTH et al., 2006; LEE et al., 2009; FRANZ & WERDELL, 2010; DEVRED et al., 2011; MOREL & ANTOINE, 2011; HU et al., 2012; WERDELL et al., 2013; LAMONT et al., 2017). Porém,

segundo Zheng & Di Giacomo (2017), não há algoritmos universalmente aceitos para derivar com precisão a clorofila-a em águas costeiras oceânicas do Caso II, utilizando-se de dados de reflectância de sensoriamento remoto. Klemas (2012) ressaltou que a qualificação e quantificação remota dos componentes das águas costeiras oceânicas, incluindo a clorofila-a fitoplanctônica, são difíceis de serem realizadas mesmo com a utilização de dados de sensores remotos hiperespectrais. De acordo com os conhecimentos constados em Palmer et al. (2015) dentre outros pesquisadores, as constatações de Zheng & Di Giacomo (2017) e Klemas (2012) também podem ser atribuídas às águas interiores do Caso II, apesar de que Palmer et al. (2015) não tenham tecido nenhum comentário acerca disso, no entanto, os conhecimentos disponibilizados pelos mesmos, indicam esse fato.

São muitos os fatores internos e externos aos corpos de água que podem dificultar a estimativa remota das concentrações de clorofila-a. No entanto, quando se verificam, nos dias atuais, aplicações de modelos empíricos de uma única banda espectral, desenvolvidos por análise de regressão simples para estimativa remota da clorofila-a, o fator que dificulta a estimativa pode estar na própria técnica aplicada. Isso porque segundo Downing & Clark (2007) a regressão simples é aplicável somente quando uma variável independente afeta a variável dependente, ou pelo menos quando as variáveis independentes atendem ao princípio da *multicolinearidade* (WHITLOCK et al., 1982), o que não se aplica as variáveis opticamente ativas dos corpos de água, principalmente do Caso II e também a aspectos intrínsecos a determinados componentes opticamente ativos das águas, incluindo o próprio fitoplâncton, o que pesquisadores verificaram e destacaram em suas pesquisas no decorrer do desenvolvimento do sensoriamento remoto, como será verificado nos subitens a seguir.

2.5.1 Efeitos do fitoplâncton e seus organismos constituintes

Ainda na década de sessenta, Clarke *et al.* (1970) relatavam a possibilidade de estimar remotamente os componentes das águas, analisando a luz retroespalhada em uma faixa de 400 nm a 650 nm em função das concentrações de clorofila fitoplanctônica. Estes pesquisadores salientaram sobre a influência da atmosfera, das ondulações da superfície oceânica e da reflexão superficial da água, nos dados coletados por um sensor remoto e consequentemente nas informações espectrais sobre as condições das águas relacionadas à clorofila.

Neste período de desenvolvimento do sensoriamento remoto a hipótese de que o espalhamento da radiação ocasionado pelo fitoplâncton não é seletivo do comprimento de

onda era considerada. Devido aos tamanhos das células, superiores aos comprimentos de onda, os organismos fitoplanctônicos eram entendidos como dispersores brancos (DUNTLEY, 1963). Então qualquer modificação espectral ocasionada pelo fitoplâncton deveria ser atribuída a um processo puramente absorptivo e, portanto, de extinção de feixes de luz e, neste sentido, a teoria do espalhamento *Mie* (GUSTAV MIE, 1908) foi abordada por Mueller (1974).

Contrapondo-se a hipótese mencionada, Mueller (1974) argumentou que toda a clorofila da água do mar esta contida nas células fitoplanctônicas, ou seja, dentro de uma estrutura que varia em tamanho, forma e demais características e, desse modo, a absorção dos pigmentos dependentes do comprimento de onda não poderia funcionar como um mecanismo de extinção de feixes de luz, mesmo porque, a extinção da luz tem pouca dependência do comprimento de onda como salientou o autor (Figura 1a).

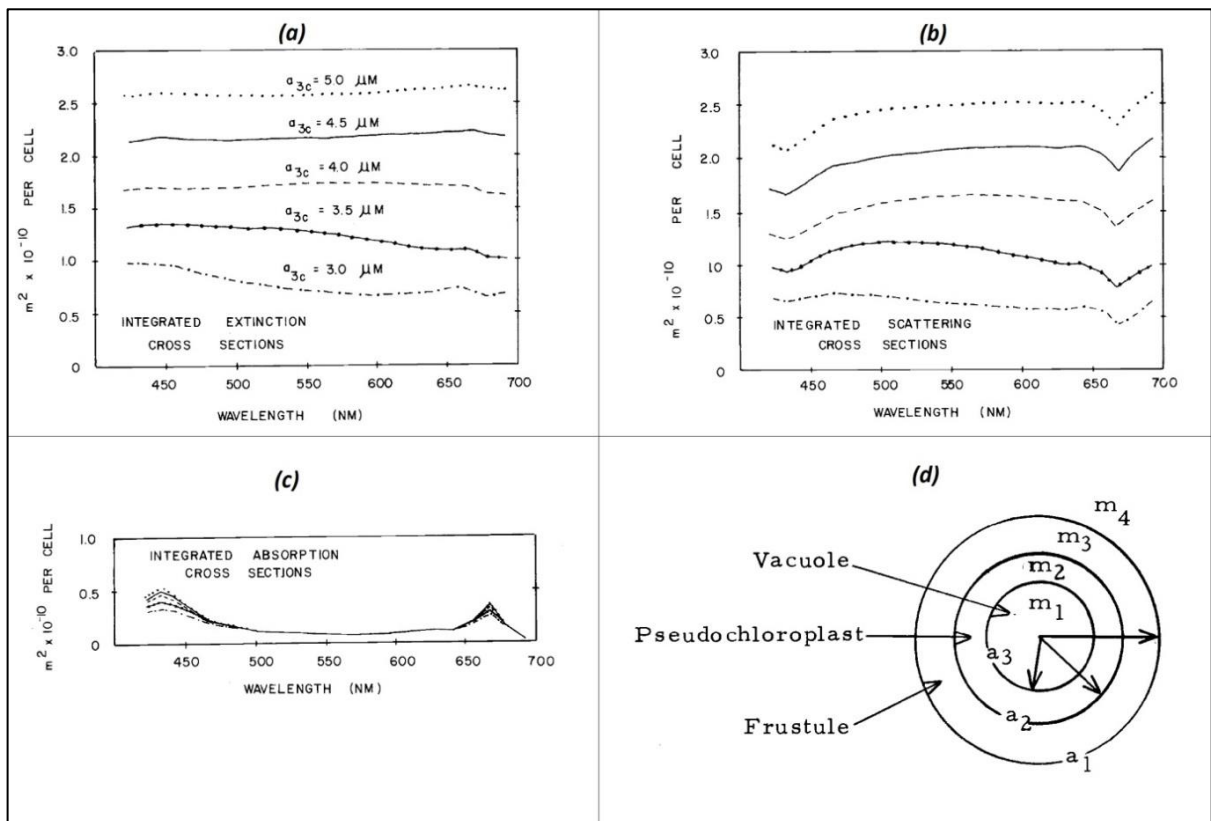


Figura 1: Espectros de extinção (a), espalhamento (b) e absorção (c) da luz para um modelo de célula esférica (d) de diferentes tamanhos e com três camadas concêntricas, para modelar as propriedades de espalhamento da luz pelo fitoplâncton marinho. As concentrações de clorofila consideradas foram verificadas conforme literatura especializada na época da realização do experimento, porém foram iguais para cada tamanho de célula ou esfera. Os diferentes tamanhos das células (μm) são indicados na Figura 1a, na qual os dados de extinção da luz em meio à suspensão de células estão expostos.

Fonte: Adaptado de Mueller (1974).

A partir da realização de experimento (Simulação de células fitoplanctônicas - Partícula esférica com três camadas concêntricas para adequação matemática à teoria do espalhamento Mie), Mueller (1974) constatou que o aumento do tamanho das células, proporcionou variações do espalhamento (Figura 1b) e da extinção da luz (Figura 1a) em todos os comprimentos de onda considerados na análise, além de variações de absorção da luz, sendo estas, principalmente em comprimentos de onda do azul e vermelho (Figura 1c), destacando-se que as concentrações de clorofila eram iguais para cada tamanho de célula (simulada) em suspensão. A forma (Esférica) das células fitoplanctônicas simuladas (Figura 1d) foram às mesmas em todas as medições realizadas, no entanto, devido as variações em tamanho das células, variações nas dimensões das camadas internas também ocorreram, sendo esta uma das prováveis causas dos aumentos de absorção, espalhamento e extinção da luz, ou seja, os referidos aumentos podem ter ocorrido em função das variações da proximidade do pseudocloroplasto (m_2) a parede externa das células (a_1), do volume do pseudocloroplasto por célula (onde está contida a clorofila) e do tamanho do vacúolo (m_1) (Figura 1d).

A partir da simulação de células realizada por Mueller (1974), constata-se que os próprios organismos fitoplanctônicos influenciam para variações das grandezas radiométricas, não ajustadas com as variações nas concentrações de clorofila. Então partículas clorofiladas que variam em forma, tamanho dentre outras características, como o próprio Mueller (1974) destacou nas argumentações de seu trabalho, ou mesmo, Kruk et al. (2010) destacam para os grupos funcionais baseados na morfologia fitoplanctônica, podem afetar as grandezas radiométricas. De fato os *aerótopos* ressaltados por Kruk et al. (2010) para os grupos funcionais baseados na morfologia, são muito reflexivos (NAIR et al., 2008), ou seja, a sua presença em *Cyanophyceae* pode promover variações substanciais da reflectância.

A influência da morfologia dos organismos fitoplanctônicos na atenuação da luz tinha sido estudada anteriormente por Duysens (1956) que a denominou de efeito de embalagem, ou seja, a embalagem onde está contida a clorofila. Posteriormente, Kirk (1976) a redenominou de *Package effect* (Efeito pacote), abordando o mesmo também em seu livro "*Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*" (KIRK, 1983). O autor ressalta neste trabalho sobre os efeitos de células de *Euglena gracilis* intactas e fragmentadas ao nível de tilacóide, sobre a absorção da luz. Em seu experimento, Kirk (1976; 1983) constatou que as células fragmentadas ao nível de tilacóide absorveram significativamente a radiação em comparação com as células intactas (Figura 2), e concluiu que isso ocorreu porque o espectro

de absorção do fitoplâncton *in vivo*, é determinado também pelo tamanho e forma dos cloroplastos, células ou colônias, bem como pela composição de pigmentos dos organismos.

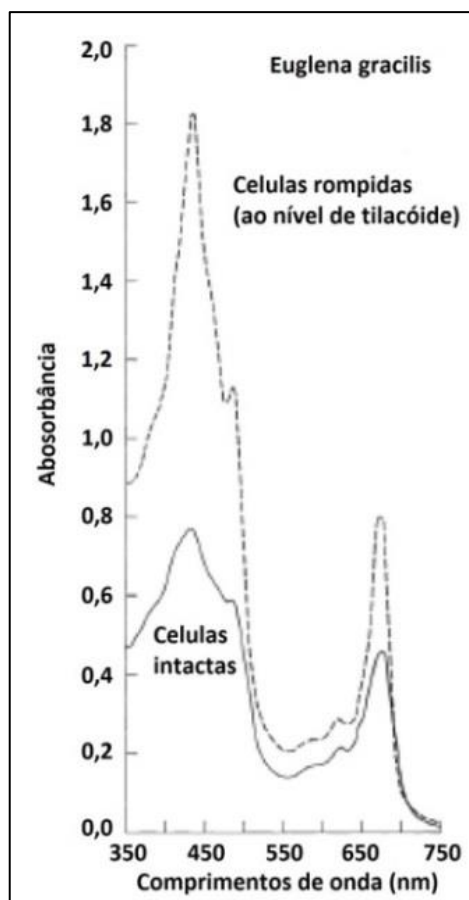


Figura 2: Espectros de absorção de *Euglena gracilis*. Absorção da luz por células intactas (—) em comparação com espectro de absorção por células rompidas de *Euglena gracilis* em que a absorção é essencialmente devida a fragmentos tilacóides (- - - -). Para ambos os casos, a concentração de clorofila-a foi de 12 µg/ml. Fonte: Adaptado de Kirk (1994).

De acordo com Kirk (1983), duas espécies de fitoplâncton com a mesma composição de pigmentos e com o mesmo espectro de absorção ao nível do tilacóide, porém com formas de vida distintas, não terão o mesmo espectro de absorção *in vivo*. As duas espécies *in vivo*, podem proporcionar espectros com feições espectrais nos mesmos comprimentos de onda, ou seja, as formas dos espectros seriam praticamente iguais, no entanto, as magnitudes dos valores de absorção e o coeficiente de absorção específico por unidade de pigmento em qualquer comprimento de onda, podem ser significativamente distintos.

Em suma, o “efeito pacote” (DUYSENS, 1956; KIRK, 1976; 1983) nos diz que a magnitude dos valores de absorção pode ser diferente para mesma concentração de clorofila na água, porém de organismos fitoplanctônicos distintos *in vivo*. Se levarmos em consideração o número de espécies de fitoplâncton conhecidas, que segundo Guiry & Guiry

(2019) somam 156,107, muitas variações podem ocorrer em termos de absorção da radiação pelo fitoplâncton e conseqüentemente da reflectância.

De fato Quibell (1992) ressaltou que a reflectância pode diferir entre espécies de fitoplâncton para qualquer concentração de clorofila. Este pesquisador verificou que organismos de *Cyanophyceae* e *Chlorophyceae* espalharam diferentes quantidades de luz e responderam opostamente a incidência da radiação na região do vermelho do espectro eletromagnético, quando em altas concentrações de clorofila (Figura 3). Além disso, o autor destacou que mudanças na composição de espécies (variações qualitativas na composição da comunidade fitoplanctônica), conseqüentemente, poderiam requerer o desenvolvimento de novas relações empíricas entre a reflectância e a concentração de clorofila, sendo necessários modelos específicos para cada espécie, se o objetivo for estimar este tipo de pigmento fitoplanctônico a partir de dados de reflectância.

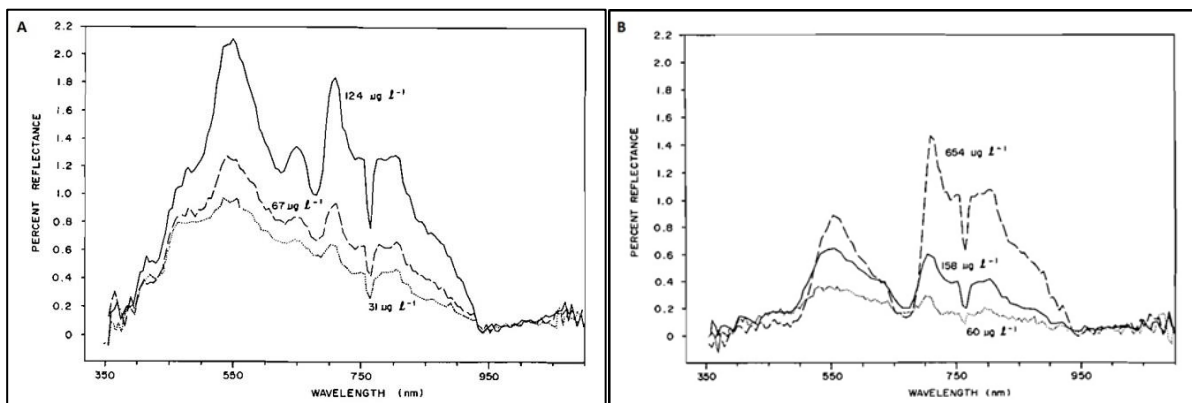


Figura 3: Percentuais de reflectância da água contendo Cyanophyceae e Chlorophyceae. (A) *Cyanophyceae* (*Microcystis* sp.; *Anabaena* sp.) em diferentes densidades vistas pelas variações das concentrações de clorofila ($\mu\text{g/L}$). (B) *Chlorophyceae* (*Chlorella* sp.; *Selenastrum* sp.; *Ulothrix* sp.) em diferentes densidades vistas pelas variações das concentrações de clorofila ($\mu\text{g/L}$). Os referidos organismos foram cultivados e diluídos em água destilada para as medições radiométricas em um tanque com fundo pintado de preto e laterais brancas (O tamanho do tanque não foi especificado, porém referenciado em Whitlock et al. (1982), sendo para este, de 0,35 m de diâmetro e 3,0 m de profundidade). As medições foram realizadas sob iluminação solar, utilizando o espectrorradiômetro LICOR LI-1800 posicionado num ângulo de visada de 4 graus. Considerando os espectros da Figura 3, notavelmente a máxima reflectância, não ultrapassa os 2,2% na região do visível e os 2,0% na região do infravermelho próximo, mesmo a concentrações de clorofila superiores a 120 $\mu\text{g/L}$ para os organismos de *Cyanophyceae* e de 650 $\mu\text{g/L}$ para *Chlorophyceae*. Segundo o autor a típica absorção da radiação devido a efeitos atmosféricos é vista em $\approx 760 \text{ nm}$.

Fonte: Adaptado de Quibell (1992).

Segundo Quibell (1992) os modelos de regressão simples não poderiam ser aplicados sobre um corpo de água para a estimativa das concentrações de clorofila a partir de dados de reflectância, na ocorrência de variações na composição de espécies fitoplanctônicas e, no entanto, estes modelos continuam a ser utilizados nos dias atuais, os quais o presente trabalho objetivou comprovar serem inadequados para estimar remotamente a clorofila fitoplanctônica.

Posteriormente Kiefer (1986) e também Nair et al. (2008) destacaram que as características de absorção da radiação eletromagnética de determinada espécie fitoplanctônica podem variar de acordo com as condições de crescimento e que mudanças na composição da comunidade fitoplanctônica tem o potencial de modificar os coeficientes específicos da clorofila, portanto, a reflectância, introduzindo incertezas em algoritmos desenvolvidos para a recuperação das concentrações deste tipo de pigmento fitoplanctônico, a partir de dados de sensores remotos.

Baseando-se nas constatações de Quibell (1992) cabem aqui maiores detalhamentos sobre os resultados deste autor apresentados na Figura 3. Como pode ser verificado na Figura 3B, a variação positiva da reflectância na região do vermelho do espectro eletromagnético, para os organismos de *Chlorophyceae*, tornou-se negativa para a mais alta concentração de clorofila de 654 mg/m³. Além disso, as variações da reflectância em função das variações das concentrações de clorofila, para os diferentes organismos, também são distintas nas demais regiões ou comprimentos de onda do espectro eletromagnético, apesar de serem sempre positivas e de não ocorrer a referida inversão da variação da reflectância, verificada na região do vermelho para os organismos de *Chlorophyceae* (Figura 3).

Tomando como exemplo, no comprimento de onda em 550 nm na região do verde (490 nm a 560 nm), para uma variação de 57 mg/m³ nas concentrações de clorofila de *Cyanophyceae* (De 67 mg/m³ para 124 mg/m³ - Figura 3A), tem-se uma variação de aproximadamente 0,8% da reflectância, no entanto, para uma variação de 98 mg/m³ nas concentrações de clorofila de *Chlorophyceae* (De 60 mg/m³ para 158 mg/m³ - Figura 3B), tem-se apenas uma variação da reflectância de aproximadamente 0,2%. Para complementar, neste mesmo comprimento de onda (550 nm), verifica-se uma reflectância de aproximadamente 1,3% para uma concentração de clorofila de 67 mg/m³, de organismos de *Cyanophyceae* (Figura 3A) e para uma concentração de clorofila de 60 mg/m³ de *Chlorophyceae* (Figura 3B), a reflectância alcançou menos de 0,4%, ou seja, para uma variação de 7,0 mg/m³ de clorofila, entre organismos de *Cyanophyceae* e *Chlorophyceae*, verifica-se uma variação da reflectância de aproximadamente 0,9%, sendo esta maior do que aquela verificada para uma variação das concentrações de clorofila da ordem de 57 mg/m³, somente para organismos de *Cyanophyceae* e muito maior para uma variação das concentrações de clorofila de 98 mg/m³ somente para organismos de *Chlorophyceae*, anteriormente mencionadas.

Neste contexto, Rundquist et al. (1996) ressaltaram que a reflectância tende a aumentar em determinadas regiões do espectro eletromagnético, à medida que as concentrações de clorofila-a aumentam em concentração, o que é notável na Figura 4a nas

regiões dos espectros de reflectância designadas pelas letras B, C e E. Para os dados expostos na Figura 4b devido as menores variações nas concentrações de clorofila-a, estes aumentos da reflectância foram mais tênues. Por outro lado, nas regiões dos espectros designadas pelas letras A e D ocorre o oposto, ou seja, a reflectância tende a diminuir à medida que as concentrações de clorofila-a aumentam (Figura 4a).

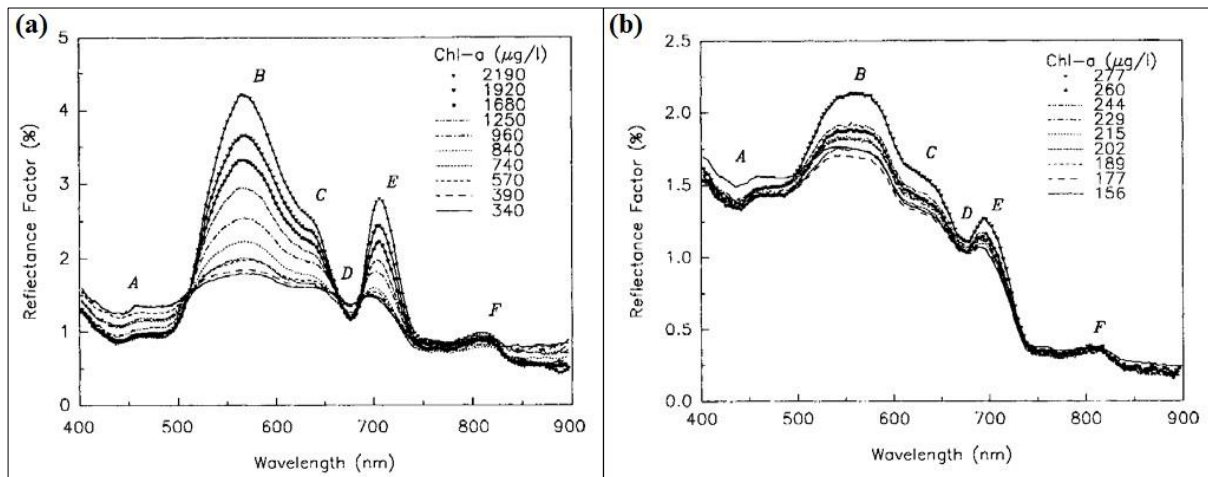


Figura 4: Espectros de reflectância da superfície da água, considerando concentrações variadas de clorofila fitoplanctônica. (a) Experimento 1; (b) Experimento 2. Para seus experimentos, os pesquisadores consideraram um tanque com capacidade de armazenamento de 8543 litros, 366 cm de diâmetro e 91 cm de profundidade. A água do referido tanque foi fertilizada para o desenvolvimento de organismos fitoplanctônicos (classificação dos organismos não informada), sobre a qual foram efetuadas medições radiométricas com iluminação solar direta em dois experimentos (Experimento 1 - Figura 4a; Experimento 2 - Figura 4b). As culturas de fitoplâncton no tanque com água fertilizada foram diluídas da seguinte maneira em ambos os experimentos: Uma quantidade calculada de água fertilizada contendo fitoplâncton foi removida do tanque com a utilização de uma bomba; a quantidade removida foi substituída por uma mesma quantidade de água limpa e; em seguida o conteúdo do tanque foi homogeneizado para a realização da radiometria. Notavelmente até concentrações de 260 $\mu\text{g/L}$ de clorofila as variações da reflectância são mais tênues que aquelas verificadas a partir de 277 $\mu\text{g/L}$.
Fonte: Adaptado de Rundquist et al. (1996).

As variações da reflectância nos espectros coletados por Rundquist et al. (1996), são muito distintas daquelas verificadas nos espectros coletados por Quibell (1992). Notadamente até concentrações de 260 $\mu\text{g/L}$ de clorofila as variações da reflectância são mais tênues que aquelas verificadas a partir de 277 $\mu\text{g/L}$ (Figura 4b). Na região do verde do espectro eletromagnético a reflectância mantém variação efetiva somente após 300 $\mu\text{g/L}$ o mesmo ocorrendo para o pico de reflectância em 700 nm. Na região do infravermelho próximo de 750 nm a 900 nm a reflectância praticamente não variou mesmo com variações da clorofila até 2190 $\mu\text{g/L}$.

Experimentos que corroboram com as constatações de Quibell (1992) foram realizados por Gitelson et al. (1999). Estes pesquisadores, analisando as propriedades da reflectância de diferentes filos do fitoplâncton, verificaram que as relações entre a clorofila total e a

reflectância foram significativamente diferentes (Figura 5). É notável que as variações das concentrações de clorofila total (Entre mínima e a máxima) não foram iguais, no entanto, em alguns casos foram semelhantes e as inclinações das retas de regressão e os ajustes entre as variáveis, clorofila e reflectância foram significativamente distintas.

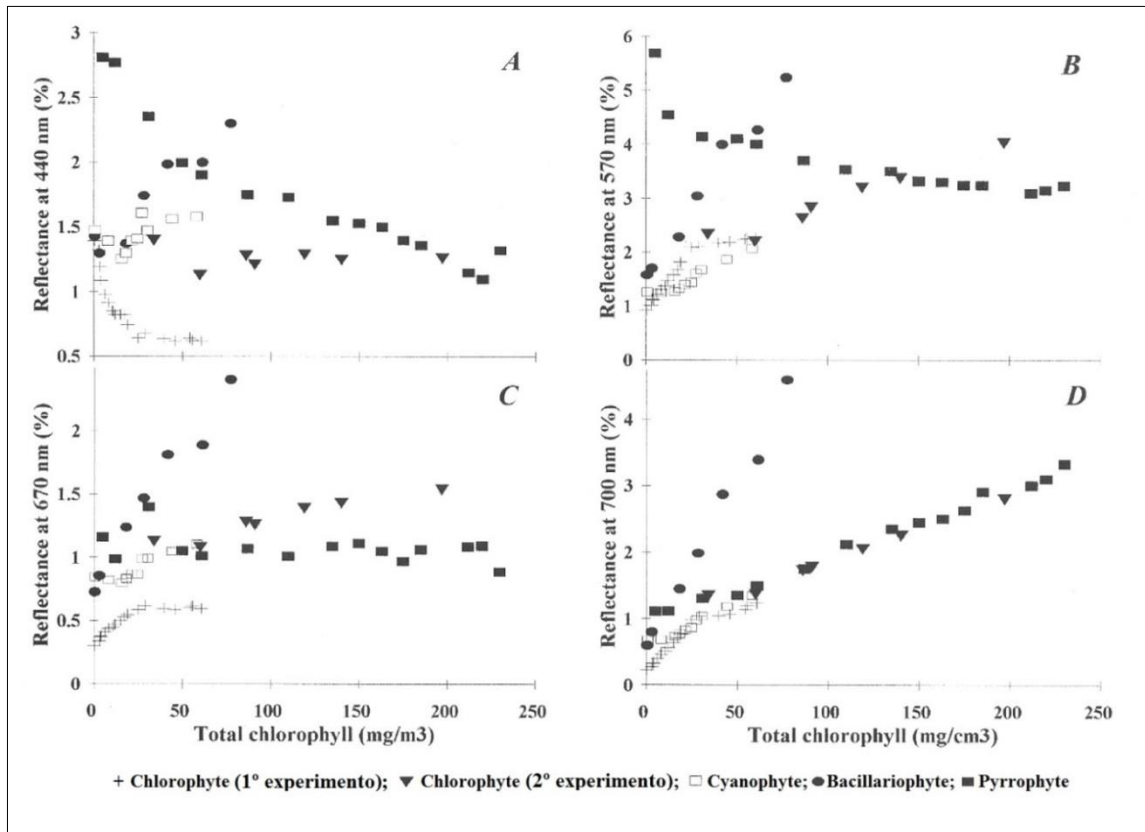


Figura 5: Relação entre a reflectância da região do azul em 440 nm (A), do verde em 570 nm (B), do vermelho em 670 nm (C) e borda do vermelho em 700 nm (D) e as concentrações de clorofila total de representantes de quatro diferentes filos fitoplanctônicos.

Fonte: Adaptado de Gitelson et al., (1999).

Deve ser destacado que os dados de Gitelson et al. (1999) foram coletados em diferentes condições, sejam elas em termos de ambiente aquático, iluminação e medição da reflectância. Para os organismos de *Chlorophyta* situações distintas foram consideradas por Gitelson et al. (1999). Um primeiro experimento foi realizado com *Chlorophyta*, em que apenas continha organismos de *Chlorella sp.*, a uma variação de 0,5 à 60,0 µg/L de clorofila, e um segundo experimento, continha, além de organismos de *Chlorella sp.*, pequenas quantidades de *Ankistrodesmus sp.*, *Pediastrum sp.*, *Selenastrum sp.* e de um euglenóide não identificado, em variações nas concentrações de clorofila de 34 à 439 µg/L, ou seja, este experimento se baseou em uma mistura de organismos ou mesmo uma composição. Para estes experimentos com *Chlorophyta*, as medições foram realizadas ao ar livre sob iluminação

solar. O espectrorradiômetro (*SE-590*; Faixa de operação de 368 nm a 1114 nm) foi posicionado a 1,3 metros acima da lâmina de água.

O experimento com *Cyanophyta* (Figura 5) continha uma cultura por enriquecimento (WATANABE, 2005) de *Anabaena sp.*. As medições radiométricas foram realizadas em tanque com capacidade de 570 litros, pintado internamente de preto fosco e iluminado por quatro lâmpadas halógenas com potência de 500 watts (Sem informações, referentes à geometria de iluminação). O espectrorradiômetro *SE-590* posicionado a 0,55 metros acima da lâmina de água. Para o experimento com *Bacilariophyta* Gitelson et al. (1999) consideraram a *Navicula minima*, cultivada em meio sintético *Basal Bold* (BISCHOFF & BOLD, 1963). As medições radiométricas foram realizadas em tanque de plástico preto, com diâmetro de 3,2 metros, profundidade de 3,8 metros e capacidade de armazenamento de 30 m³. A iluminação foi fornecida por quatro lâmpadas halógenas com potência de 1000 watts. A densidade de organismos de *Bacilariophyta* foi reduzida com retirada de água do tanque e posterior adição de água limpa. O espectrorradiômetro *SE-590* foi posicionado a 0,50 metros acima da lâmina de água. O experimento com *Dinophyta* (*Peridinium gatunense*) foi realizado em campo, no lago Kinneret em Israel, em março de 1993. Segundo Gitelson et al. (1999) a contribuição de *Peridinium gatunense* para a clorofila total foi geralmente entre 97% e 99%, porém as densidades de organismos eram espacialmente variáveis, sendo o espectrorradiômetro utilizado para este caso, o *LI-1800*, posicionado a 2 metros acima da lâmina de água.

Apesar das diferentes condições de coleta dos dados, os resultados de Gitelson et al. (1999) da Figura 5 demonstram os efeitos dos distintos organismos fitoplanctônicos sobre os dados de reflectância da água. As distintas formas de vida dos organismos considerados por Gitelson et al. (1999), filamentosos (Ex: *Anabaena sp.*), unicelular de vida livre (Ex: *Peridinium gatunense*; *Chlorella sp.*; Euglenóide não identificado), coloniais (Ex: *Pediastrum sp.*, *Selenastrum sp.*) e outras características como a presença de bainha mucilaginosa e aerótopos (*Anabaena sp.*) ou de sílica em sua parede celular (*Bacilariophyta*) (BICUDO & MENEZES, 2006), podem ser as causas dos distintos ajustes e inclinações das retas e curvas de regressão em função das concentrações de clorofila (Figura 5), ou seja, aqui tem-se provavelmente as consequências do “efeito de embalagem” (DUYSENS, 1956) ou “efeito pacote” (KIRK, 1976; 1983), além dos efeitos dos diferentes tamanhos celulares (MUELLER, 1974) sobre as grandezas radiométricas, as características ópticas dos organismos fitoplanctônicos são distintas como salientaram Alvain et al. (2005).

Considerando o tamanho celular do organismo dominante em comunidades fitoplanctônicas, Ciotti et al. (2002) desenvolveram um modelo que explicou mais de 80% da

variabilidade do coeficiente de absorção do fitoplâncton na região do visível do espectro eletromagnético, para a maioria dos comprimentos de onda (Figura 6). Os autores destacaram que conhecendo a faixa de tamanho celular do organismo dominante em uma comunidade fitoplanctônica, pode-se prever a forma dos espectros de absorção do fitoplâncton, representando mais de 80% da variância, o que sugeriu, segundo os autores, que o tamanho da célula dominante na comunidade fitoplanctônica, pode ser usado para explicar a variabilidade do coeficiente de absorção para comunidades distintas de fitoplâncton.

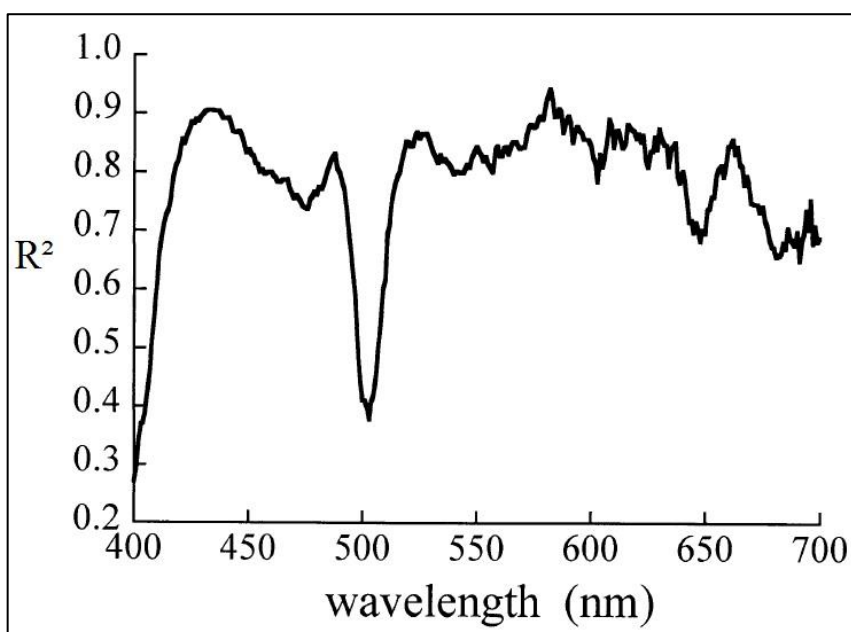


Figura 6: Variabilidade dos dados explicados pela predefinição do intervalo de tamanho das células do organismo dominante (Picoplankton (<2 μm); Ultraplankton (De 2 a 5 μm), Nanoplankton (De 5 a 20 μm), Microplankton (>20 μm)). Os resultados das análises de regressão são referentes a 301 comprimentos de onda. Fonte: Adaptado de Ciotti et al. (2002).

Por outro lado, Ciotti et al. (2002) relataram que dentro de cada faixa de tamanho das células fitoplanctônicas, houve variabilidade, e explicaram que diatomáceas formadoras de nano-cadeias encontradas na Bacia de Bedford (Canadá) na estação do verão e no Mar de Bering estavam próximas do limite inferior atribuído a essa faixa de tamanho, ou seja, 5 μm , enquanto os nano-dinoflagelados encontrados em 1993, durante a maré vermelha na Bacia de Bedford, estavam próximos do limite superior dessa faixa, ou seja, 20 μm . As distinções entre os espectros de absorção classificados como ultra e aqueles classificados como nanoplâncton não foram eficazes, exceto em amostras coletadas no Mar de Bering em 1997, onde organismos de *Phaeocystis* (*Prysmnesiophyceae*) estavam presentes, promovendo um distinto pico de absorção centrado em torno de 465 nm, ou seja, ocorrem variações não explicadas.

Além disso, Ciotti et al. (2002) ressaltaram que na fração do micropâncton, as diferenças entre os espectros de absorção dominados por diatomáceas e dinoflagelados foram muito pequenas nos comprimentos de onda da região do visível. Ressaltaram também que é reconhecido que o efeito de embalagem ou empacotamento (DUYSENS, 1956; KIRK 1976, 1983) e da concentração de pigmentos (Clorofila-a e pigmentos acessórios) também podem variar com o estado fisiológico da comunidade. Portanto, quando são verificados os efeitos do tamanho da célula em espectros de absorção, o que se está verificando de fato, são os efeitos combinados de um grupo de variáveis. Ciotti et al. (2002) explicaram que, no geral, os resultados ilustraram que a medida que o tamanho do organismo dominante aumenta, os espectros de absorção se nivelam consistentemente com o aumento das embalagens de pigmentos (Figura 7).

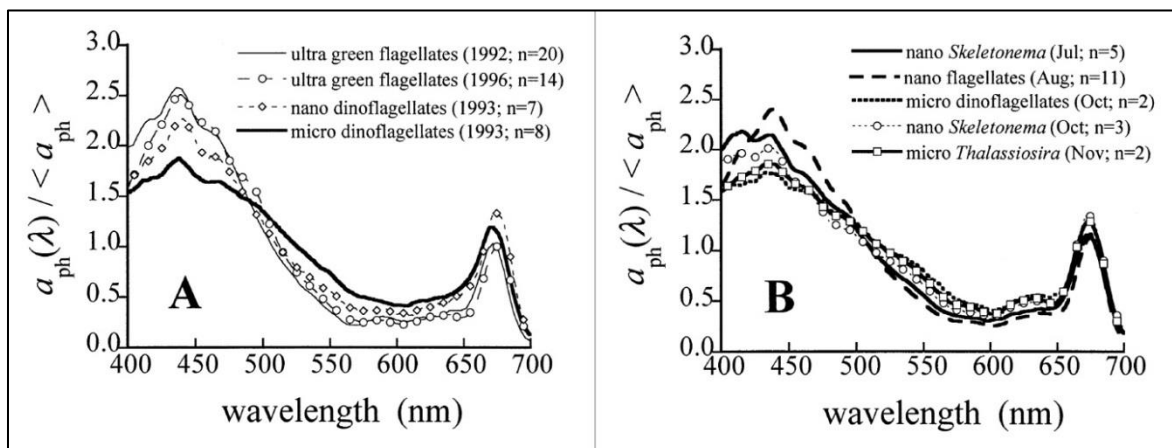


Figura 7: Espectros de absorção, medidos em amostras de superfície da água contendo fitoplâncton na Baía de Bedford (Nova Escócia – Canadá). As legendas indicam as comunidades fitoplanctônicas caracterizadas de acordo com o tamanho da célula e o grupo ou classe fitoplanctônica dominante. Os espectros de absorção apresentados na Figura 7 são as médias de determinados números de amostras (n) indicadas na legenda. (A) amostras de agosto, 1992-1996. (B) série temporal para o ano de 1996.

Fonte: Adaptado de Ciotti et al. (2002).

Em se tratando de águas onde o principal componente opticamente ativo é o fitoplâncton, as variações na reflectância ou feições espectrais distintas podem ser geradas quando diferentes grupos fitoplanctônicos influenciam a resposta espectral. Os espectros de reflectância da Figura 8, elaborada por SVÁB et al. (2005), são influenciados por três espécies de *Cyanophyceae* e uma de *Chlorophyceae* em diferentes densidades de organismos, sendo estas expressadas pelas concentrações de clorofila-a. Notadamente nos espectros de reflectância referentes às espécies de *Cyanophyceae* (Figura 8), ocorre a feição de absorção relacionada à ficocianina em aproximadamente 620 nm que identifica espectralmente estes organismos. Por outro lado, no espectro de reflectância relacionado à espécie de

Chlorophyceae, além da ausência da feição ocasionada pela ficocianina, ocorre o deslocamento do centro de absorção da clorofila-a da região do vermelho do espectro eletromagnético em direção comprimentos de onda menores, sendo esta a feição de absorção com a maior profundidade entre os espectros, e relacionada a uma das menores concentrações de clorofila-a, o que indica que outros fatores estão influenciando como, por exemplo, a forma dos organismos, sendo que a mencionada espécie de *Chlorophyceae* é a única não filamentosa (Figura 8).

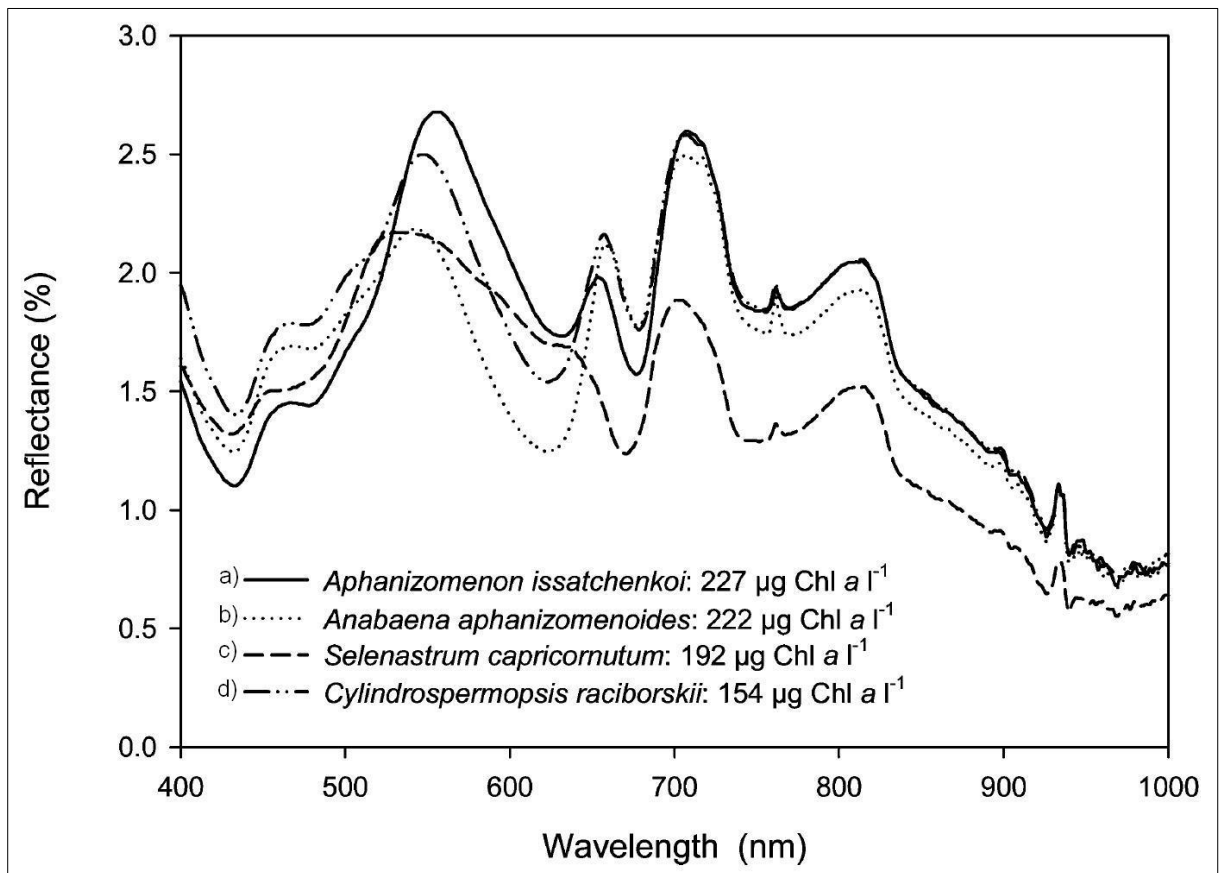


Figura 8: Espectros de reflectância sobre quatro espécies de fitoplâncton cultivadas. As concentrações de clorofila-a são indicadas na figura para cada organismo. As espécies de fitoplâncton se referem aos seguintes grupos fitoplanctônicos: *Cyanophyceae* (a, b, d); *Chlorophyceae* (c).

Fonte: Adaptado de SVÁB et al. (2005).

Notadamente, na Figura 8 a reflectância não acompanha as variações das concentrações de clorofila-a para a grande maioria dos comprimentos de onda, o que ocorre em toda a região do infravermelho próximo e em praticamente toda a região do visível, com exceção da reflectância em aproximadamente 440 nm, sendo este o único comprimento de onda, neste caso, em que as concentrações de clorofila-a e a reflectância “aparentemente” se ajustam linearmente em uma relação inversa. Deve ser destacado, que este comprimento de

onda (440 nm - Azul), também é fortemente afetado pela matéria orgânica dissolvida colorida (FISCHER et al., 1986; CARDER et al., 1991; RUDDICK et al., 2001; ZHANG et al., 2009).

O espectro de reflectância relacionado ao organismo de *Chlorophyceae* (*Selenastrum*) (Figura 8), mostra um comportamento espectral totalmente independente daqueles relacionados aos demais organismos fitoplanctônicos. Este espectro de reflectância, além de mostrar uma menor reflectância, principalmente nas regiões do vermelho e infravermelho próximo, para uma concentração de clorofila-a que poderia ser vista como intermediária entre aquelas verificadas para todos os organismos, corta os demais espectros de reflectância nas regiões do verde em direção a comprimentos de onda menores, com exceção do comprimento de onda em aproximadamente 440 nm como dito anteriormente.

No entanto, um aspecto importante deve ser ressaltado em relação ao comprimento de onda em 440 nm (Figura 8). Neste, as variações da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila entre *Aphanizomenon issatchenkoi* e *Anabaena aphanizomenoides* (Chl-a de 227 µg/L para 222 µg/L, respectivamente = Variação de 5 µg/L) e entre *Anabaena aphanizomenoides* e *Cylindrospermopsis raciborskii* (Chl-a de 222 µg/L para 154 µg/L, respectivamente = Variação de 68 µg/L), aparentemente são as mesmas ou pelo menos muito similares, para variações das concentrações de clorofila de 5 µg/L e 68 µg/L, respectivamente.

Além disso, no centro de absorção da radiação pela clorofila-a na região do vermelho (Figura 8), é notável nos espectros de reflectância relacionados à *Anabaena aphanizomenoides* e *Cylindrospermopsis raciborskii* que os valores de reflectância são praticamente os mesmos, mas que, no entanto, estão sob influência de concentrações de clorofila-a de 222 µg/L e 154 µg/L respectivamente, ou seja, para uma variação das concentrações de clorofila-a de 68 µg/L, praticamente não houve variação da reflectância no referido centro de absorção da clorofila-a na região do vermelho, o que corrobora com Gitelson et al. (2000) que relatam esta região do espectro como a menos sensível as variações nas concentrações de clorofila.

Por outro lado, uma variação da clorofila-a de 5 µg/L dos organismos de *Anabaena aphanizomenoides* (Chl-a = 222 µg/L) e *Aphanizomenon issatchenkoi* (Chl-a = 227 µg/L) proporcionou uma nítida variação da reflectância no centro de absorção da clorofila-a na região do vermelho (Figura 8), o que contradiz a referência a Gitelson et al. (2000) no parágrafo anterior. No pico de reflectância em torno de 700 nm, onde a reflectância é influenciada pelo espalhamento das células fitoplanctônicas, ou seja, pelas variações de densidade de organismos ou biomassa, é notável valores de reflectância praticamente iguais nos espectros referentes à *Aphanizomenon issatchenkoi* e *Cylindrospermopsis raciborskii*

(Figura 8), porém para concentrações de clorofila-a significativamente distintas destes organismos, de 227 $\mu\text{g/L}$ e 154 $\mu\text{g/L}$, respectivamente, ou seja, para uma variação de 73 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a, não ocorreu variação da reflectância em 700 nm. Neste sentido, questiona-se sobre a aplicação de modelos desenvolvidos por análise de regressão simples, sobre dados de reflectância de bandas isoladas, tanto em comprimentos de onda do vermelho como em torno de 700 nm. Estes modelos provavelmente estimariam concentrações de clorofila não representativas da realidade verificada nos dados?

Em estudo sobre as assinaturas ópticas de florações de *Cyanophyceae* no Mar Báltico, Metsamaa et al. (2006) destacaram que o espalhamento da radiação proporcionado pela água contendo *Cyanophyceae* é maior que o de outras espécies de fitoplâncton. Aqui podem ser lembradas as considerações de Quibell (1992) anteriormente descritas na presente revisão bibliográfica em relação a aplicação de regressão simples na ocorrência de mudanças na composição de espécies fitoplanctônicas, além dos resultados de SVÁB et al. (2005) anteriormente mencionados que em diferentes organismos de *Cyanophyceae* mostraram comportamento espectral distinto.

Além disso, Metsamaa et al. (2006) argumentaram que não é possível medir os espectros de reflectância de todas as possíveis espécies de fitoplâncton que possam estar presentes na água no início de uma floração de *Cyanophyceae*, porque diferentes espécies de fitoplâncton estão misturadas na coluna de água e suas propriedades ópticas dominam o espectro de reflectância. Os autores destacaram que as florações naturais de *Cyanophyceae* podem ser muito semelhantes às culturas de organismos desta classe fitoplanctônica em laboratório e, neste sentido, efetuaram simulações controladas de águas costeiras (ricas em matéria orgânica dissolvida colorida) e abertas do Mar Báltico, considerando a presença de espécies distintas de organismos fitoplanctônicos cultivados. Além disso, realizaram modelagens de espectros de reflectância para os diferentes tipos de água considerados (Figura 9).

Metsamaa et al. (2006) calcularam as diferenças entre os espectros de reflectância de *Aphanizomenon flos-aquae* simulando águas do Tipo II do Mar Báltico (águas costeiras) para estimar as variações mínimas de concentração de clorofila que podem ser reconhecidas por instrumentos de sensoriamento remoto hiperespectral. De acordo com os autores, para concentrações de clorofila em torno de 20 mg/m^3 , a diferença deve ser de pelo menos 4 mg/m^3 para que os espectros de reflectância sejam separáveis uns dos outros, ou seja, para que ocorra variação da reflectância propriamente dita. Para concentrações de clorofila em torno de 100 mg/m^3 , a diferença entre concentrações deve ser de pelo menos 10 mg/m^3 . Neste

sentido, os autores ressaltaram que a menor alteração nas concentrações de clorofila em que diferenças são detectáveis nos espectros de reflectância pode ser interpretada como a precisão na estimativa remota da clorofila.

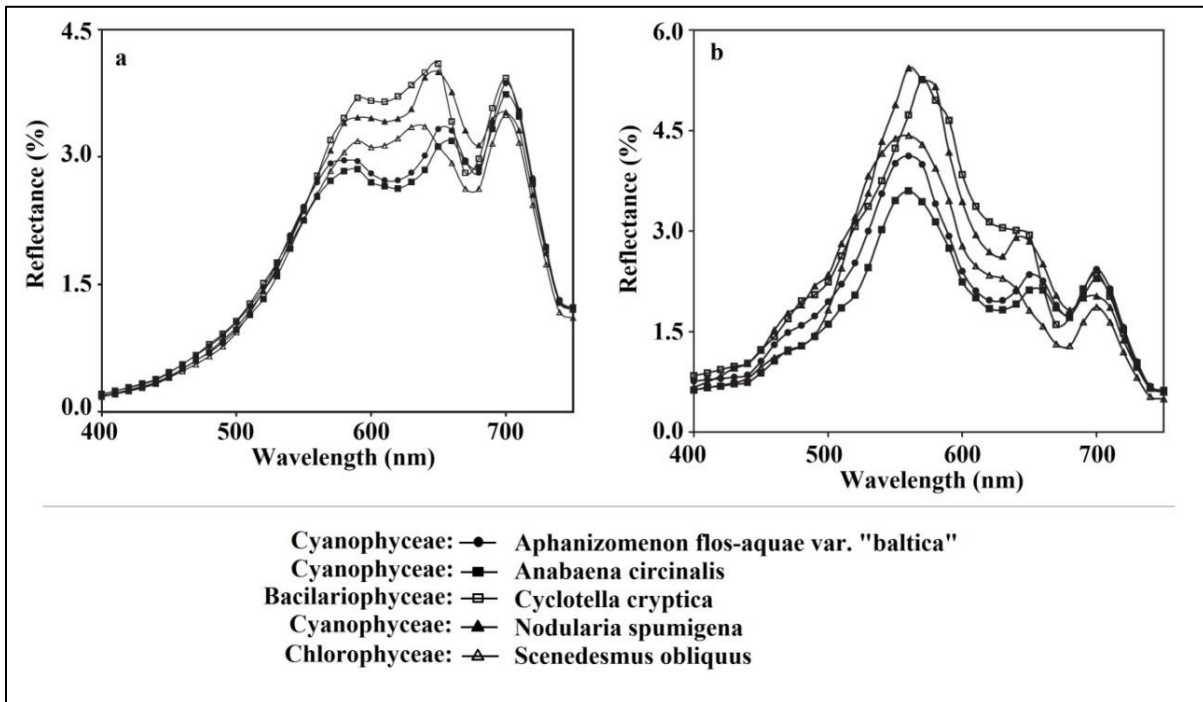


Figura 9: Espectros de reflectância modelados de diferentes espécies fitoplanctônicas. (a) Espectros de reflectância modelados de diferentes espécies fitoplanctônicas de águas costeiras do Mar Báltico (Águas do Caso II) ricas em matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), sendo a modelagem realizada utilizando as seguintes concentrações de componentes opticamente ativos (Chl-a = 30 mg/m³; Total de partículas não fitoplanctônicas = 6mg/L; CDOM $a_{\text{CDOM}(380)} = 15\text{m}^{-1}$). (b) Espectros de reflectância modelados de diferentes espécies fitoplanctônicas em águas abertas do Mar Báltico (Águas do Caso I), sendo a modelagem realizada utilizando as seguintes concentrações de componentes opticamente ativos (Chl-a = 30 mg/m³; Total de partículas não fitoplanctônicas = 2 mg/L; CDOM $a_{\text{CDOM}(380)} = 1,5\text{m}^{-1}$). O tanque utilizado para a realização das medições radiométricas tinha 30 litros de capacidade de armazenamento, paredes internas em cor preta e fundo convexo (de cor preta) para minimizar o seu efeito nos dados radiométricos.

Fonte: Adaptado de Metsamaa et al. (2006)

Sobre a detecção de florações de *Cyanophyceae* a partir de dados de sensoriamento remoto Metsamaa et al. (2006) ressaltaram que a concentração de clorofila-a deve ser de 8 à 10 mg/m³ antes que o pico de reflectância próximo a 650 nm (fluorescência da ficocianina) e a feição de absorção pela ficocianina em aproximadamente 620 nm tornem-se detectáveis em espectros de reflectância. Neste sentido, os autores mencionaram ser altamente improvável que o sensoriamento remoto possa ser usado para alertas precoces de florações de *Cyanophyceae* no Mar Báltico, pois uma concentração de clorofila-a superior a 4 mg/m³ indica uma floração naquelas águas. Além disso, salientaram que a precisão potencialmente viável das estimativas das concentrações de clorofila-a por sensoriamento remoto é variável, sendo que em águas dominadas por matéria orgânica dissolvida colorida, como é o caso das

águas do Mar Báltico, as incertezas referentes aos mapeamentos das concentrações de clorofila-a a partir de dados de sensoriamento remoto são altas. De acordo com Aguirre-Hernández et al. (2004) as estimativas de variáveis relacionadas ao fitoplâncton, a partir de dados de sensoriamento remoto, são dependentes da composição da comunidade fitoplanctônica e das respostas dos seus organismos constituintes às variáveis físicas, químicas e ambientais.

Até este ponto da presente revisão bibliográfica foram ressaltados de maneira mais significativa os efeitos dos próprios organismos fitoplanctônicos sobre as grandezas radiométricas, ou seja, os efeitos das partículas que contém a clorofila-a, os quais indicam que mesmo em águas contendo apenas fitoplâncton, erros de estimativa das concentrações de clorofila-a podem ocorrer se utilizarmos modelos empíricos de uma única banda espectral desenvolvidos por regressão simples. Somando-se aos fatores intrínsecos aos organismos fitoplanctônicos a presença dos demais componentes opticamente ativos nas águas, pode elevar o objetivo de estimar remotamente a clorofila-a fitoplanctônica, relatado ainda na década de sessenta por Clarke *et al.* (1970), a níveis mais complexos. Neste sentido, no próximo subitem são destacados trabalhos que ressaltam também os efeitos dos demais componentes opticamente ativos sobre as grandezas radiométricas e, além disso, algumas técnicas de sensoriamento remoto utilizadas nas tentativas de contornar os problemas associados para estimar remotamente as concentrações de clorofila fitoplanctônica, tentando manter certa ordem cronológica referente aos períodos de publicação dos trabalhos para evidenciar o desenvolvimento do sensoriamento remoto.

2.5.2 Efeitos da mistura de componentes opticamente ativos e técnicas de análise e modelagem

Segundo Fischer et al. (1986), em águas altamente produtivas como as águas costeiras oceânicas (Águas do Caso II), os materiais em suspensão não clorofilados, fitoplâncton e substância dissolvida amarela (CDOM) variam em tipologia e concentrações dentro de pequenas áreas e em curtos períodos de tempo, modificando a radiação emergente detectada pelos sensores remotos. Neste contexto, os autores mencionaram à feição de fluorescência da clorofila-a em 685 nm, como uma das características espectrais do fitoplâncton para a recuperação das concentrações de clorofila-a e, além disso, a razão entre as bandas espectrais do azul e verde, utilizada em sensoriamento remoto, com o objetivo estimar as concentrações

de clorofila-a fitoplanctônica em áreas de oceano aberto (Águas do Caso I), a qual seria aplicável somente em águas onde o fitoplâncton é a partícula suspensa dominante.

Frente as complicações, no que se refere à detecção remota de componentes óticos em águas costeiras oceânicas, Fischer et al. (1986) aplicaram a análise fatorial sobre radiâncias multiespectrais simuladas por modelo de transferência radiativa, para extrair informações espectrais características do fitoplâncton, material particulado em suspensão e matéria orgânica dissolvida colorida. Em suas análises Fischer et al. (1986) ressaltaram que a relação entre as bandas espectrais azul/verde aponta para a substância amarela (CDOM) e a matéria em suspensão não clorofilada (matéria em suspensão não viva), sendo a razão entre as referidas bandas, inútil para detecção de fitoplâncton e das suas concentrações de clorofila em águas costeiras oceânicas. Além disso, ressaltaram que a fluorescência da clorofila fitoplanctônica em 685 nm era uma característica detectada remotamente em águas costeiras oceânicas, no entanto, a não influência da matéria em suspensão não viva na feição espectral relacionada à fluorescência da clorofila, ainda deveria ser comprovada. Porém, salientaram que o material particulado em suspensão, não vivo, deveria ser facilmente derivado por sensoriamento remoto e que em boas condições de medição e com uma eficaz correção dos efeitos atmosféricos, os mencionados componentes da água poderiam ser discriminados remotamente.

Posteriormente, Sathyendranath et al. (1989) destacaram que duas abordagens eram consideradas na recuperação de informações acerca do fitoplâncton em águas oceânicas, sendo a primeira relacionada a cor do oceano, que por sua vez é associada às variações nas concentrações de clorofila e a segunda devida a fluorescência da clorofila. Segundo os autores as relações entre a cor do oceano e a concentração de clorofila são influenciadas pelas características dos organismos fitoplanctônicos, como os diferenciados tamanhos das células. A fluorescência da clorofila é afetada pelo estado fisiológico das células como o estresse nutricional. Por estes motivos, estas duas abordagens não poderiam, de acordo com os autores, produzir o mesmo tipo de informação.

Sathyendranath et al. (1989) ressaltaram que a técnica da cor do oceano tinha sido eficiente em águas oceânicas do Caso I, onde o fitoplâncton é o único fator independente que ocasiona as variações na cor das águas, no entanto, as águas costeiras oceânicas (Águas do Caso II), revelaram-se um problema bem maior para o sensoriamento remoto. Este tipo de água, segundo os autores, contendo material particulado em suspensão e matéria orgânica dissolvida que variam significativamente e independentemente, ou seja, não covariam com as concentrações de clorofila, exigiria algoritmos bem mais complexos do que a simples razão

entre as bandas do azul e verde, utilizada em águas oceânicas abertas (Águas do Caso I) para a recuperação da clorofila.

Neste sentido, um modelo de três componentes foi desenvolvido por Sathyendranath et al. (1989) para águas costeiras oceânicas do Caso II, considerando a clorofila-a, partículas não clorofiladas (matéria inorgânica) e matéria orgânica dissolvida. Segundo os autores, a não linearidade do sistema aquático impede a utilização de um único algoritmo para a recuperação das variáveis mencionadas. A dificuldade de recuperar as variáveis opticamente ativas está no efeito confuso ou sobreposto das mesmas nos dados espectrais. A recuperação das concentrações de clorofila torna-se difícil nas águas do Caso II, onde o sinal de pequenas quantidades de clorofila é sobreposto ou “mascarado” pelos efeitos de grandes quantidades de partículas não clorofiladas e matéria orgânica dissolvida.

Apesar disso, Sathyendranath et al. (1989) salientaram que as partículas não clorofiladas (material em suspensão) são as mais fáceis de recuperar a partir de dados de sensores remotos (O mesmo destacado por Fischer et al. (1986)) e a matéria orgânica dissolvida a mais difícil. Ressaltaram também, que ocorre a possibilidade de recuperação da clorofila em pelo menos algumas águas do Caso II, ou seja, devo dizer que para algumas condições das águas do Caso II as concentrações de clorofila podem ser recuperadas remotamente, destacando-se aqui a extrema variabilidade espacial e temporal das condições das águas do Caso II, vista pelas concentrações de seus componentes opticamente ativos, que variam em tipologia e concentrações dentro de pequenas áreas e em curtos períodos de tempo (FISCHER et al.,1986). Então, a recuperação remota da clorofila é dependente do conhecimento das condições das águas anteriormente a aplicação do algoritmo e este conhecimento deve ser obtido remotamente para não descaracterizar o que é fundamental no sensoriamento remoto, ou seja, o ato de obter dados e informações de um alvo sem entrar em contato com o mesmo, apesar de Jensen (2009) ter esta definição como globalizante, como mencionado no início desta revisão.

A variabilidade espacial e temporal das condições das águas do Caso II, e principalmente a complexidade óptica das mesmas, pode ser ainda maior, quando cada componente óptico é estudado separadamente, revelando características que podem afetar os dados radiométricos, a exemplo, dos produtos da degradação do fitoplâncton destacados por Carder et al. (1991). Estes pesquisadores relataram que o produto da degradação do fitoplâncton inclui feopigmentos, detritos e bactérias, perfazendo espectros de absorção da radiação semelhantes aos do CDOM (Matéria orgânica dissolvida colorida) em uma faixa de 410 nm a 640 nm (Figura 10).

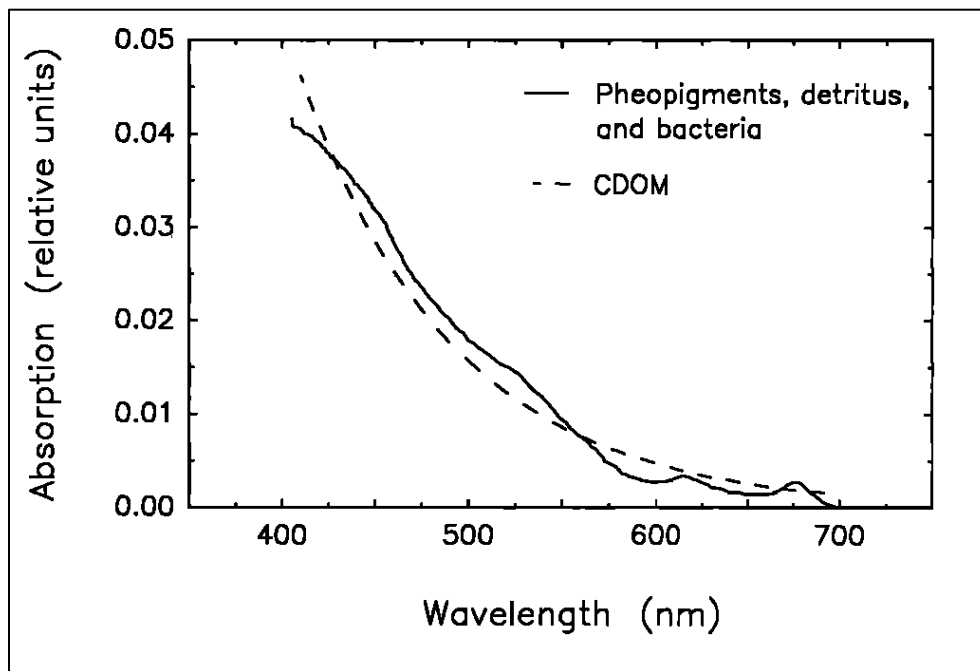


Figura 10: Coeficientes de absorção do produto da degradação do fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM).

Fonte: Adaptado de Carder et al. (1991); Kiefer & Soohoo (1982).

Em sua pesquisa, Carder et al. (1991) abordaram a utilização da banda em 412 nm (Influenciada por CDOM) que seria incluída no novo sensor *Sea-WiFS* lançado naquele período (Década de 1990), associada a outras duas bandas em 443 nm e 665 nm, para estimar clorofila e o produto da degradação do fitoplâncton. Isso contrapôs a utilização, naquele período, das bandas de 443 nm e 520 nm do sensor CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) para recuperar remotamente as concentrações de clorofila-a, que segundo os autores produziam estimativas errôneas da ordem de 133%. A adição da nova banda espectral (412 nm) proporcionou a remoção de parte dos efeitos de absorção do produto da degradação do fitoplâncton nas avaliações remotas das concentrações de clorofila-a. No entanto, os autores ressaltaram que os algoritmos desenvolvidos não se tratavam de formulações universais, ou seja, eram passíveis de modificações, devido às variações no que se refere à absorção da radiação pelo fitoplâncton ocasionadas pelo “efeito pacote” relatado por Kirk (1976; 1983) ou mesmo o efeito de embalagem de Duysens (1956). Devo destacar que em um contexto de águas carregadas de partículas opticamente ativas não clorofiladas os autores salientam sobre efeitos das mudanças na composição da comunidade fitoplanctônica, ou melhor, aos efeitos dos diferentes organismos sobre os dados radiométricos, como também se verificou no trabalho de Mueller (1974), Quibell (1992) e Gitelson (1999).

Segundo Carder et al. (1991) a caracterização da absorção da radiação pelo fitoplâncton deve passar pelo entendimento de como os tamanhos das células, as variações nas concentrações de nutrientes e a disponibilidade de luz no ambiente aquático afetam os pigmentos intracelulares. Neste contexto, e anteriormente a Carder et al. (1991), Herbland et al. (1985) descobriram que células pequenas eram as principais responsáveis pelas concentrações de clorofila em águas superficiais oligotróficas do Oceano Atlântico Equatorial. Então para águas com maior disponibilidade de nutrientes, as células maiores dominariam em densidade e teriam grande participação para as concentrações de clorofila medidas, o que Carder et al. (1986) tinham verificado em águas subtropicais ao largo da Flórida nos Estados Unidos da América (EUA). Frente a estas constatações, Carder et al. (1991) ressaltaram que desenvolver descrições empíricas da variação da absorção da radiação em relação às concentrações de clorofila-a, que se devem principalmente às variações na composição da comunidade fitoplanctônica, que por sua vez são influenciadas em grande parte pela disponibilidade de luz e nutrientes no ambiente aquático, era uma tarefa particularmente importante, para fins de desenvolvimento de algoritmos capazes de recuperar adequadamente as concentrações de clorofila do fitoplâncton a partir de dados de sensoriamento remoto, ou seja, até aqui não tem-se algoritmos capazes de estimar clorofila fitoplanctônica, veremos então o que ocorre mais adiante.

Por outro lado, ainda na década de 1990, outras abordagens foram exploradas para estimar remotamente a clorofila fitoplanctônica e contornar os problemas associados aos demais componentes opticamente ativos. Gitelson (1992) analisou a natureza e características do pico de máxima reflectância em torno de 700 nm, em função das variações nas concentrações de clorofila-a fitoplanctônica, que segundo o autor não tinha sido totalmente explicado até aquele período. Gitelson (1992) considerou também, as concentrações de matéria orgânica dissolvida e matéria em suspensão em suas análises, que poderiam influenciar os dados de reflectância.

A altura do pico de máxima reflectância em torno de 700 nm (R_{maxred} — Onde: R=Reflectância; max =Máxima; red = Vermelho (Reflectância máxima na região do vermelho ou pico de reflectância em torno de 700 nm)) foi medida acima da linha de base entre 675 nm e 750 nm. A partir destas medidas duas razões de bandas foram ressaltadas por Gitelson (1992), sendo a primeira R_{maxred}/R_{560} nm, que se trata de uma normalização em 560 nm da reflectância máxima em torno de 700 nm, acima da referida linha de base, e a segunda, R_{maxred}/R_{675} nm, se trata de uma razão entre a máxima reflectância em torno de 700 nm acima da linha de base e a reflectância em 675 nm.

As análises de regressão simples entre as concentrações de clorofila-a e as razões de bandas consideradas por Gitelson (1992) geraram coeficientes de determinação (R^2) a partir de 0,93 ou superiores para todos os corpos de água estudados pelo pesquisador, os quais se encontravam em diferentes estados tróficos. Segundo o autor, a razão $R_{\text{maxred}} / R_{560 \text{ nm}}$ poderia ser um indicador preciso da concentração de clorofila-a para corpos de água de diferentes estados tróficos, com um erro padrão de estimativa menor que 2 mg/m^3 (Figura 11a). Além disso, Gitelson (1992) ressaltou que as concentrações de clorofila também poderiam ser derivadas a partir da razão $R_{\text{maxred}} / R_{675 \text{ nm}}$, e explicou que a diferença entre os comprimentos de onda considerados nesta razão de bandas é negligenciável e, portanto, as influências da matéria orgânica dissolvida e da matéria em suspensão, é quase a mesma, e devido a isso a relação entre $R_{\text{maxred}} / R_{675 \text{ nm}}$, dependeria apenas das concentrações de clorofila-a. O deslocamento do pico de máxima reflectância em torno de 700 nm também se relacionou consideravelmente com os dados de clorofila-a, coletados por Gitelson (1992) em quatro diferentes corpos de água (Figura 11b), com um erro de estimativa de cerca de 2 nm.

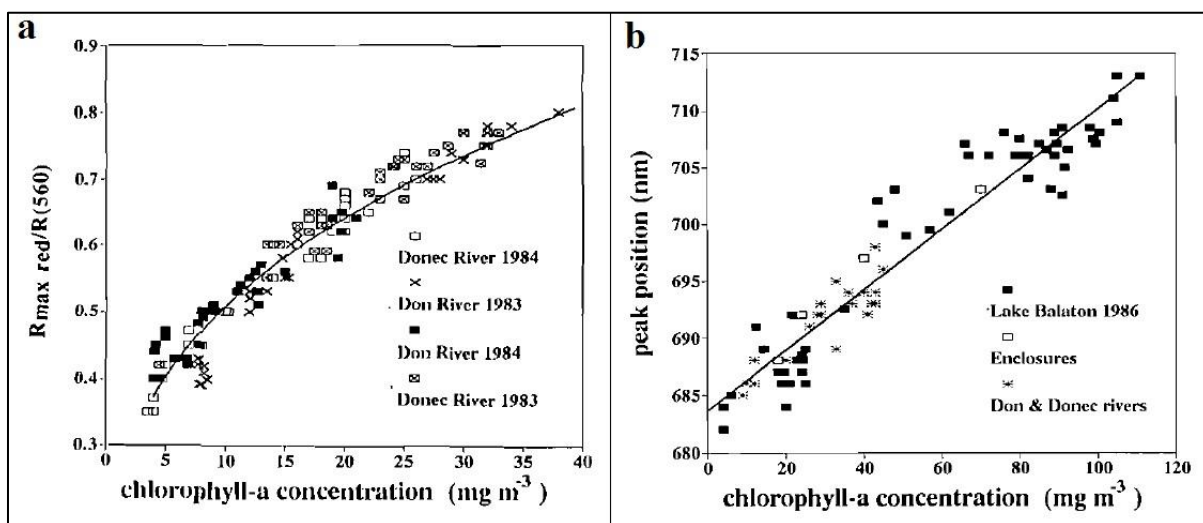


Figura 11: (a) Concentrações de clorofila-a em relação à reflectância de 700 nm normalizada em 560 nm, para vários corpos de água. (b) As relações entre a posição de pico de máxima reflectância em torno de 700 nm e a concentração de clorofila-a.

Fonte: Adaptado de Gitelson (1992).

A abordagem ressaltada por Gitelson (1992) tem sua importância no fato de que o autor não considerou os efeitos dos diferentes organismos fitoplanctônicos, demonstrados por Mueller (1974), Kirk (1976; 1983) ou mesmo Quibell (1992), mas sim o fitoplâncton como um todo e suas concentrações de clorofila, ou seja, sem distinções espectrais entre os organismos que compõem o fitoplâncton, mas, no entanto, Gitelson (1992) e também os demais pesquisadores que participaram de pesquisas posteriores (GITELSON et al., 1994;

GITELSON et al., 1999; GITELSON et al., 2000) buscaram contornar os efeitos dos demais componentes ópticos sobre a reflectância, considerando princípios físicos entre a radiação eletromagnética incidente no corpo de água e o fitoplâncton. Segundo os autores, a feição de absorção em 670 nm marca a absorbância máxima por clorofila na faixa vermelha do espectro. Neste comprimento de onda, a absorção e a dispersão por clorofila e pelas paredes das células dos organismos fitoplanctônicos estão quase em equilíbrio, sendo que essa reflectância em 670 nm mostra a sensibilidade mínima à concentração de clorofila. Para uma concentração de clorofila $> 20 \text{ mg/m}^3$, a reflectância em 670 nm depende principalmente da concentração de matéria suspensa inorgânica. Com relação à reflectância para além de 750 nm, Gitelson et al (2000) salientam que esta depende das concentrações da matéria em suspensão orgânica e não orgânica e é insensível aos pigmentos fitoplanctônicos.

Porém, para as técnicas apresentadas em Gitelson (1992), Gitelson et al. (1994), Gitelson et al. (1999) e Gitelson et al. (2000), desenvolvidas com vistas na estimativa remota das concentrações de clorofila, envolvendo a reflectância máxima em torno de 700 nm, além da área da feição espectral acima de uma linha de base de 670 nm e 750 nm, a precisão nas estimativas é variável com erros de 3 mg/m^3 a 59 mg/m^3 verificados em Gitelson et al. (2000), mesmo que em Gitelson (1992) a precisão reportada foi de 2 mg/m^3 , como dito anteriormente. O mesmo pode ser dito em relação à precisão reportada por Gitelson (1992), no que se refere às estimativas das concentrações de clorofila a partir do deslocamento do pico de máxima reflectância em torno de 700 nm, anteriormente mencionada, quando se verificam que variações nas concentrações de clorofila-a de mais de 30 mg/m^3 praticamente não proporcionaram deslocamentos do referido pico de máxima reflectância (Figura 11b).

Neste contexto, Gitelson et al. (2000) ressaltaram que para um único corpo de água diferentes abordagens devem ser usadas para a estimativa remota das concentrações de clorofila. Os coeficientes das relações de causa e efeito entre a concentração de clorofila e as variáveis medidas remotamente devem ser ajustados para cada caso separadamente, ou seja, diferentes condições das águas exigem algoritmos distintos e referências de campo para a validação, e cada algoritmo exige o conhecimento das condições das águas antes da aplicação dos mesmos.

Aqui cabe lembrar que Zheng & DiGiacomo (2017) ressaltaram que não há algoritmos universalmente aceitos para derivar com precisão clorofila-a em águas costeiras oceânicas a partir de dados de reflectância de sensoriamento remoto. Até aqui, esta mesma constatação parece ser atribuível às águas interiores. No entanto, outras técnicas também foram relatadas para contornar os efeitos dos demais componentes opticamente ativos e

estimar clorofila fitoplanctônica, além de outros componentes das águas a partir de dados de sensoriamento remoto.

No mesmo período em que Gitelson (1992) publicava seus resultados, Chen et al. (1992) abordavam a derivada da reflectância para a estimativa de componentes opticamente ativos em corpos de água turbidos, justamente para eliminar os efeitos dos demais componentes opticamente ativos. A derivada da reflectância tinha sido anteriormente proposta por Demetriades-Shah et al. (1990) para separar os efeitos de "primeiro plano da vegetação" dos efeitos do solo abaixo do dossel em espectros de reflectância de culturas agrícolas. Estes pesquisadores então sugeriram que deveria ser possível decompor outros sinais compostos, incluindo da água turva, usando a derivada da reflectância.

Segundo Chen et al. (1992), o uso da derivada da reflectância ainda não tinha sido relatado na literatura para a estimativa de componentes das águas naquele período de desenvolvimento do sensoriamento remoto. Neste sentido, os pesquisadores realizaram experimentos em nível laboratorial e de campo para a aplicação da análise derivativa sobre dados de reflectância, visando à estimativa das partículas sólidas em suspensão. De acordo com os pesquisadores, com a aplicação da derivada da reflectância, erros de estimativa de menos de 8% da média das concentrações de sólidos em suspensão foram verificados (o que fez aproximadamente 18 mg/L de acordo com os dados dos autores) e, neste sentido, o método com a utilização da derivada da reflectância em comprimentos de onda de 727 nm e 560 nm separadamente ou em uma subtração destas bandas (727 nm - 560 nm) era promissor para estimar remotamente as concentrações de sólidos em suspensão em corpos de água.

No contexto da análise derivativa, Goodin et al. (1993) ressaltaram que a aplicação das derivadas de primeira e segunda ordem eliminam os efeitos da água e de sólidos em suspensão, respectivamente, permanecendo o efeito das concentrações de clorofila sobre os dados, o que posteriormente foi mencionado por outros pesquisadores como Rundquist et al. (1996), Tsai & Philpot (1998) e Galo et al. (2008). Aqui deve ser destacado que nem sempre a segunda derivada se correlaciona significativamente com as concentrações de clorofila em regressões empíricas simples, mas sim a primeira derivada, como pode ser verificado em trabalhos publicados por Han & Rundquist (1997), Arraut et al. (2005) e Rudorff et al. (2007). Isso evidencia, de maneira geral, as variações aleatórias e independentes dos componentes opticamente ativos das águas e suas influências nos resultados, como ressaltaram Fischer et al. (1986), Sathyendranath et al. (1989) e demonstrou Mantovani (1993) em seus experimentos.

Mantovani (1993) realizou experimentos em nível laboratorial para a obtenção do Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) da água contendo uma cultura de *Chlorella vulgaris*

(*Chlorophyceae*), considerando geometrias de iluminação e medição controladas (Figura 12). O pesquisador objetivou verificar as faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria inorgânica particulada e orgânica dissolvida e apesar de não ressaltar a análise derivativa, evidencia os efeitos de diferentes componentes opticamente ativos sobre a reflectância, porém considerou somente *Chlorella vulgaris* como fitoplâncton.

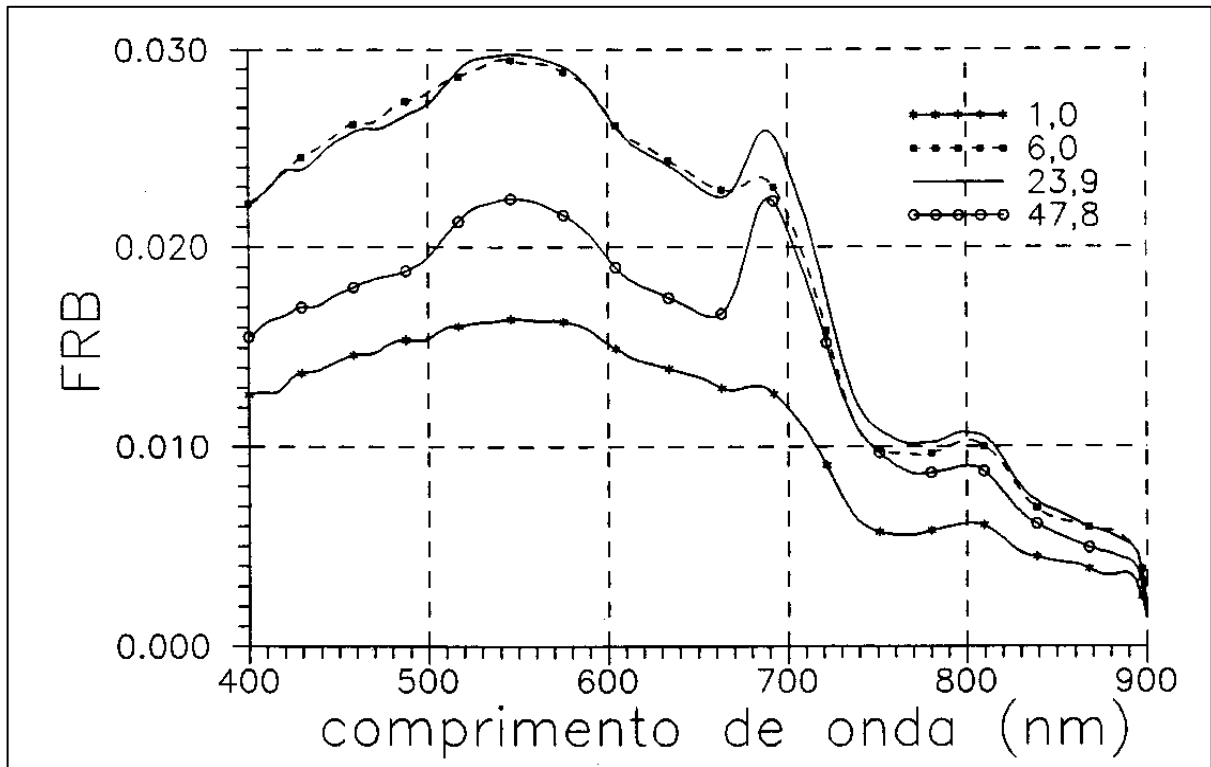


Figura 12: Fator de Reflectância Bidirecional para quatro concentrações de clorofila de *Chlorella vulgaris*. As medições radiométricas foram realizadas em tanques de mesmo tamanho (56 cm de diâmetro / 60 cm de altura), porém com diferenciados revestimentos internos. A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada halógena com filamento de tungstênio e potência de 1000 watts, a um ângulo de 35 graus em relação a vertical inscrita no centro do tanque. O autor salientou que os resultados obtidos com a utilização do tanque com revestimento interno preto fosco foram os que mais se aproximaram das condições de campo.

Fonte: Adaptado de Mantovani (1993).

Nos resultados da Figura 12, obtidos por Mantovani (1993), ocorreram situações distintas que mantem certa relação com o que foi relatado por Quibell (1992), sendo a primeira referente à ascendência dos valores de reflectância em função de aumentos das concentrações de clorofila-a de *Chlorella vulgaris* até determinada concentração, e a segunda, a diminuição da reflectância em função do aumento na concentração de clorofila-a, notadamente em toda a faixa espectral da região do visível. No entanto, Quibell (1992) relatou a diminuição da reflectância somente para concentrações de clorofila muito superiores (> 600 mg/m³) (Ver Figura 3b) e no trabalho de Mantovani (1993) as diminuições ocorreram a partir de concentrações de 47,8 µg/L, conforme Figura 12.

Os resultados de Mantovani (1993) anteriormente expostos nesta revisão bibliográfica (Figura 12) demonstraram os efeitos de *Chlorella vulgaris* sobre a reflectância da água, ou seja, as feições espectrais características da absorção da radiação pela clorofila são facilmente verificados e a variação da reflectância se deve apenas às variações nas densidades de uma única espécie de fitoplâncton na água. Por outro lado, em água contendo este mesmo tipo organismo fitoplanctônico, na presença de matéria inorgânica particulada (MIP) e matéria orgânica dissolvida (MOD), a reflectância devida aos organismos fitoplanctônicos (Somente *Chlorella vulgaris*) é afetada (Figura 13).

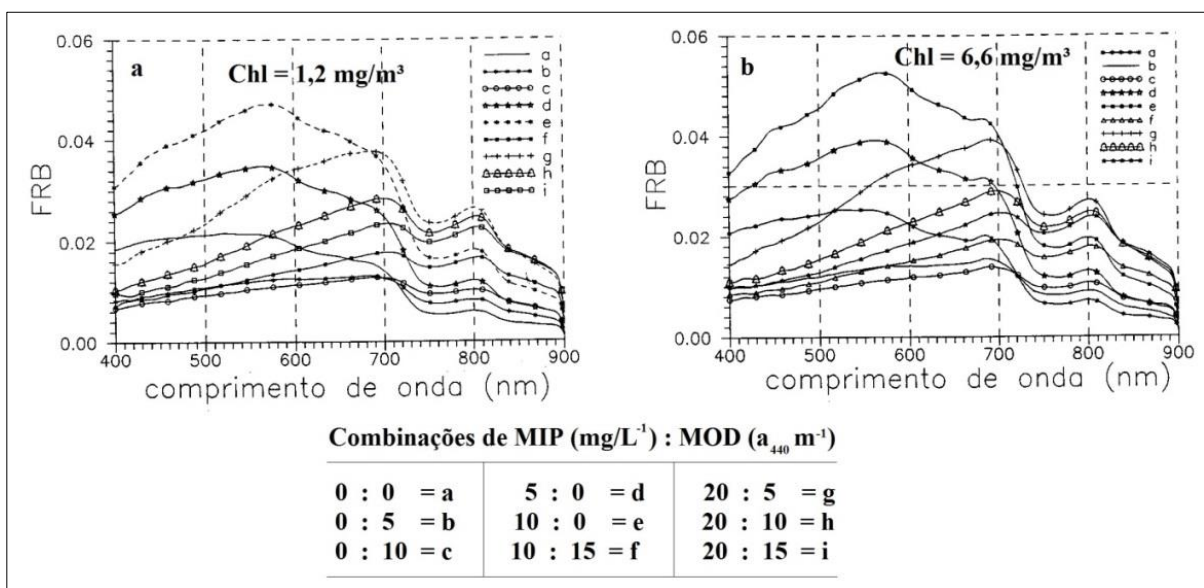


Figura 13: Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) para duas concentrações de clorofila (Chl) e nove combinações de matéria inorgânica particulada (MIP) e matéria orgânica dissolvida (MOD). A presença de clorofila na água é verificada apenas na Figura 13b devido a tênues feições de absorção por este pigmento fitoplanctônicos em aproximadamente 670 nm. No entanto, sem saber sobre a concentração de clorofila na água, não há como saber se este pigmento está variando em concentração devido aos efeitos dos demais componentes opticamente ativos.

Fonte: Adaptado de Mantovani (1993).

Mantovani (1993) destacou que as faixas espectrais de maior sensibilidade à clorofila-a na presença de matéria inorgânica particulada e orgânica dissolvida foram 665 nm e 700 nm, que segundo o autor se referem às bandas de absorção e de fluorescência da clorofila-a, respectivamente, o que corrobora com o trabalho realizado por Gitelson (1992). Deve ser destacado que a pesquisa de Mantovani (1993) também corrobora com os relatos de Fischer et al. (1986) e Sathyendranath et al. (1989), anteriormente referenciados, em relação aos efeitos dos demais componentes opticamente ativos das águas sobre a reflectância, para a estimativa das concentrações de clorofila. O mesmo por ser dito em relação ao trabalho realizado por Han et al. (1994).

Han et al. (1994) demonstraram os efeitos de sólidos em suspensão na refletância da água contendo fitoplâncton, sendo este avaliado pela concentração de clorofila-a (Figura 14). A água de um tanque foi fertilizada para promover o aumento da biomassa fitoplanctônica. O grupo fitoplanctônico dominante foi *Cyanophyceae*. Nos experimentos, concentrações distintas de sólidos em suspensão inorgânicos foram acrescentadas na água com concentrações constantes de clorofila-a (718 mg/m³; 295 mg/m³). Os sedimentos se referiram a partículas de variadas granulometrias (areia fina; silte; argilas) em diferentes proporções. As concentrações de sólidos variaram de 50 mg/L até 1000 mg/L.

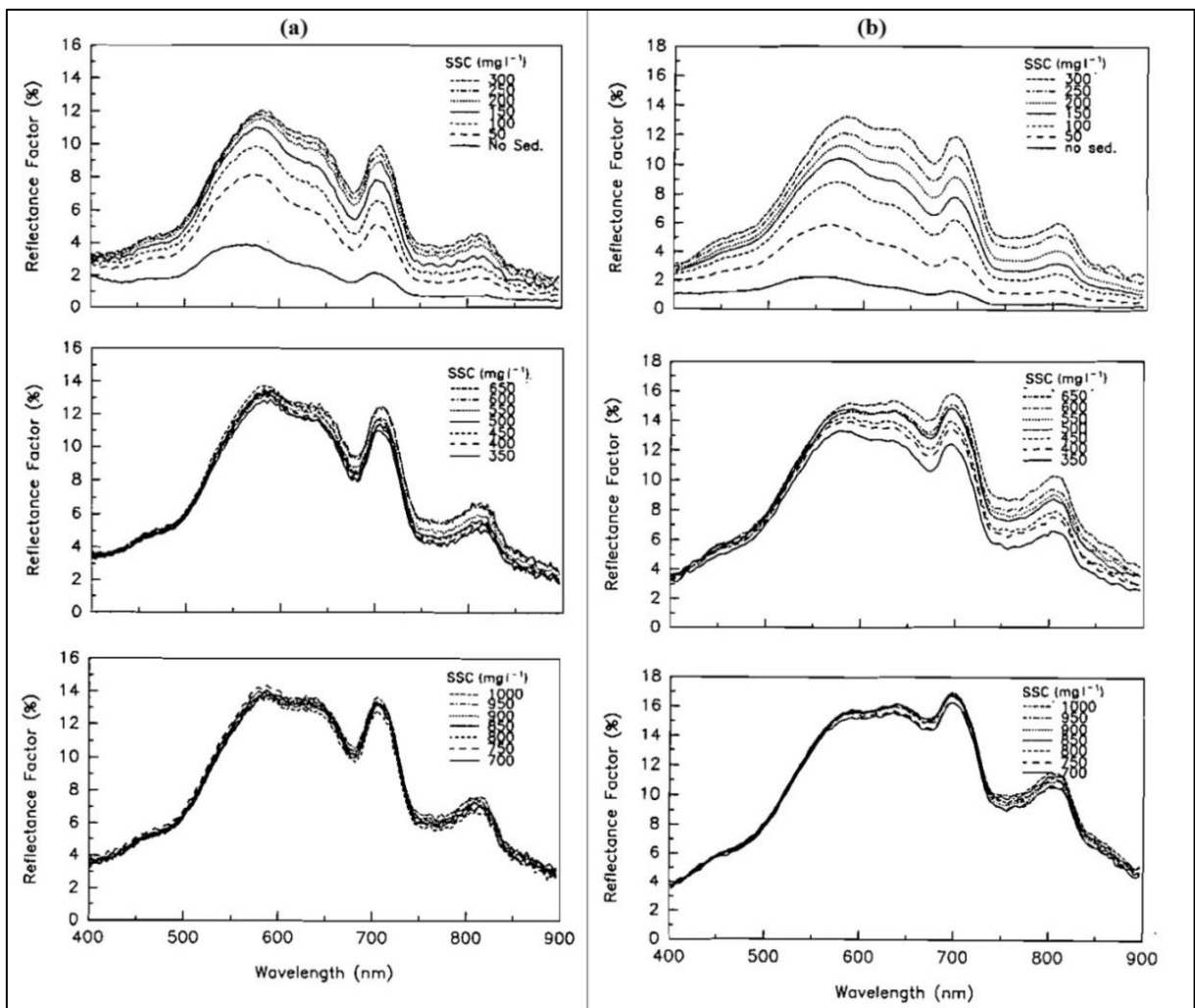


Figura 14: Espectros de refletância obtidos nos experimentos realizados por Han et al. (1994). (a) Espectros de refletância obtidos no experimento I com concentrações de clorofila-a constantes de 718 mg/m³. (b) Espectros de refletância obtidos no experimento II com concentrações de clorofila-a constantes de 295 mg/m³. O tanque utilizado para as medições radiométricas tinha capacidade de 7510 litros, 3,66 m de diâmetro e profundidade de 91 cm, fabricado em vinil com mesmo tipo de revestimento interno. Os experimentos foram realizados ao ar livre sob luz solar direta.

Fonte: Adaptado de Han et al. (1994).

Para concentrações de clorofila-a de 718 mg/m^3 (Figura 14a –Experimento I) e 295 mg/m^3 (Figura 14b – Experimento II), sendo estas constantes, a reflectância variou claramente em função das concentrações diferenciadas de sólidos suspensos inorgânicos, porém com magnitudes diferenciadas, seja em função dos distintos tamanhos das partículas inorgânicas (Mais finas para o Experimento II) ou devido as diferentes concentrações de clorofila-a (718 mg/m^3 e 295 mg/m^3). São fatos que a profundidade da banda de absorção na região do vermelho para o Experimento I é muito superior àquela verificada nos dados adquiridos no Experimento II e que as magnitudes dos valores de reflectância são inferiores em todos os comprimentos de onda, o que ocorreu devido a maior concentração de clorofila utilizada no Experimento I (Figura 14).

A reflectância variou positivamente em toda a faixa entre 400 nm e 900 nm para ambos os experimentos de Han et al. (1994) e para a maioria das concentrações de sólidos, ou seja, tanto para o Experimento I como para o Experimento II e de acordo com o número de espectros de reflectância, podem ter vinte e um valores de reflectância distintos para concentrações de clorofila-a constantes (718 mg/m^3 - Experimento I (Figura 14a); 295 mg/m^3 - Experimento II (Figura 14b)) em qualquer comprimento de onda entre 400 nm e 900 nm, com uma aparente estagnação das variações da reflectância para as concentrações de sólidos inorgânicos iguais ou superiores a 700 mg/L . As variações da reflectância notadamente foram superiores na faixa espectral entre 550 nm e 700 nm.

Situações experimentadas por Han et al. (1994) em termos de concentrações de clorofila-a constantes, muito provavelmente não serão verificadas em ambiente aquático natural ou mesmo em reservatórios construídos pelo homem, no entanto, pequenas oscilações das concentrações de clorofila-a para variações substanciais e aleatórias da reflectância, devido a presença de outros componentes opticamente ativos, podem ocorrer (Ex. GROSS et al., 2019). Neste sentido, os coeficientes gerados a partir das relações de causa e efeito entre a reflectância e a clorofila-a em análises de regressão simples não expressariam a verdadeira variação da reflectância em função das concentrações de clorofila-a, mesmo porque, os valores de reflectância seriam o resultado do efeito combinado de diferentes componentes opticamente ativos, que não covariam no tempo e espaço dos corpos de água do Caso II (FISCHER et al., 1986; SATHYENDRANATH et al., 1989).

Frente aos resultados de Han et al. (1994) cabe aqui explorar a reflectância somente em função de componentes opticamente ativos não clorofilados, ou seja, sem a presença de organismos fitoplanctônicos na água, conseqüentemente de concentrações de clorofila, conforme Lodhi et al. (1997). Estes realizaram experimentos radiométricos em tanque de água

com 3,66 metros de diâmetro, 90 cm de profundidade sob luz solar direta. No referido tanque, as feições espectrais e a magnitude dos valores de reflectância da água clara foram modificadas por sedimentos originários de diferentes tipos de solos, caracterizados por granulometrias distintas de suas partículas dominantes (Figura 15).

As tênues feições espectrais da água clara foram significativamente aumentadas à medida que maiores concentrações de solo argiloso são inseridas no tanque (Figura 15a). Com as concentrações variando de 50 a 1000 mg/L deste tipo de solo, é notável o deslocamento da máxima reflectância na região do verde, em aproximadamente 550 nm em direção a comprimentos de onda maiores e a configuração da máxima reflectância entre 650 e 700 nm a medida que maiores concentrações de sólidos eram inseridas. No entanto, ressalta-se que em água clara e até a medida de 200 mg/L de solo argiloso, a reflectância entre 650 e 700 nm é menor que aquela do verde entre 550 e 600 nm. A partir de então ocorre uma inversão e a reflectância se torna maior entre 650 e 700 nm gerando o mencionado pico de reflectância máxima nesta faixa espectral. Além disso, devo destacar na Figura 15a, uma tênue, mas importante feição de absorção da radiação, constada no espectro de reflectância da água clara em aproximadamente 670 nm que facilmente poderia ser atribuída à clorofila-a fitoplanctônica em meio a concentrações substanciais de partículas não clorofiladas, mas que, no entanto, se deve a própria água e foi aprofundada pelo efeito dos sedimentos de solo argiloso.

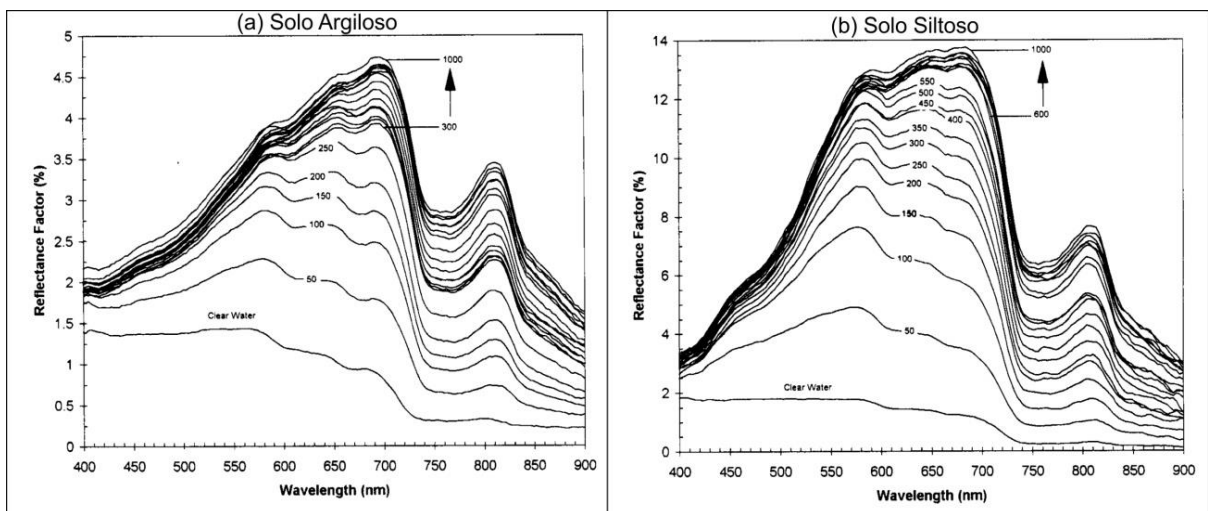


Figura 15: Medidas de reflectância da água contendo sedimentos de solo argiloso e siltoso. (a) Medidas de reflectância da água clara e de água com vários níveis de concentração de sedimentos em suspensão de solo argiloso, variando de 50 a 1000 mg/L. (b) Medidas de reflectância da água clara e de água com vários níveis de concentração de sedimentos em suspensão de solo siltoso.

Fonte: Adaptado de Lodhi et al. (1997).

Com a adição de solo siltoso (maior granulometria) em água clara, e em proporções iguais a do solo argiloso (menor granulometria) de 50 a 1000 mg/L (Figura 15b), o deslocamento do pico de reflectância do verde em direção aos comprimentos de onda maiores também ocorre, assim como a máxima reflectância entre 650 e 700 nm. Por outro lado, a reflectância foi aproximadamente 10% superior para toda a faixa espectral estudada por Lodhi (1997), devido a não presença de matéria orgânica escura no solo siltoso que, porém, estava presente no solo argiloso, promovendo maior absorção da radiação.

Jensen (2009) citando Lodhi (1997) ressalta que as características referentes à reflectância da água, considerando diferentes condições do meio aquático em relação às concentrações de sedimentos originários de solo argiloso e siltoso, indicam a discriminação espectral destes dois tipos de solo, além das suas granulometrias predominantes. Por outro lado, devo dizer que estes sedimentos presentes em água contendo fitoplâncton, indicam que as estimativas remotas das concentrações de clorofila-a podem não ser confiáveis, principalmente a partir de modelos de uma única banda desenvolvidos por regressão simples.

Neste contexto, Han & Rundquist (1997) relataram em seu trabalho a impossibilidade da estimativa da clorofila-a com a utilização de dados de reflectância, devido ao efeito de sólidos suspensos inorgânicos que dominaram o espectro de reflectância composto e mantiveram boa relação com a reflectância, sendo o oposto para clorofila-a. Segundo os autores, detectar a parte do sinal medido por um sensor remoto, atribuído à clorofila fitoplanctônica, é um problema de difícil solução, ou seja, devo aqui dizer, que é muito difícil discriminar um valor de reflectância em percentuais de contribuição de cada componente opticamente ativo da água.

Neste sentido, Han & Rundquist (1997) realizaram um estudo visando testar a razão entre as bandas 705 nm e 670 nm para estimar clorofila em um corpo de água turvo (Lago Branched Oak – Lincoln – Nebraska - EUA) e comparar os resultados com aqueles referentes a aplicação da primeira derivada em 691 nm. De acordo com os autores, a razão entre as bandas 705 nm e 670 nm em análises de regressão simples, não proporcionou modelos adequados para estimar as concentrações de clorofila. Por outro lado, a primeira derivada, em 691 nm proporcionou melhores resultados, sendo esta afirmativa dos autores provavelmente referente aos coeficientes de correlação (r) expostos na Figura 16b. Estas conclusões dos autores foram esplanadas para os dados de três datas de campanha de campo conjuntamente (Figura 16), sobre os quais os erros de estimativa alcançaram 54,27 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a. Porém de acordo com Han & Rundquist (1997), quando os dados são considerados para cada

data separadamente as duas técnicas para estimativa da clorofila-a não apresentam grandes diferenças, com erro máximo de estimativa de 70 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a.

Han & Rundquist (1997) ressaltaram na introdução de seu trabalho que as incertezas nas estimativas da clorofila a partir da razão de bandas 705 nm/670 nm, aumentam para concentrações de clorofila-a inferiores a 10 $\mu\text{g/L}$, porém ao que parecem, as incertezas podem ser atribuídas para concentrações de clorofila-a maiores também, tanto para a aplicação de razões de bandas como para a primeira derivada em 691 nm, mesmo porque, na Figura 16b podem ser verificadas variações nas concentrações de clorofila-a de mais de 150 $\mu\text{g/L}$, para praticamente o mesmo valor de derivada em 691 nm. Situação similar pode ser atribuída para a referida razão de bandas 705 nm/670 nm (Figura 16a), que Gitelson (1992) ressaltou para estimar clorofila em águas do Caso II, com diferentes estados tróficos.

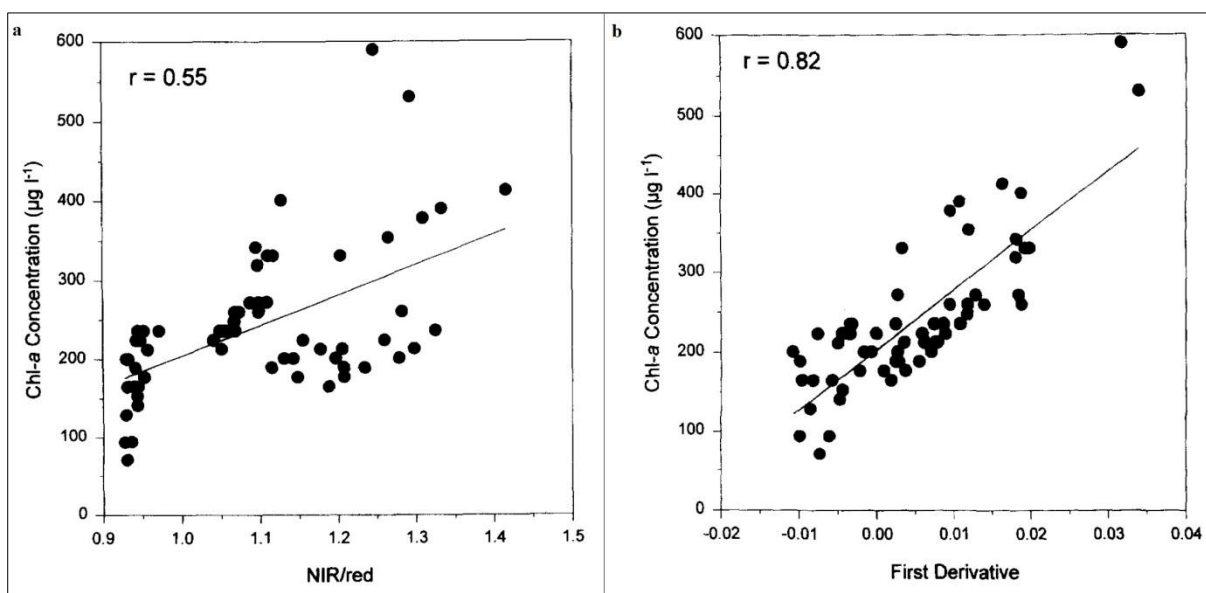


Figura 16: (a) Razão de bandas 705 nm (NIR)/670 nm (red) e, (b) derivada de primeira ordem em 691 nm, em função de concentrações de clorofila-a coletadas em 27 de agosto de 1992, 1 de outubro de 1992 e 16 de setembro de 1993 no Lago Branched Oak – Lincoln – Nebraska – EUA.

Fonte: Adaptado de Han & Rundquist (1997).

Especificamente para o resultado de Han & Rundquist (1997) referente à razão de bandas 705 nm/670 nm da Figura 16a, os dados se agrupam aparentemente em três grupos distintos que provavelmente se referem aos dados de cada campanha de campo realizada pelos autores do trabalho. Neste sentido, pode-se julgar que em cada campanha de campo as diferentes condições das águas, relacionadas aos componentes opticamente ativos, proporcionaram ajustes distintos com a mesma razão de bandas. Além disso, os autores apresentaram apenas o coeficiente de correlação (r) nos diagramas de dispersão das Figuras 16a e 16b, sendo que os coeficientes de determinação (R^2), que mostrariam o quanto

as variações na variável independente explicam as variações da variável dependente, seriam $R^2 = 0,3025$ e $R^2 = 0,6724$, ou seja, não tão promissores, presumindo que os ajustes serão distintos para cada campanha de campo.

A impossibilidade da estimativa da clorofila-a com a utilização de dados de reflectância, devido ao efeito de sólidos suspensos inorgânicos, relatada anteriormente por Han & Rundquist (1997) parece ser atribuível também para as demais técnicas utilizadas pelo autor. Um exemplo, da impossibilidade da estimativa da clorofila-a com a aplicação de modelos de uma única banda está nos resultados de um experimento realizado por Han (1997), para o qual uma interpretação similar aquela exposta anteriormente para os experimentos de Han et al. (1994) pode ser atribuída. Han (1997) manteve uma concentração constante de 302 mg/m³ de clorofila-a em um tanque com as mesmas dimensões verificadas para os experimentos de Han et al. (1994), onde primeiramente verificou os efeitos da água clara e de água contendo apenas fitoplâncton sobre a reflectância (Figura 17a). Posteriormente analisou a influência de concentrações de sedimentos inorgânicos a partir de 50 mg/L até 500 mg/L na reflectância de água, contendo os referidos 302 mg/m³ de clorofila-a constantes (Figura 17b).

A classificação fitoplanctônica não foi relatada nos experimentos de Han (1997), ou seja, considerou-se apenas fitoplâncton, independentemente das diferenciadas características de seus organismos constituintes verificadas em Mueller (1974), Kirk (1976; 1983) e Quibell (1992). No entanto, o que se destaca nos espectros de reflectância da Figura 17b é que sem as referências em relação às concentrações de clorofila associadas aos espectros de reflectância, o que seria visto como referências de campo, ou amostras coletadas, que no caso do experimento de Han (1997) foi constante (Chl = 302 µg/L), não têm como saber se a clorofila-a está variando em concentração, devido aos efeitos dos sólidos inorgânicos. Neste caso, entendendo que se analisarmos espectros de reflectância da água, por exemplo, de imagens de sensores orbitais, antes de aplicar um modelo de estimativa, visando verificar a presença de clorofila ou mesmo o domínio desta, não temos como saber se a clorofila está variando ou não, o que pode gerar incertezas nas estimativas, principalmente na aplicação de modelos de uma única banda espectral desenvolvido a partir de regressão simples.

Devo destacar ainda, que os espectros de reflectância do experimento de Han (1997) são gradativos e mostram claramente a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de sólidos inorgânicos. No entanto, em ambiente de campo são muitas as variáveis que irão afetar os dados radiométricos e os espectros em muitos casos provavelmente não estarão arrançados ou mesmo organizados como vemos na Figura 17b o

que dificulta ainda mais as análises, mesmo se realizarmos agrupamentos de espectros (Ex: Mapeamento por ângulo espectral), porque não temos as referências de campo. Como destacou Sathyendranath et al. (1989) para águas costeiras oceânicas do Caso II, a dificuldade de recuperar as variáveis opticamente ativas, está no efeito confuso ou sobreposto das mesmas nos dados espectrais. A recuperação das concentrações de clorofila torna-se difícil nas águas do Caso II, onde o sinal de pequenas quantidades de clorofila é sobreposto ou “mascarado” pelos efeitos de grandes quantidades de partículas não clorofiladas e matéria orgânica dissolvida, sendo que estas de acordo com Fischer et al. (1986) variam em tipologia e concentrações dentro de pequenas áreas e em curtos períodos de tempo, modificando a radiação emergente detectada pelos sensores remotos.

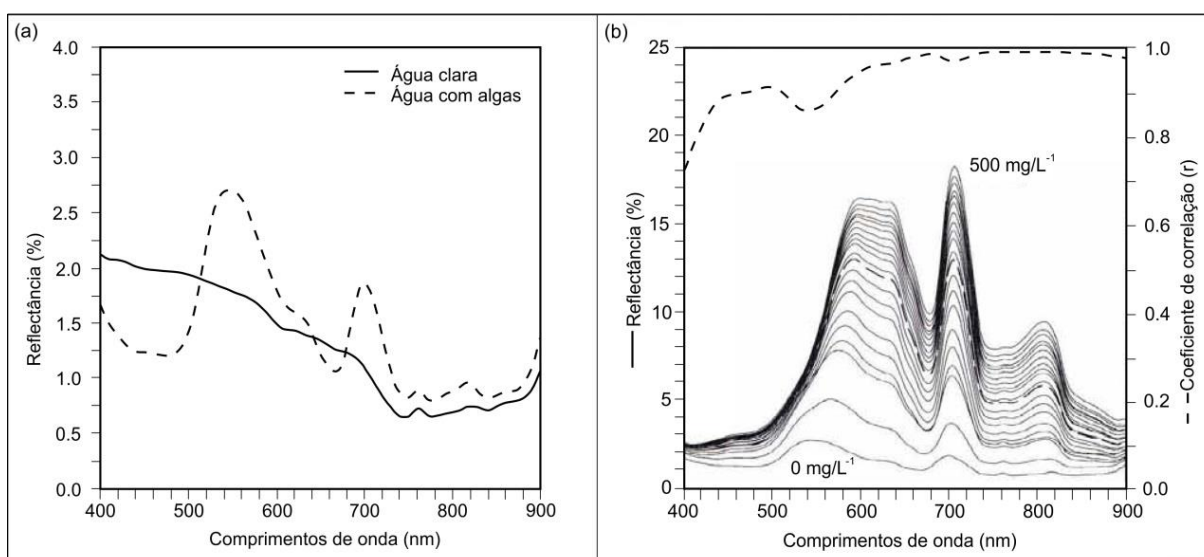


Figura 17: (a) Reflectância da água clara e de água contendo fitoplâncton; (b) Reflectância da água contendo fitoplâncton e várias concentrações de sedimentos inorgânicos em suspensão e coeficiente de correlação (r) entre as variáveis (combinação entre a concentração de 302 mg/m^3 de clorofila com concentrações distintas de sedimentos inorgânicos, em relação à reflectância (%)). Os sedimentos se referiram a um solo de argila vermelha coletado no Centro Oeste do Estado do Alabama nos Estados Unidos da América, contendo 35% de areia fina, 43% de silte e 22% de argila.

Fonte: Adaptado de Han (1997).

Posteriormente Ruddick et al. (2001) ressaltaram que a recuperação da clorofila-a em águas do Caso II, onde as propriedades ópticas da matéria inorgânica suspensa e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) também devem ser consideradas, era uma questão de intensa atividade de pesquisa, e poucos exemplos convincentes de concentrações de clorofila-a derivadas de dados de sensores remotos orbitais para tais águas estavam disponíveis. Exemplificando com os dados expostos na Figura 18, os autores destacaram que a decomposição de qualquer coeficiente de absorção total da água, derivado de satélite em componentes provenientes de fitoplâncton será claramente difícil, sem o uso do recurso da

absorção pela clorofila em 670 nm. Destaca-se que este comprimento de onda na região do vermelho do espectro eletromagnético foi utilizado por Gitelson et al. (2000) em suas razões de bandas, anteriormente mencionadas.

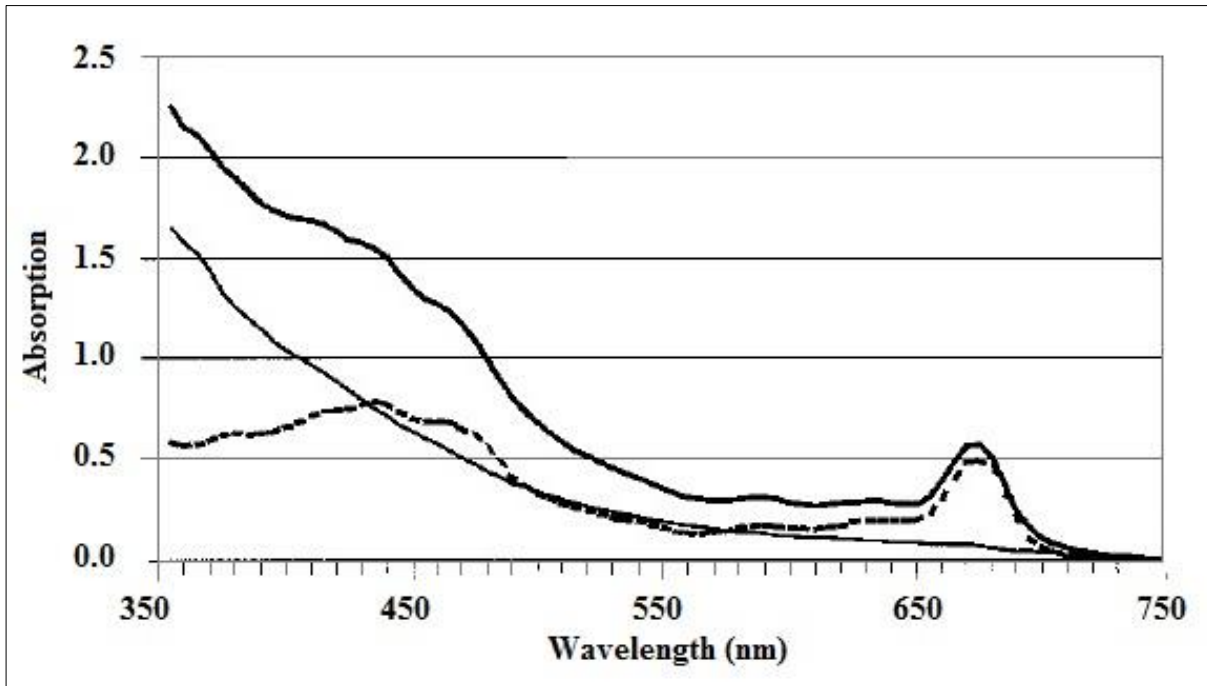


Figura 18: Espectros de absorção da radiação para águas costeiras da Bélgica, considerando os efeitos de partículas totais (curva sólida superior e espessa), componentes decorrentes do tripton (curva sólida mais fina) e fitoplâncton (curva tracejada).

Fonte: Adaptado de Ruddick et al (2001).

Estimativas errôneas das concentrações de clorofila ocorrem mesmo com a utilização de modelo semi-analíticos, os quais podem ser vistos como mais robustos que aqueles desenvolvidos por regressão simples a partir da reflectância de uma única banda espectral. Em águas oceânicas da costa brasileira, Kampel (2003) aplicou quatro algoritmos para a estimativa das concentrações de clorofila. Esses modelos foram aplicados, considerando a separação dos dados em períodos de verão e inverno. As relações entre os dados estimados e observados foram altas para o período de verão, vistas pelo coeficiente de determinação (R^2) na Figura 19. Porém, os modelos utilizados por Kampel (2003) tiveram desempenho inferior para os dados coletados em meses de inverno, principalmente para os modelos semi-analíticos Garver, Siegel, Maritorena versão 01 – (gsm01) (Maritorena et al., 2002) e redes neurais artificiais (nn) (Gross et al., 2000), conforme Figura 20.

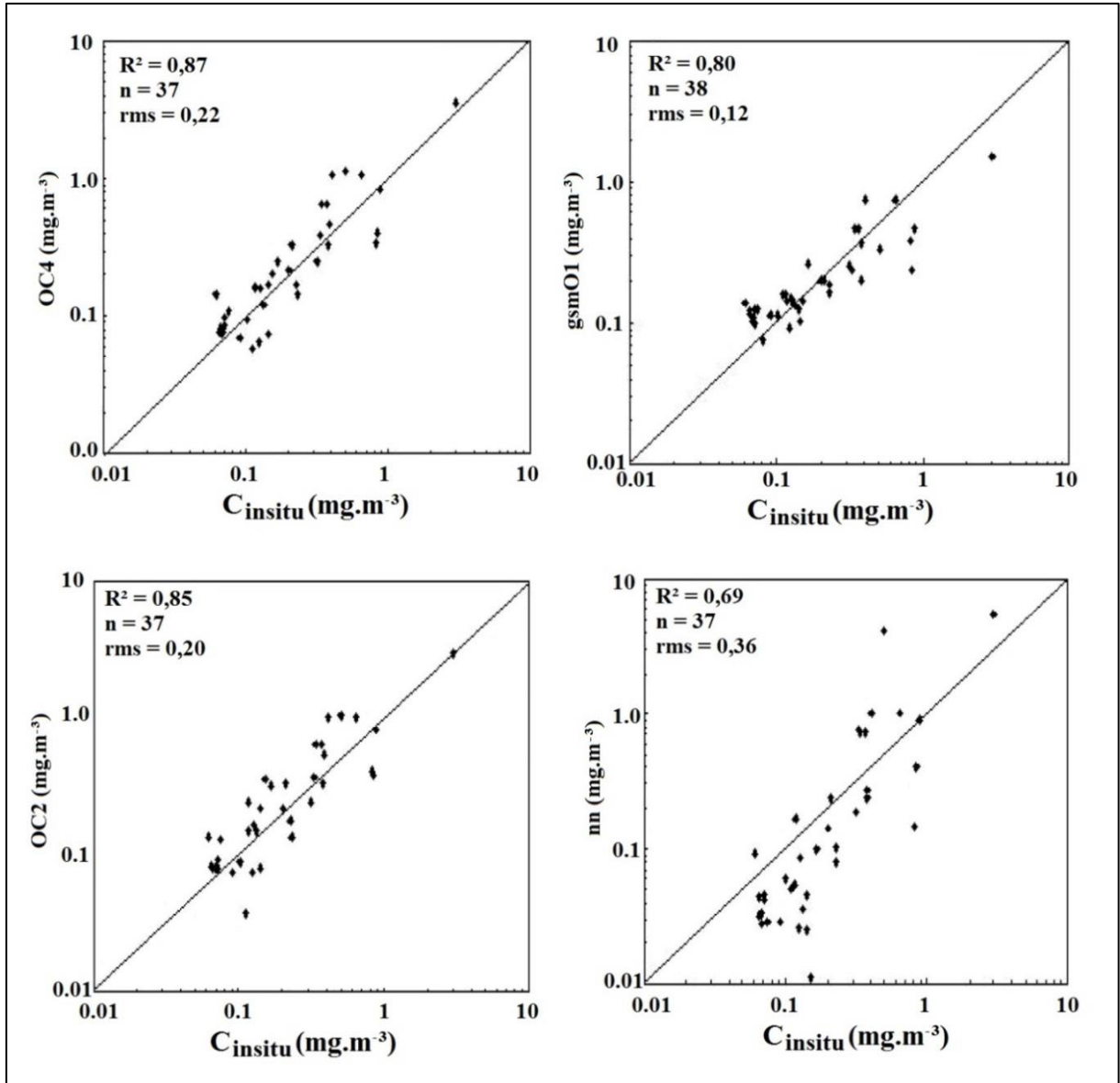


Figura 19: Diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por satélite (SeaWiFS-quatro algoritmos) versus a clorofila da superfície do mar medida in situ, para o período de verão. Foram utilizados os algoritmos empíricos Ocean Chlorophyll 4-bands - OC4 e Ocean Chlorophyll 2-bands - OC2 (O'Reilly et al., 2000), semi-analítico Garver, Siegel, Maritorena versão 01 - (gsm01) (Maritorena et al., 2002) e redes neurais artificiais (nn) (Gross et al., 2000).

Fonte: Adaptado de Kampel (2003).

As distintas estimativas da clorofila verificadas no estudo de Kampel (2003), para os períodos de verão e inverno, podem ter diversas explicações como a resolução das imagens *SeaWifs* utilizadas (1,1 km = LAC (*Global Area Coverage*); 4,5 km = GAC (*Local Area Coverage*)) o que pode ter produzido mistura espectral, além do ângulo de iluminação solar diferenciado em meses de verão e inverno. No entanto, Kampel (2003) relatou que os dados utilizados são de ambientes oceânicos distintos, ou seja, águas de mar aberto, dominadas pelo

fitoplâncton e águas costeiras, provavelmente influenciadas por outros componentes opticamente ativos.

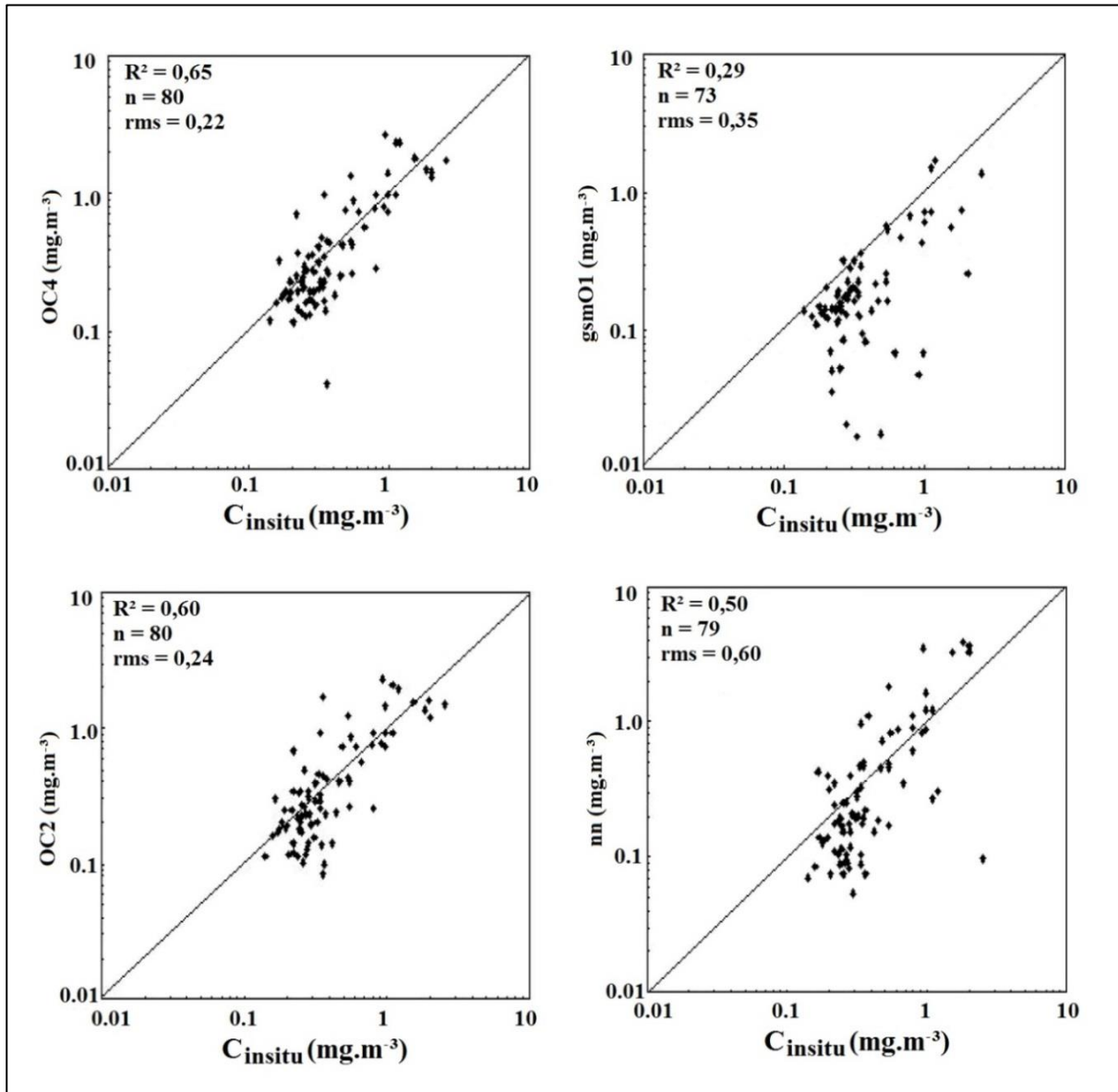


Figura 20: Diagramas de dispersão das clorofilas obtidas por satélite (SeaWiFS-quatro algoritmos) versus a clorofila da superfície do mar medida in situ, para o período de inverno. Sobre as imagens Sea-WiFS foram utilizados os algoritmos empíricos *Ocean Chlorophyll 4-bands* - OC4 e *Ocean Chlorophyll 2-bands* - OC2 (O'Reilly et al., 2000), o algoritmo semi-analítico Garver, Siegel, Maritorena versão 01 - (gsmO1) (Maritorena et al., 2002) e redes neurais artificiais (nn) (Gross et al., 2000).

Fonte: Adaptado de Kampel (2003).

Outro exemplo das influências de distintos componentes opticamente ativos sobre dados de sensoriamento remoto foi relatado por SVÁB et al. (2005) (Citado anteriormente nesta revisão bibliográfica). De acordo com os resultados do experimento realizado pelo autor, em águas carregadas de partículas inorgânicas (340 mg/L) as menores concentrações de clorofila-a geram feições de absorção e picos de refletância muito tênues ou praticamente

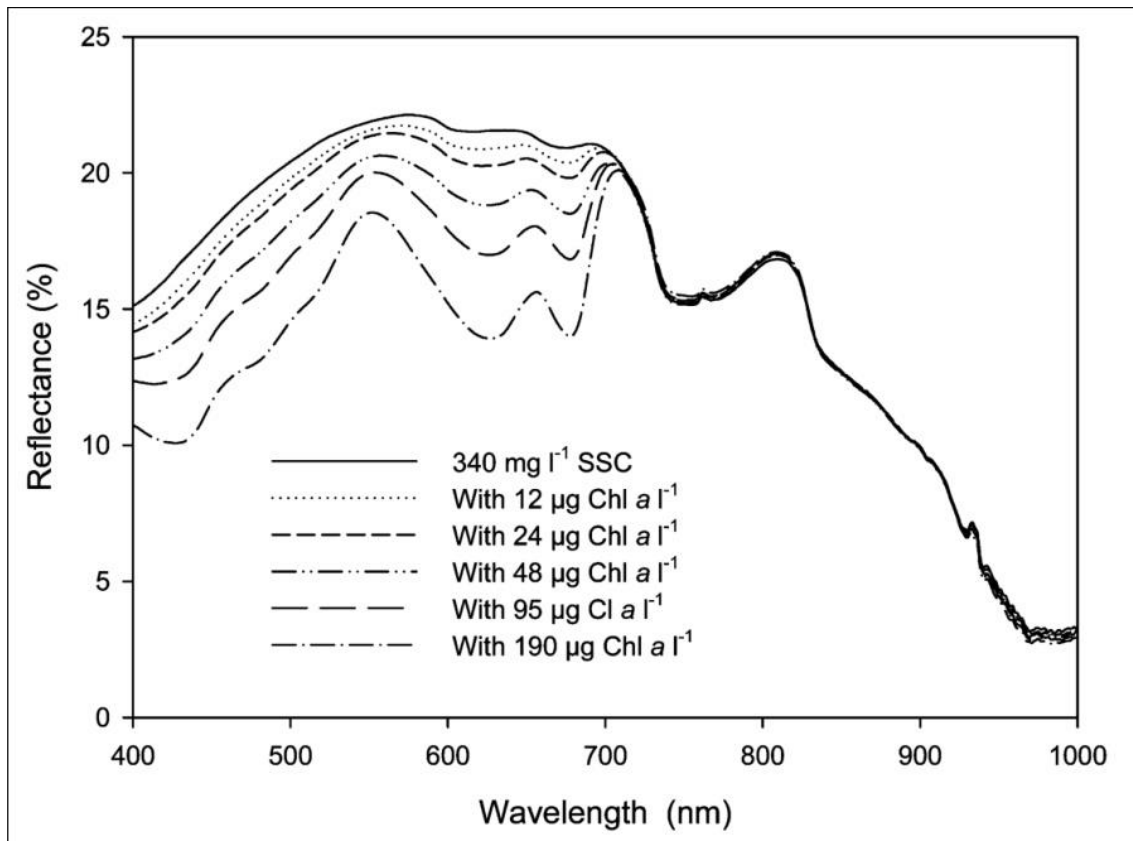
inexistentes. À medida que são verificadas maiores concentrações de clorofila-a de uma cultura de *Cylindrospermopsis raciborskii* (*Cyanophyceae*), conjuntamente a concentração constante de sólidos inorgânicos (340 mg/L), as feições de absorção na região do vermelho e o pico de refletância na região do verde se tornam proeminentes, assim como o pico de refletância em 700 nm (Figura 21).

É fato que na referida Figura 21, elaborada por SVÁB et al. (2005), as distintas concentrações de clorofila ocasionaram variações da refletância somente na faixa espectral entre 400 nm e um pouco além de 700 nm, sendo praticamente nula a variação da refletância em direção a comprimentos de onda maiores, ou seja, na região do infravermelho próximo, as variações nas concentrações de clorofila-a que alcançaram 190 µg/L não foram capazes de promover maiores variações da refletância, além daquela ocasionada pelas partículas inorgânicas.

Dos seis espectros de refletância, constados na Figura 21, cinco deles se tratam do efeito combinado de uma concentração de sólido inorgânico constante (340 mg/L) e cinco diferentes concentrações de clorofila-a sobre a refletância, ou seja, os valores de refletância não expressam na realidade o efeito das diferentes concentrações de clorofila-a, conseqüentemente das distintas densidades de organismos de *Cylindrospermopsis raciborskii* (*Cyanophyceae*) contidos na água, pois nos mesmos ocorre participação dos efeitos ocasionados pelas partículas inorgânicas. Neste contexto, SVÁB et al. (2005) ressaltaram que os resultados, obtidos em seu trabalho, demonstraram claramente que a clorofila-a do fitoplâncton não pode ser determinada diretamente a partir de valores de refletância, devido principalmente à influência dos sólidos inorgânicos em suspensão. Então porque ainda se está aplicando modelos de uma única banda desenvolvidos por regressão simples para estimar clorofila a partir de dados de refletância? Será que nenhum dos autores que publicaram tais modelos, leram SVÁB et al. (2005) ou os demais trabalhos até aqui citados na presente revisão bibliográfica. Esta é uma questão intrigante.

Uma informação não menos importante que as demais, constadas na Figura 21, é que a feição de absorção em aproximadamente 620 nm, devida a ficocianina de organismos de *Cyanophyceae*, se torna expressiva ou proeminente quando as concentrações de clorofila-a alcançam os maiores valores, principalmente a partir de 48 µg/L. Isso indica, que a depender das condições da água, em termos de seus constituintes opticamente ativos, ocorre a necessidade de significativas concentrações de pigmentos para a detecção de feições relacionadas ao fitoplâncton, principalmente para grupos fitoplanctônicos em particular, como no caso *Cyanophyceae*, se o objetivo for a discriminação remota dos mesmos, como também

destacaram Metsamaa et al. (2006) e Kutser et al. (2006), ou seja, é difícil de saber antes da aplicação de um modelo de estimativa das concentrações de clorofila-a, qual o organismo fitoplanctônico dominante nas águas.



Fonte: Adaptado de SVÁB et al. (2005).

Seguindo uma certa ordem cronológica das publicações, retorna-se aqui a discussão sobre aplicação da análise derivativa sobre dados de reflectância com vistas na estimativa das concentrações de clorofila-a. Ressalta-se o trabalho de Arraut et al. (2005). Estes autores analisaram a reflectância obtida por Espectrorradiometria de campo, em relação às concentrações de clorofila-a e sólidos suspensos totais (SST) das águas do Lago Grande de Curuai no Estado do Pará, Brasil, em período de seca. Utilizando os dados espectrais subdivididos em classes de espectros de reflectância referentes a águas opticamente distintas (Classes 1, 2, 3) (Figura 22), determinadas por Rudorff et al. (2004) para as águas do Lago Grande de Curuai, Arraut et al. (2005) aplicaram a primeira derivada sobre a reflectância em 676 nm e em regressão simples, verificaram um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,912$ com os dados de clorofila-a. No entanto, para esta avaliação os dados utilizados foram apenas

de uma das classes de água analisadas (Classe 2 – Figura 22b). Segundo os autores, a segunda derivada na faixa entre 684 nm e 687 nm proporcionou um $R^2 = 0,631$ com as concentrações de clorofila-a analisadas para duas classes de água verificadas (Classes 1 e 2) (Figura 22d). O menor coeficiente de determinação (R^2) obtido com a aplicação da segunda derivada ocorreu devido ao amplo domínio espectral dos sólidos suspensos totais que gerou curvas de reflectância com forte irregularidade, o que dificultou a obtenção de um melhor ajuste entre as variáveis, ou seja, devo dizer que a segunda derivada não eliminou o efeito dos sólidos sobre os dados espectrais como deveria ocorrer segundo Goodin et al. (1993), Rundquist et al. (1996), Tsai & Philpot (1998) e Galo et al. (2008).

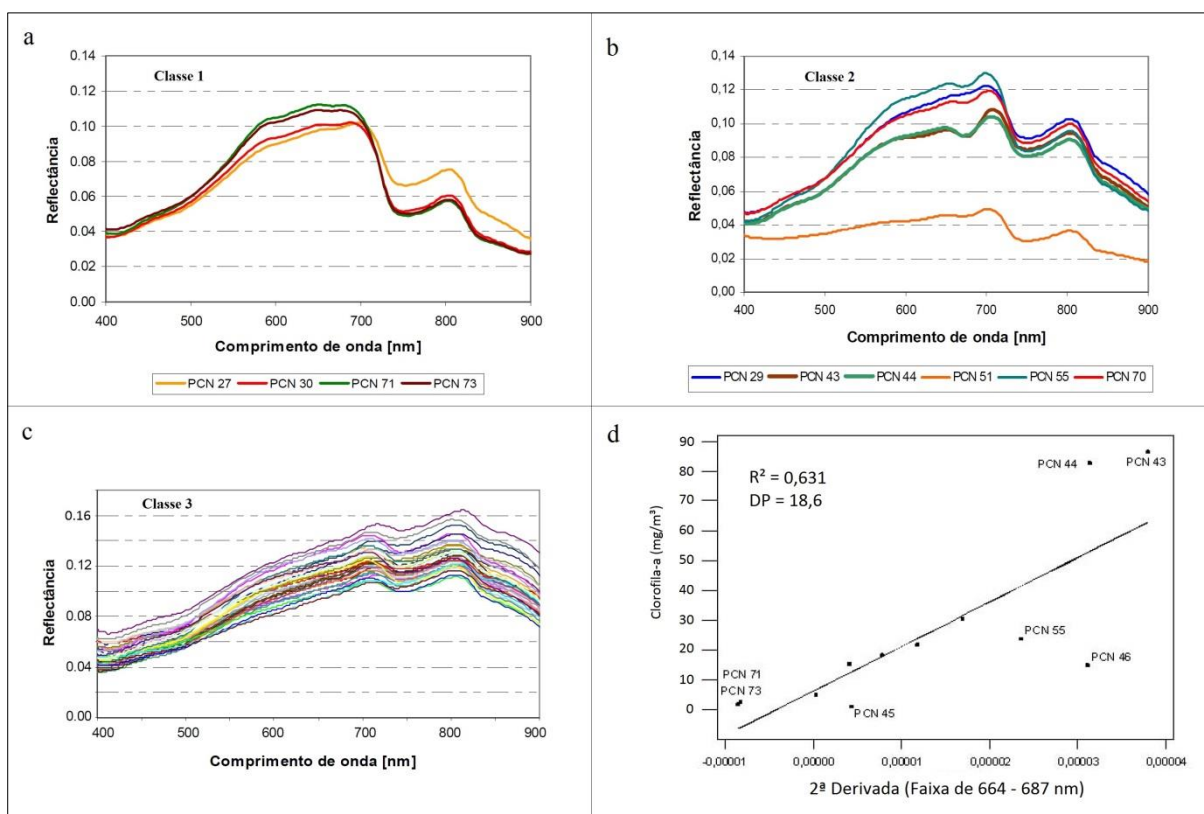


Figura 22: Curvas espectrais para distintas classes de água. (a) Curvas espectrais (Classe 1) de pontos amostrais com altas concentrações de sedimentos em suspensão e baixas concentrações de clorofila. (b) Curvas espectrais (Classe 2) com banda de absorção centrada em 676 nm, característica da clorofila-a. (c) Curvas espectrais de amostras da classe 3. (d) Reta de regressão ajustada para clorofila-a em função da segunda derivada na faixa entre 664 nm e 687 nm dos espectros de reflectância das classes 1 e 2.

Fonte: Adaptado de Arraut et al. (2005).

Em um ponto amostral específico sobre o Lago Grande de Curuai, Arraut et al. (2005) mencionam uma concentração de 15,18 $\mu\text{g/L}$ de clorofila-a, a qual devo destacar que estava em meio a 133 mg/L de SST, e perfez uma tênue feição de absorção na região do vermelho do espectro eletromagnético para os dados da classe 1 no ponto amostral PCN 27 (Figura 22a). O

mesmo devo atribuir aos dados da Classe 2 dos pontos amostrais PCN 51 (SST = 59,35 mg/L; Chl-a = 21,49 µg/L) e PCN 29 (SST = 222,88 mg/L; Chl-a = 18,16 µg/L), conforme os resultados dos autores da Figura 22b. Esses casos específicos, porém, não incomuns, demonstram os efeitos da mistura destes componentes ópticos sobre a reflectância da água e as dificuldades para a estimativa das concentrações de clorofila-a a partir de dados de reflectância ou mesmo a partir de derivadas da reflectância.

Arraut et al. (2005) ressaltaram que a primeira derivada da reflectância foi eficiente na caracterização dos efeitos da clorofila-a, ressaltando as feições de absorção. No entanto, consideraram que os modelos de estimativa apresentados tem valor ilustrativo e não conclusivo, porque seriam necessárias análises mais aprofundadas e um maior número de dados de diferentes localidades, para talvez generalizar os padrões observados, que, porém, segundo os autores, podem ser o ponto de partida para estudos posteriores. Neste sentido, deve ser ressaltado que o trabalho do Arraut et al. (2005) se tratou de uma continuação da pesquisa de Barbosa et al. (2003), como destacaram os autores na apresentação de seus objetivos de pesquisa.

Outra aplicação da análise derivativa foi realizada por Rudorff et al. (2007), que objetivaram verificar o potencial desta técnica sobre dados de reflectância hiperespectrais, coletados sobre águas opticamente complexas da Amazônia brasileira, a partir sensores em nível de campo e orbital, para estabelecer relações empíricas e estimar a distribuição espacial dos constituintes opticamente ativos da água. Os autores argumentaram que as partículas inorgânicas em suspensão dominam a reflectância da água e, neste sentido, é difícil estimar as concentrações de clorofila-a em águas turvas a partir de dados de reflectância diretamente ou mesmo a partir de razões de bandas, considerando tanto os dados de reflectância coletados por Espectrorradiometria de campo como aqueles obtidos em imagens do sensor orbital *Hyperion/EO-1*. Os coeficientes de correlação entre clorofila-a e dados de reflectância não foram significativos e, neste sentido, os autores salientaram que se torna difícil estimar clorofila-a no período de cheia na planície amazônica com dados de reflectância, sendo a diferenciação destes dados uma alternativa, ou seja, a análise derivativa.

Os dados do sensor orbital *Hyperion/EO-1* foram utilizados por Rudorff et al. (2007), para a espacialização das concentrações de clorofila-a no corpo de água, a partir do modelo empírico exposto na Figura 23. Este modelo de estimativa, a partir de dados de primeira derivada, gerou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,73$, sendo a sua validação realizada a partir de 30% dos dados coletados satisfatória, como pode ser verificado nas Figuras 23a e

23b. O modelo foi submetido a um ajuste polinomial para, segundo os autores, melhorar o coeficiente de determinação.

De fato, para os dados coletados por Rudorff et al. (2007), a derivada teve um bom ajuste com as concentrações de clorofila-a, como mencionaram os autores em suas conclusões. No entanto, os autores ressaltaram que os algoritmos desenvolvidos para estimar os constituintes opticamente ativos das águas são estabelecidos somente com o auxílio de dados de referência de campo, sendo os mesmos úteis somente dentro do contexto sazonal, no qual os dados foram coletados para seu desenvolvimento, devido às significativas alterações nos intervalos referentes às variações nas concentrações dos constituintes opticamente ativos, o que segundo os autores ocorre na planície amazônica. Os autores finalizam seu trabalho destacando que é preciso avanço nos estudos para o estabelecimento de outras regressões empíricas e modelos semi-analíticos com o intuito de atender aos intervalos específicos de variação dos constituintes opticamente ativos da água de cada período de pulso de inundação em sua área de estudo. Destaca-se que, na Figura 23b, claramente o modelo superestimou parte das concentrações de clorofila-a, ou seja, devo dizer mais uma vez que até aqui não temos modelos para a estimativa da clorofila fitoplanctônica.

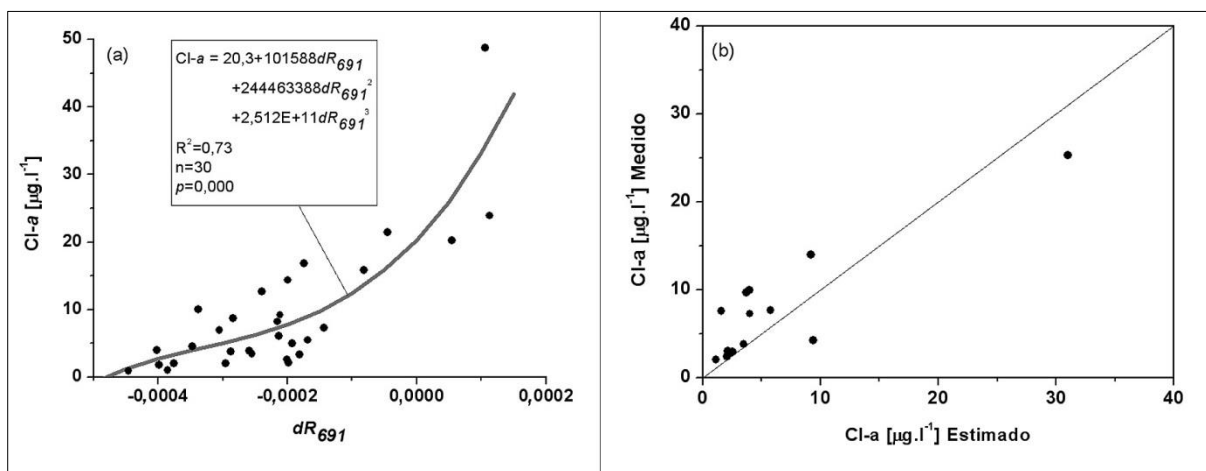


Figura 23: (a) Modelo empírico para estimar clorofila-a (Chl-a) na Região próxima a confluência entre os rios Tapajós e Amazonas no período de cheia a partir da derivada da reflectância de primeira ordem em 691 nm dR_{691} . (b) Teste de exatidão do modelo (Validação).

Fonte: Adaptado de Rudorff et al. (2007).

As derivadas de primeira e segunda ordem também foram aplicadas por Londe (2008) em relação às concentrações de clorofila-a do reservatório de Ibitinga no Estado de São Paulo. Neste trabalho, a pesquisadora verificou os comprimentos de onda em valores de derivadas (primeira e segunda ordem) com melhor correlação com as concentrações de clorofila-a que variaram significativamente (Cerca de $7,0 \text{ mg/m}^3$ à cerca de 80.000 mg/m^3), devido as

ocorrências de florações fitoplanctônicas na área de estudo, sendo este um caso atípico de aplicação das derivadas, ou seja, sobre águas com florações fitoplanctônicas. O comprimento de onda com melhor ajuste com a clorofila-a foi em 747 nm. Para este comprimento de onda, a derivada de primeira ordem foi submetida em análise de regressão simples com as concentrações de clorofila-a, conforme Figura 24. O ajuste entre as variáveis foi significativo, no entanto, Londe (2008) salientou que a reta de regressão ajustou-se aos três pontos com maior concentração de clorofila-a (Figura 24a) e, a partir da exclusão dos referidos pontos o coeficiente de determinação tornou-se inferior (Figura 24b), o que impossibilitou a utilização da equação da reta de regressão como modelo de estimativa das concentrações de clorofila-a, como destacou a autora, sendo a mesma explicação referente à aplicação da segunda derivada.

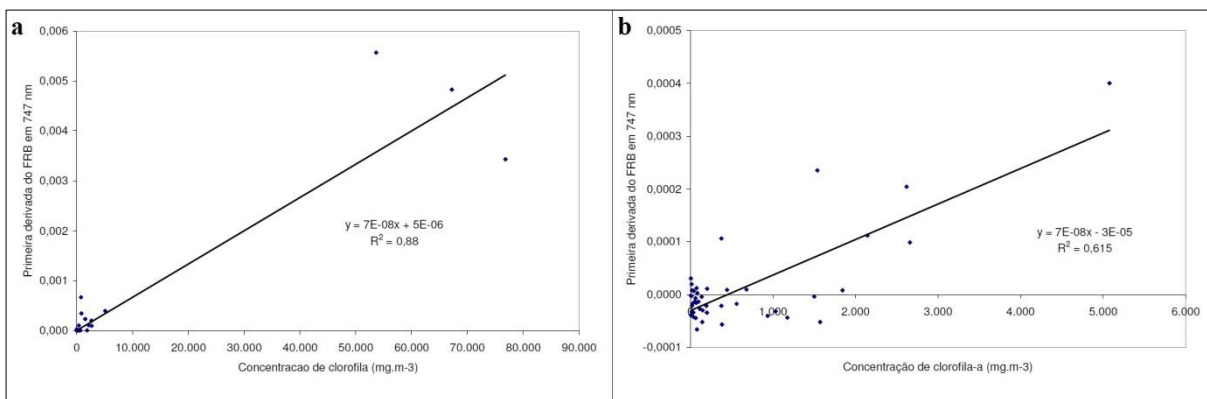


Figura 24: (a) Geração de modelo de estimativa usando a primeira derivada da reflectância em 747 nm. (b) Geração de modelo de estimativa usando a primeira derivada da reflectância em 747 nm, com a eliminação de três pontos com valores extremos de concentração de clorofila-a.

Fonte: Adaptado de Londe (2008).

Londe (2008) ressaltou, em seu trabalho, que a falta de informações sobre o comportamento espectral da água, contendo os variados componentes opticamente ativos em condições controladas de iluminação e medição é uma das limitações para a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em pesquisas sobre sistemas aquáticos, portanto, estes experimentos são necessários. Neste sentido, Lobo et al. (2009) realizaram medições radiométricas sobre cultura de *Microcystis aeruginosa* em altas concentrações de pigmentos (Figura 25a) e, além disso, aplicaram a primeira derivada da reflectância para a obtenção de algoritmos de estimativa da clorofila-a (Figura 25b). As medições foram realizadas em três datas distintas em um tanque com diâmetro de 34 cm e profundidade de 32 cm. O radiômetro foi posicionado ao nadir e a 40 cm acima da lâmina de água, sendo as medições realizadas sob iluminação solar. Os coeficientes de correlação e determinação entre a primeira derivada da reflectância e as concentrações de clorofila ressaltaram o comprimento de onda em 717 nm

com o melhor ajuste entre as variáveis (Figura 25b), sendo neste comprimento de onda ressaltado o pico de espalhamento celular, que segundo os autores, tende a migrar para comprimentos de onda maiores à medida que ocorrem aumentos das concentrações de clorofila, ou seja, o anteriormente referido deslocamento do pico de reflectância em torno de 700 nm que a seguir será discutido de forma mais detalhada.

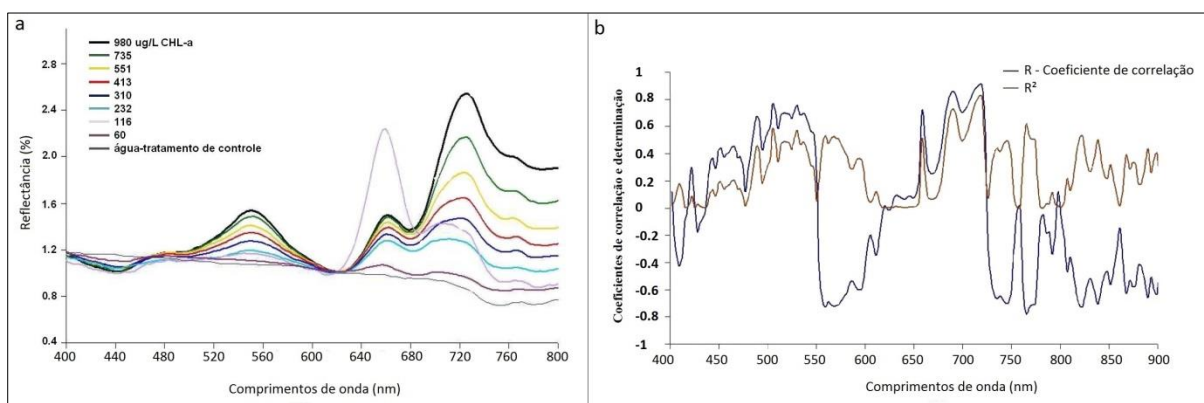


Figura 25: Comportamento espectral da água, contendo diferentes densidades de *Microcystis aeruginosa* (representadas pelas concentrações de clorofila-a). As curvas espectrais foram determinadas em tanque sob iluminação solar e niveladas em 617 nm. Coeficientes de correlação (R) e determinação (R^2) da clorofila-a em função da 1ª derivada da reflectância de 400 nm a 900 nm.

Fonte: Adaptado de Lobo et al. (2009).

Santos & Pereira Filho (2013) visaram a “extração de informações em espectros de reflectância e identificação de comprimentos de onda com melhor correlação com as variáveis limnológicas”, incluindo as concentrações de clorofila-a. Neste trabalho, os autores realizaram duas campanhas de campo (21 de outubro de 2006; 12 de março de 2010) para a coleta dos dados das variáveis limnológicas e espectrais (Espectrorradiometria de campo) no reservatório de Passo Real (Águas do Caso II) no Estado do Rio Grande do Sul. Os autores salientaram que a reflectância foi mais elevada em outubro de 2009, em todos os comprimentos de onda, devido às maiores concentrações de sólidos suspensos totais (SST) e clorofila-a, o que não ocorreu para os dados coletados em março de 2010, quando as concentrações de SST foram inferiores, assim como as concentrações de clorofila-a (Figura 26). A partir das análises de correlação e regressão simples, Santos & Pereira Filho (2013) destacaram os comprimentos de onda com melhores correlações com as concentrações de clorofila-a, conforme Figura 26.

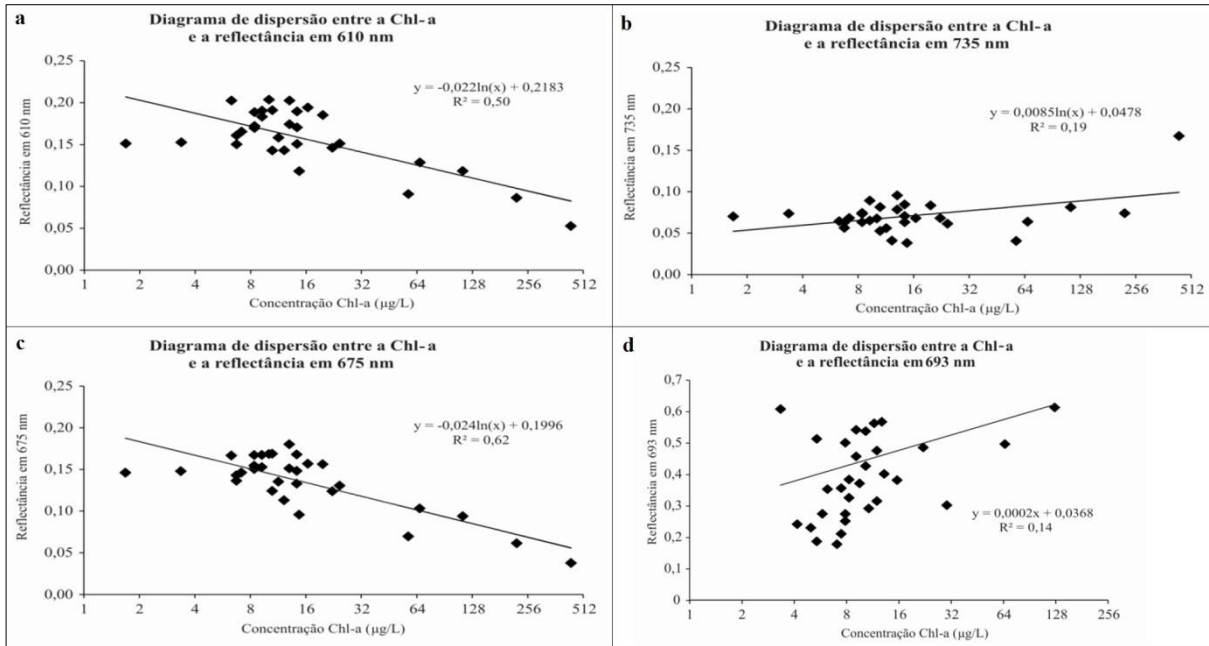


Figura 26: Diagramas de dispersão entre concentrações de clorofila-a e reflectância da água no reservatório de Passo Real no Estado do Rio Grande do Sul para duas campanhas de campo realizadas por Santos & Pereira Filho (2013), demonstrando os comprimentos de onda com as melhores correlações com as concentrações de clorofila-a: (a, b, c) referente aos dados coletados em 21 de outubro de 2009; (d) referente aos dados coletados em 12 de março de 2010.

Fonte: Adaptado de Santos & Pereira Filho (2013).

Devo destacar que nenhum dos comprimentos de onda da Figura 26 se ajustou de forma significativa, pelo menos com as concentrações de clorofila-a, ou seja, não se sabe qual é o comprimento de onda com melhor correlação com as concentrações de clorofila-a, mesmo porque somente a variável independente (clorofila-a) foi isolada, e a reflectância devida à clorofila-a não é, segundo Downing & Clark (2007), a regressão simples é aplicável somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente. Se discriminarmos os pontos constados nos planos cartesianos ou diagramas de dispersão da Figura 26, diferentes ajustes entre as variáveis podem ser verificados, além daqueles determinados pelos autores, o que indica os efeitos dos diferentes componentes opticamente ativos sobre a reflectância. Devo aqui ressaltar uma questão um tanto interessante. Em mais de cinquenta anos de desenvolvimento do sensoriamento remoto, ainda não se sabe o comprimento de onda com melhor correlação com as concentrações de clorofila? Parece que não. Então nos resultados do presente trabalho será dada uma resolução plausível a esta questão como uma descoberta, mesmo porque, segundo Santos & Pereira Filho (2013) ainda não se sabe qual o comprimento de onda com melhor correlação com as concentrações de clorofila-a fitoplanctônica dado o seu objetivo de trabalho, mas, porém, para ajudar na pesquisa dos autores, somente em Mantovani (1993) algumas informações ou até parte da resposta a questão podem ser

verificadas e, além disso, como dito anteriormente os resultados do presente trabalho colaborarão com mais informações relevantes.

Devo destacar que em suas considerações finais, Santos & Pereira Filho (2013) salientaram que o maior coeficiente de determinação verificado entre clorofila-a e a reflectância para determinada data, indicava o domínio da clorofila-a ou mesmo do fitoplâncton dentre os demais componentes opticamente ativos da água. Com base nos conhecimentos obtidos em Downing & Clark (2007), devo dizer que é muito improvável que o coeficiente de determinação indique o domínio de uma variável independente no corpo de água, mesmo porque, a magnitude do coeficiente de determinação é dependente da covariação entre as variáveis, e isso não necessariamente requer o domínio da variável independente (considerada na análise) no corpo de água, mas pode ocorrer para pequenas concentrações de clorofila-a, variando gradativamente e acompanhando as variações da reflectância, que, porém podem ser substanciais se influenciadas pelas variações em concentração de outros componentes opticamente ativos da água, como, por exemplo, os sólidos suspensos inorgânicos.

Deve ser destacado que Santos & Pereira Filho (2013) relataram em sua metodologia que “a clorofila-a foi identificada conforme descrito em Mackiney (1941)”. No entanto, Mackiney (1941) não descreveu método para determinação das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água propriamente dito e sim dentre outros aspectos estudou os efeitos de diferentes solventes sobre os coeficientes de absorção das clorofilas a e b, em extratos de folhas vegetais não aquáticas, a saber, Avena e Malva. Portanto o método para determinar a clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água relatado por Santos & Pereira Filho (2013) não está descrito em Mackiney (1941) como os autores mencionaram em seu artigo.

Retornando a análise espectral, Santos & Pereira Filho (2013) deveriam ter verificado que desenvolveram seu trabalho em águas interiores do Caso II, que segundo Palmer et al. (2015), são tipicamente caracterizadas por altas concentrações de biomassa fitoplanctônica, partículas minerais, detritos e matéria orgânica dissolvida que normalmente não covariam no tempo e espaço dos corpos de água, sendo esta uma descrição similar aquela de Fischer et al. (1986) e Sathyendranath et al. (1989). Neste sentido, Santos & Pereira Filho (2013) poderiam ter questionado como fazer para verificar o comprimento de onda com melhor correlação com a clorofila em águas carregadas por diversas partículas não clorofiladas e se isso é possível a partir de dados coletados em campo e também necessário, mesmo porque, como dito anteriormente, uma parte da resposta a esta questão está em Manatovani (1993), por outro

lado, uma resposta bem plausível é dada nos resultados do presente trabalho, a qual destoa em muito das demais. Além disso, Palmer et al. (2015) salientaram que as propriedades ópticas das águas interiores são altamente variáveis, entre e mesmo dentro dos corpos de água e que estas questões complicam o desenvolvimento de algoritmos para a estimativa de variáveis relacionadas ao fitoplâncton e tipicamente limitam sua aplicabilidade entre diferentes corpos de água. Somando-se a isso, fatores como os efeitos atmosféricos e de adjacência, são desafios adicionais para a detecção remota dos componentes das águas interiores.

Neste contexto, De Paula (2015) relacionou os dados de reflectância de uma imagem *RapidEye* aos componentes opticamente ativos da água do reservatório de Passo Real (Águas do Caso II) no Estado do Rio Grande do Sul, presumindo que os dados de reflectância da referida imagem de satélite, proporcionariam a extração de informações sobre os componentes opticamente ativos relevantes para a análise da qualidade da água. Nos seus resultados, a autora destacou as relações de causa e efeito entre as concentrações de clorofila-a e a reflectância da Banda 2 do satélite *RapidEye* em análise de regressão simples (Figura 27), com o intuito de estimar remotamente esta variável nas águas do reservatório de Passo Real. Verificam-se concentrações de clorofila-a variando de cerca de 1,0 µg/L a pouco mais de 8,0 µg/L para variações da reflectância de 6% a 10% aproximadamente, em uma relação linear positiva que resultou em um coeficiente de determinação baixo $R^2 = 0,23$, conforme Figura 27.

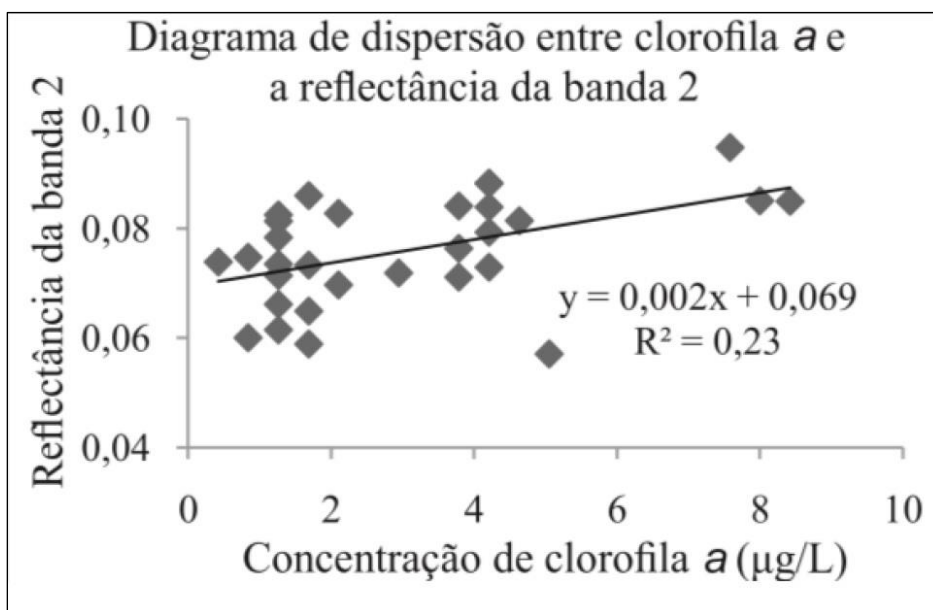


Figura 27: Diagrama de dispersão entre as concentrações de clorofila-a e reflectância da Banda 2 (Região do verde do espectro eletromagnético) de uma imagem do sensor *RapidEye* de 17 de abril de 2009 (Campanhas de campo realizadas em 17 e 18 de abril de 2009 no reservatório de Passo Real-RS).

Fonte: Adaptado de De Paula (2015).

Tem-se aqui a aplicação propriamente dita da regressão simples para o desenvolvimento de modelos empíricos de uma única banda, visando à estimativa remota das concentrações de clorofila-a a partir de dados de reflectância. Além das aplicações desta técnica anteriormente mencionadas em Santos & Pereira Filho (2013) e De Paula (2015) vários outros pesquisadores a consideraram em seus trabalhos com o mesmo propósito de estimar clorofila (Ex: HAN & JORDAN, 2005; KULKARNI, 2011; FORRER, 2012; NI et al, 2014; LAILI et al., 2015; LIN et al., 2016; WANG et al., 2017; WATANABE et al., 2017; DE CASTRO et al., 2018).

Kulkarni (2011) investigou a utilidade das imagens do sensor TM do satélite Landsat 5 nos estudos da qualidade das águas no Leste do Texas (EUA). Neste estudo, o autor desenvolveu modelos de regressão simples entre a reflectância das bandas do sensor TM e componentes ópticos das águas, incluindo a clorofila fitoplanctônica (Figura 28).

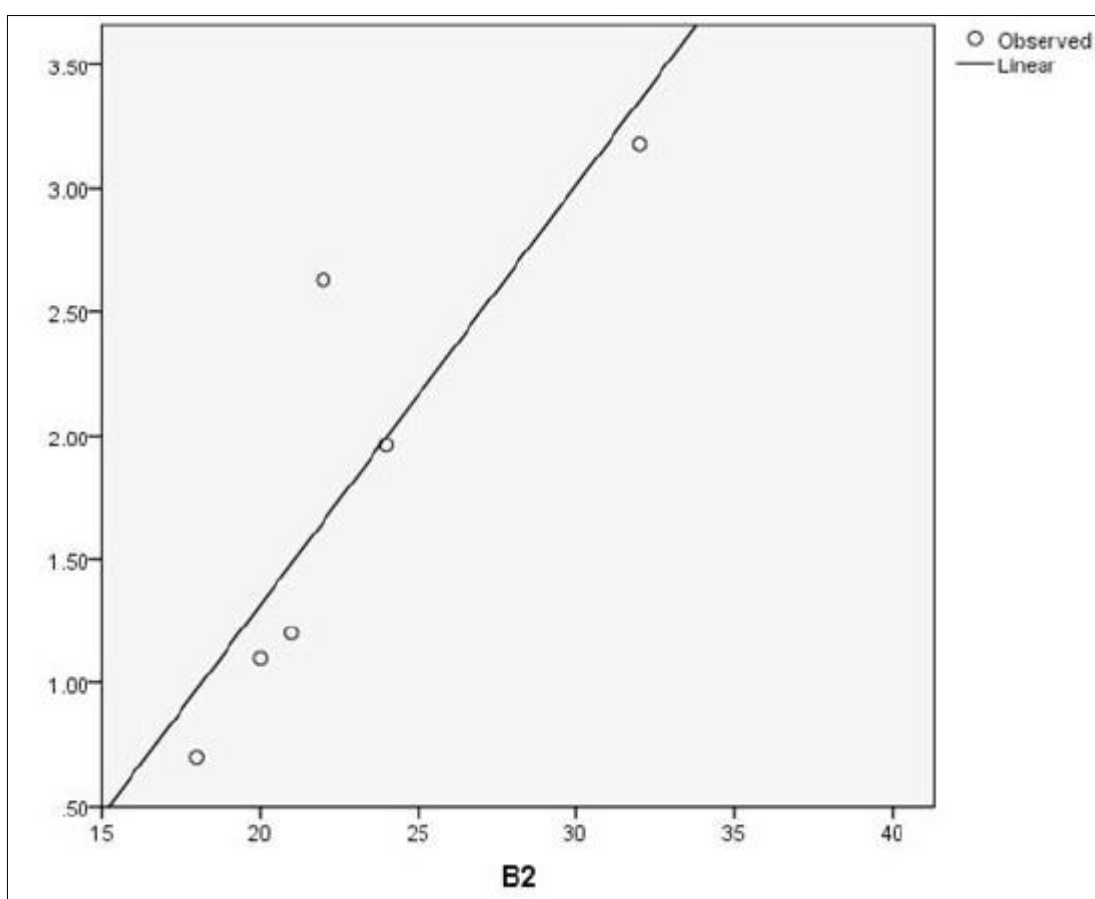


Figura 28: Modelo de regressão para valores de reflectância da banda 2 do sensor TM (Satélite Landsat 5) e clorofila fitoplanctônica.

Fonte: Adaptado de Kulkarni (2011).

Watanabe et al. (2017) salientou sobre a limitação dos modelos empíricos, considerando tanto o sensor OLI (Landsat -8) como o MSI do satélite Sentinel 2A (Figura 29). Os autores comentaram que os algoritmos subestimaram as concentrações de clorofila-a.

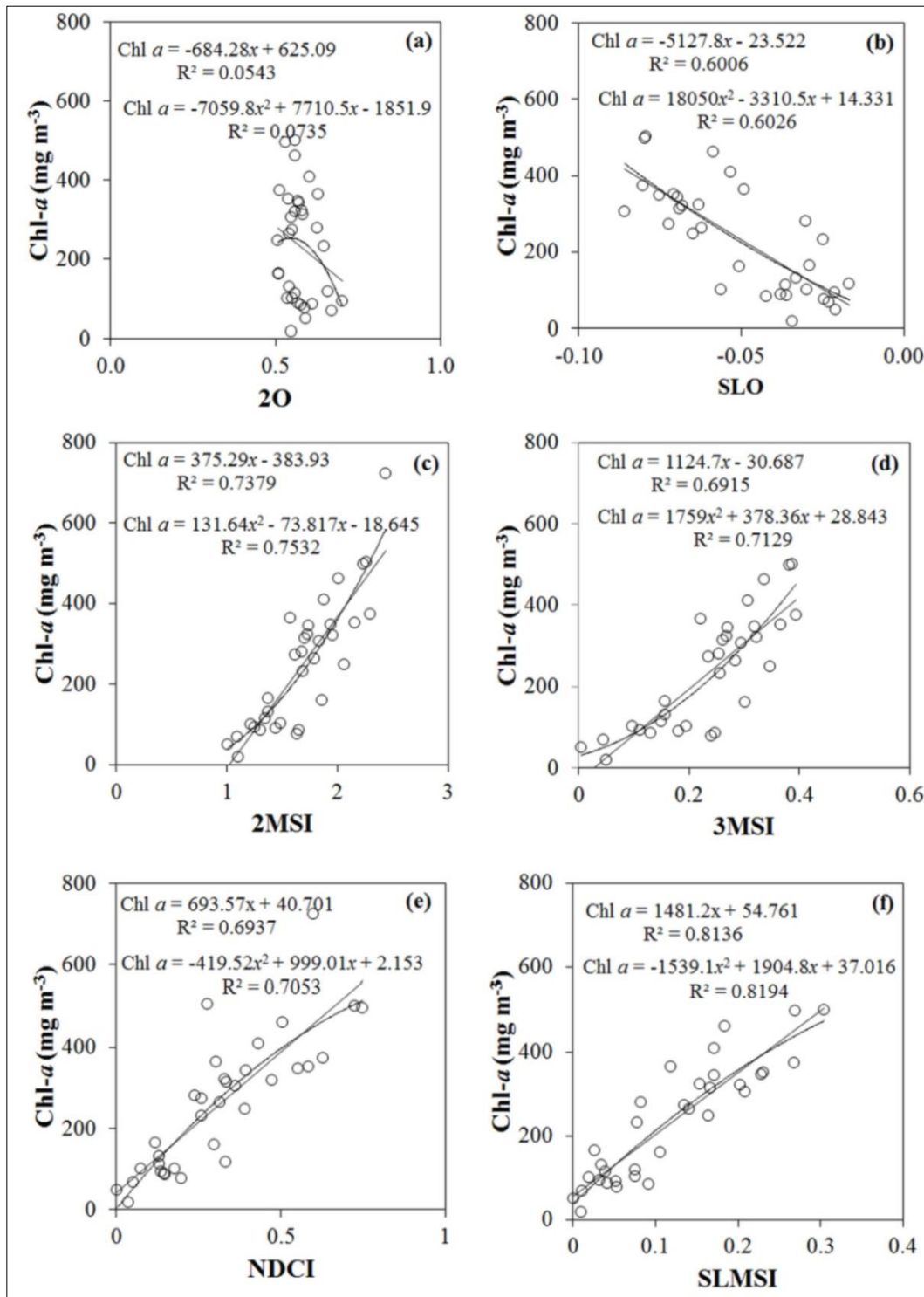


Figura 29: Modelos de recuperação de Chl-a usando bandas OLI / Landsat-8 e considerando os índices espectrais (a) 2O e (b) SLO e bandas e índices MSI / Sentinel-2A e índices (c) 2MSI, (d) 3MSI, (e) NDCI e (f) SLMSI.

Fonte: Adaptado de Watanabe et al (2017).

Muitos outros modelos de estimativa das concentrações de clorofila-a a partir de dados de sensoriamento remoto foram desenvolvidos, além daqueles anteriormente referenciados na presente revisão bibliográfica, sejam eles por regressão simples ou não, de uma única banda ou não. Somente em Johansen et al. (2018), vinte e nove modelos distintos para estimar remotamente a clorofila fitoplanctônica foram avaliados e não há informações disponíveis, sejam em bibliografias ou em *sítios da web* sobre grandes bancos de dados de concentrações de clorofila-a de corpos de água do Caso II em longas séries temporais, estimadas a partir de dados de reflectância de imagens de sensores orbitais ou mesmo de campo, cobrindo a variabilidade espacial e temporal dos corpos de água de forma confiável e que estejam sendo utilizadas pelas várias áreas das ciências em suas análises da qualidade das águas.

Considerando somente a presente revisão bibliográfica, informações a partir da década de mil novecentos e setenta apontam para a inadequabilidade dos modelos de regressão simples para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral e, no entanto, estes modelos ainda estão sendo aplicados sem questionar, por quê? Se os referidos modelos empíricos de uma única banda não são adequados para estimar remotamente a clorofila, apenas um dos autores citados nesta revisão bibliográfica, que se trata de Quibell (1992), deixou isso claro em seu texto de artigo, no entanto, somente em função de um aspecto relacionado ao próprio fitoplâncton, sem maiores questionamentos.

Zheng & Di Giacomo (2017) salientaram na introdução de seu trabalho que não há algoritmos universalmente aceitos para derivar com precisão a clorofila-a fitoplanctônica em águas costeiras oceânicas do Caso II, utilizando-se de dados de reflectância de sensoriamento remoto e de acordo com as informações constadas nos trabalhos citados nesta revisão bibliográfica, o autor do presente trabalho entende que o relato de Zheng & Di Giacomo (2017) pode ser aplicado também às águas interiores do Caso II.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Um experimento radiométrico foi realizado, constando basicamente de medições em sala escura do Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) sobre a água de um tanque, em dez tratamentos distintos referentes aos componentes opticamente ativos presentes na mesma, conforme Tabela 2. Os componentes opticamente ativos se referem aos sólidos suspensos inorgânicos (SSI) e a clorofila-a de organismos fitoplanctônicos cultivados: *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.* Azevedo e Sant'Anna 2003); *Euglenophyceae* (*Euglena sp.* Ehrenberg 1830); *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.* Meyen 1829). A partir deste ponto, o FRB será referenciado como reflectância.

Tabela 2: Tratamentos referentes aos componentes opticamente ativos presentes na água do tanque para a efetuação das medições de reflectância.

Tratamentos	Componentes opticamente ativos inseridos na água por tratamento
1	Água contendo concentrações variadas de clorofila-a, referentes aos organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>). As alíquotas de cultivo foram inseridas para promover variações semelhantes das concentrações de clorofila-a.
2	Água contendo concentrações variadas de clorofila-a, referentes aos organismos de <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena sp.</i>). As alíquotas de cultivo foram inseridas para promover variações aleatórias das concentrações de clorofila-a. Diluições da água no tanque com reposição de água limpa foram realizadas.
3	Água contendo concentrações variadas de clorofila-a, referentes aos organismos de <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus sp.</i>). As alíquotas de cultivo foram inseridas para promover variações aleatórias das concentrações de clorofila-a. Diluições da água no tanque com reposição de água limpa foram realizadas.
4	Água contendo concentrações variadas de clorofila-a, referentes a composições dos organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>) <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena sp.</i>) e <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus sp.</i>) em variações aleatórias de abundância relativa, devido aos volumes distintos das alíquotas inseridas no tanque aleatoriamente para cada organismo. Inseriram-se primeiramente alíquotas distintas para os três organismos na água formando uma composição inicial dos mesmos. Essa composição em abundância relativa foi modificada à medida que posteriormente inseriram-se volumes distintos de alíquotas dos cultivos de um o outro organismo separadamente. Diluições da água no tanque e reposição de água limpa também foram realizadas para promover maior aleatoriedade ou variação em abundância relativa entre os organismos.
5	Água contendo concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos. Inserções de volumes de alíquotas distintos foram realizadas.
6	Concentração constante de clorofila-a de organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>), em água contendo concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos. Uma alíquota de cultivo de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>) foi inserida no tanque e posteriormente apenas alíquotas distintas de sólidos inorgânicos. Sem diluições e reposição de água limpa no tanque.

(Continua)

7	Concentrações variadas de clorofila-a, referentes aos organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>), em água contendo concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos. Alíquotas distintas de cultivo de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>), foram inseridas no tanque conjuntamente com alíquotas distintas de sólidos suspensos inorgânicos. Sem diluições e reposições de água limpa.
8	Concentrações variadas de clorofila-a, referentes a composições dos organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>), <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena sp.</i>) e <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus sp.</i>) em variações aleatórias de abundância relativa, devido aos volumes distintos das alíquotas inseridas no tanque aleatoriamente para cada organismo. Inseriram-se primeiramente na água do tanque alíquotas distintas para os três organismos formando uma composição inicial dos mesmos, conjuntamente com uma alíquota de sólidos suspensos inorgânicos. A composição em abundância relativa dos organismos foi modificada à medida que posteriormente inseriram-se volumes distintos de alíquotas dos cultivos de um outro organismo separadamente, também conjuntamente a alíquotas distintas de sólidos suspensos inorgânicos. Diluições com reposição de água limpa no tanque foram realizadas para promover maior aleatoriedade das concentrações dos componentes opticamente ativos e variações em abundância relativa entre organismos.
9	Concentrações variadas de clorofila-a, referentes a composições dos organismos de <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena sp.</i>), <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus sp.</i>) em variações aleatórias de abundância relativa, devido aos volumes distintos das alíquotas inseridas no tanque aleatoriamente para cada organismo. Inseriram-se primeiramente na água do tanque alíquotas distintas para os dois organismos formando uma composição inicial dos mesmos, conjuntamente com uma alíquota de sólidos suspensos inorgânicos. A composição em abundância relativa dos organismos foi modificada à medida que posteriormente inseriram-se volumes distintos de alíquotas dos cultivos de um o outro organismo separadamente, também conjuntamente a alíquotas distintas de sólidos suspensos inorgânicos. Diluições com reposição de água limpa no tanque foram realizadas para promover maior aleatoriedade das concentrações dos componentes opticamente ativos e variações em abundância relativa entre organismos.
10	Concentrações variadas de clorofila-a, referentes a composições dos organismos de <i>Cyanophyceae</i> (<i>Sphaerocavum sp.</i>), <i>Euglenophyceae</i> (<i>Euglena sp.</i>) e <i>Chlorophyceae</i> (<i>Scenedesmus sp.</i>) em variações aleatórias de abundância relativa, devido aos volumes distintos das alíquotas inseridas no tanque aleatoriamente para cada organismo. Inseriram-se primeiramente na água do tanque alíquotas distintas para os três organismos, formando uma composição inicial dos mesmos, conjuntamente com uma alíquota de sólidos suspensos inorgânicos. A composição em abundância relativa dos organismos foi modificada à medida que posteriormente inseriram-se volumes distintos de alíquotas dos cultivos de um outro organismo separadamente, também conjuntamente a alíquotas distintas de sólidos suspensos inorgânicos. Diluições com reposição de água limpa no tanque foram realizadas para promover maior aleatoriedade das concentrações dos componentes opticamente ativos.

3.1 Cultivos de fitoplâncton

Os inóculos iniciais de *Euglena sp.* (*Euglenophyceae*) e *Sphaerocavun sp.* (*Cyanophyceae*) foram obtidos de amostras coletadas no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) (29° 43' 16,88"S – 53° 42' 55,71"W). A *Scenedesmus sp.* (*Chlorophyceae*) foi isolada a partir de uma cepa de *Limnotrix* (*Cyanophyceae*), na qual

estava contida, sendo esta cepa proveniente da Universidade Federal de Rio Grande (FURG) (Sem informações sobre o local de coleta).

Os isolamentos dos organismos foram realizados por micropipetagem e diluições sucessivas (ANDERSEN & KAWACHI, 2005) e com a utilização de vidro de relógio e placa de Elisa, em microscópio invertido (*MOTIC – 400X*) no laboratório de Ficologia do departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Os gêneros *Sphaerocavun sp.* e *Scenedesmus* foram cultivados em meio ASM1 (GORHAM et al., 1964; ZAGATTO & ARAGÃO, 1992; JACINAVICIUS et al. 2015) (Tabela 3).

Tabela 3: Soluções do meio de cultura ASM1. (Modificado de GORHAN et al., 1964 e ZAGGATTO & ARAGÃO, 1992 citado em JACINAVICIUS et al., 2015). Preparação de 1 litro de meio ASM1 para uso (JACINAVICIUS et al., 2015).

Soluções	Nutrientes	Quantidade (g)	Observações
Sol. A	NaNO ₃	8,5000	
	MgSO ₄ + 7H ₂ O	2,4500	
	MgCl ₂ + 6H ₂ O	2,0500	
	CaCl ₂ + 2H ₂ O	1,4500	
Sol. B	KH ₂ PO ₄	8,7000	Misturar cada solução em 1 litro de água destilada.
	Na ₂ HPO ₄ + 12H ₂ O	17,8000	
Sol. C	H ₃ BO ₃	28,4000	Armazenar todas as soluções na geladeira
	MnCl ₂ + 4H ₂ O	13,9000	
	FeCl ₂ + 6H ₂ O	10,8000	
	ZnCl ₂	3,3500	
	CoCl ₂ + 6H ₂ O	0,1900	
	CuCl ₂ + 2H ₂ O	0,0140	
Sol. D	EDTA triplex	18,6000	
Preparação de 1 litro de meio ASM1 para uso			
Solução	Quantidade (ml)		
Sol. A	20,00		
Sol. B	2,00		
Sol. C	0,10		
Sol. D	0,40		

O gênero *Euglena sp.* foi cultivado em meio *NPK 15-11-11* com adição de vitaminas e solução de metais, sendo este do meio de cultura BG11 (RIPPKA, 1979 citado em JACINAVICIUS et al., 2015), conforme Tabela 4. Porém, inicialmente, foi utilizada outra formulação NPK, como será destacado posteriormente neste trabalho, além de outra solução contendo metais.

A identificação dos organismos (*Classes e Gêneros*) foi realizada principalmente a partir das chaves de identificação para classes e gêneros fitoplanctônicos de Bicudo & Menezes (2006) e dos trabalhos de Azevedo & Sant'Anna (2003) e Sant'Anna et al. (2006),

sendo este último para o gênero *Sphaerocavun sp.*. O microscópio binocular (*LEICA - 1000X*), de posse do laboratório de Ficologia do Departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) foi utilizado para a identificação.

Tabela 4: Soluções do meio de cultura *Euglena sp.* e preparação de 1 litro de meio *Euglena sp.*.

Soluções	Concentrações e Observações		
Sol. NPK 15-11-11	40g por 500 ml de água destilada. Macerar NPK antes de diluir. Armazenar na geladeira.		
Sol. Vitaminas	Cloridrato de tiamina, cloridrato de piridoxina e cianocobalamina. Podem ser obtidas comercialmente no medicamento <i>Citoneurin 5000</i> . Utilizar duas ampolas do medicamento, uma de cada tipo por litro de água destilada. Armazenar na geladeira.		
Solução de metais do meio de cultura BG11			
	Soluções Estoque	Quantidade (g)	Observações
Sol. Metais	H ₃ BO ₃	2,8600	Diluir os compostos em 1 litro de água deionizada ou destilada e armazenar as soluções em frascos plásticos na geladeira.
	MnCl ₂ + 4H ₂ O	1,8100	
	ZnSO ₄ + 7H ₂ O	0,0000	
	NaMoO ₄	0,3900	
	CuSO ₄ + 5H ₂ O	0,0790	
	Co(NO ₃) + 6H ₂ O	0,0494	
Preparação de 1 litro de meio <i>Euglena sp.</i> para uso.			
Soluções	Quantidade (ml)		
Sol. NPK 15-11-11	6,00		
Sol. Vitaminas	1,00		
Sol. Metais	0,10		

As condições de cultivo para cada organismo cultivado estão descritas na Tabela 5. Outras informações sobre os cultivos dos organismos fitoplancônicos estão expostas no item posterior aos procedimentos metodológicos, quando é realizada a caracterização dos organismos, conjuntamente a algumas observações sobre o desenvolvimento dos mesmos em cultivo, dos procedimentos efetuados.

Tabela 5: Condições de cultivo.

Variável	<i>Sphaerocavun sp.</i>	<i>Euglena sp.</i>	<i>Scenedesmus sp.</i>
Temperatura	Verão: ±23°C a ±32°C.	Verão: ±23°C a ±32°C.	Verão: ±23°C a ±32°C.
“Sem equipamento para o controle”	Inverno: ±24°C a ±30°C mediante aquecimento com lâmpada halógena de 100 W.	Inverno: ±18°C a ±27°C mediante aquecimento com lâmpada halógena de 40 W.	Inverno: ±18°C a ±27°C mediante aquecimento com lâmpada halógena de 40 W.
Iluminação	Lâmpada 15 W	Lâmpada 15 W	Lâmpada 15 W
Aeração	Não turbulenta	Turbulenta	Turbulenta
Fotoperíodo	24 horas	24 horas	24 horas
pH	9,0	3,0 à 4,0	7,4

3.2 Determinação das concentrações de clorofila-a

Foi aplicado o método espectrofotométrico com a utilização de etanol 95% como solvente e *HCL2M* para a acidificação, conforme treinamento realizado pelo autor do presente trabalho no Instituto Ambiental do Paraná (IAP) no ano de 2016, com referências em Nush (1980). O treinamento foi custeado por Itaipu Binacional. O cálculo para a obtenção das concentrações de clorofila-a é realizado conforme a Equação 1. Todas as concentrações de clorofila-a foram determinadas em tréplica a partir de amostras de 150 ml, portanto, as médias foram consideradas. Concentrações anômalas foram excluídas das médias.

$$Chl_a \left(\frac{mg}{m^3} \right) = \frac{27,9 * [(665 - 750) - (665_a - 750_a)] * v}{V * l} \quad (Eq. 1)$$

Onde:

Chl_a = Clorofila-a

665 nm = Leitura de absorbância antes da acidificação;

750 nm = Leitura de absorbância antes da acidificação;

665_a nm = Leitura de absorbância após a acidificação;

750_a nm = Leitura de absorbância após a acidificação;

v = volume de reagente utilizado para a extração da clorofila-a em ml;

V = volume da amostra em litros (L);

l = abertura ótica da cubeta em cm;

27,9 = coeficiente específico de absorção da clorofila-a em solução aquosa de etanol 80%.

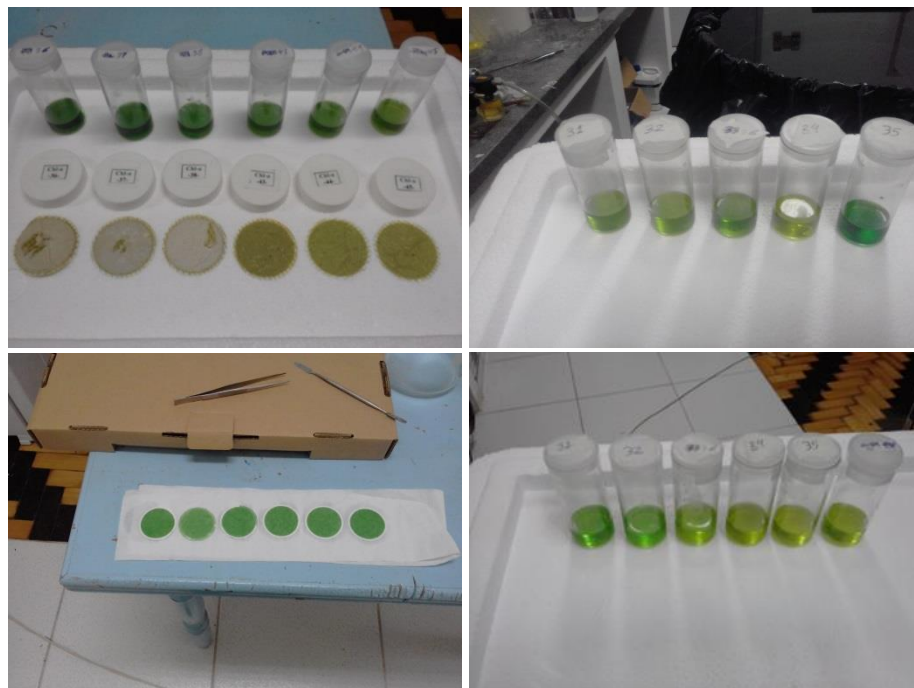


Figura 30: Amostras de clorofila-a extraídas para a leitura em espectrofotômetro (Fracos) e aspectos dos filtros (Fibra de vidro com poro de 0,7 μ m) após a filtragem de amostras requerida no método espectrofotométrico.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

3.3 Sólidos suspensos inorgânicos

Os sólidos suspensos inorgânicos são provenientes de amostras de solo coletadas em meio urbano do município de Santa Maria-RS, o qual é classificado como Alissolo Crômico Argilúvico/Típico com textura arenoso-argilosa, conforme a Agência de Desenvolvimento de Santa Maria (2019) em Santa Maria-RS. Destas amostras, objetivou-se apenas aquelas partículas inorgânicas que permanecem em suspensão por pelo menos 4 horas em uma coluna de 5 cm de água destilada a temperatura ambiente. A obtenção de partículas inorgânicas em suspensão na água por pelo menos 4 horas foi necessária para evitar a rápida sedimentação das mesmas no decorrer das medições radiométricas. A profundidade da coluna de água para serem retiradas as partículas inorgânicas em suspensão foi baseada na *Lei de Stokes* (DONAGEMA et al., 2011). Considerando águas paradas, partículas muito pequenas (2 μm) sedimentam em uma coluna de água de 5 cm, num período 3 horas e 40 minutos, a uma temperatura de 23°C (Donagema et al., 2011). Neste sentido, em um período de 4 horas as partículas menores que 2 μm estão presentes em uma coluna de água parada de 5 cm, em temperaturas variando em torno de 23°C no período de inverno.

Para isso, várias amostras de solo (5kg) foram secas em estufa a temperatura de 60°C, maceradas e peneiradas (Peneira de menor poro 0,62 mm) para a retirada do material grosseiro e posteriormente inseridas em baldes de 30 cm de altura com capacidade de 10 litros de água, para a sedimentação do material. Após 4 horas de sedimentação foram retiradas do balde por pipetagem, colunas de 5 cm de água, as quais foram inseridas em outro recipiente maior (60 litros) para sedimentação e evaporação por 7 dias, quando o líquido sobrenadante foi retirado e obtido o material sedimentado. Este material foi seco em estufa a uma temperatura de 100°C e posteriormente macerado. O macerado foi calcinado a 550°C por 60 minutos para a queima das partículas orgânicas e a obtenção das partículas inorgânicas utilizadas nas medições radiométricas. Estes procedimentos foram realizados até a obtenção de 30 gramas de material (Figura 31), os quais foram diluídos posteriormente em 3,0 litros de água destilada e armazenados na geladeira até as medições radiométricas, mantendo-se sempre o mesmo volume de água destilada.

As concentrações de sólidos suspensos inorgânicos inseridas no tanque de radiometria foram determinadas com base em APHA (1998) com filtração (A vácuo) e secagem em estufa. Filtros de Fibra de vidro (Milipore) com 0,7 μm de poro foram utilizadas, sendo as mesmas previamente secadas em estufa a 100°C e pesados para posterior filtração das amostras de 150 ml, em tréplica. Posteriormente, os filtros foram calcinados a 550 °C por uma

hora e pesados novamente. Utilizou-se a Equação 2 para o cálculo das concentrações deste componente óptico nas amostras de água coletadas no decorrer das medições radiométricas.

$$SSI \frac{mg}{L} = \frac{(Pf - Pi)}{v} * 1000 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde: SSI = Sólidos suspensos inorgânicos; Pf = Peso final após a calcinação; Pi = Peso da membrana secas antes da filtração das amostras; v = Volume filtrado em litros.



Figura 31: Material inorgânico retirado das amostras de solo e diluídos em água destilada.

3.4 Medições radiométricas

As medidas de reflectância foram realizadas com o espectrorradiômetro *ASD FieldSpec HandHeld 2* (VNIR) de posse do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com faixa de operação de 325 à 1075 nm, resolução espectral de 3 nm e campo de visada 25°. A faixa que compreende as regiões do visível e infravermelho próximo entre 400 a 900 nm foi considerada nas análises, devido à existência de significativos ruídos em comprimentos de onda menores ou maiores que a referida faixa espectral. A placa de referência utilizada foi a *Spectralon* (Placa Lambertiana Branca).

As medições da reflectância em nível laboratorial foram requeridas, visando inibir variações da reflectância indesejadas, seja devido às variações no ângulo de iluminação, reflexão especular em função de movimentação na água (ocasionais rajadas de vento ocasionando ondulações da água), ou ainda, devido a qualquer radiação de trajetória provinda

de alvos vizinhos. Para isso, uma sala escura foi planejada e construída pelo autor do presente trabalho, para a realização das medições radiométricas. A estrutura foi construída em madeira para ser desmontável, sendo a mesma pintada com tinta preta fosca, coberta por um tecido preto (TNT) e este envolto por duas camadas de uma lona plástica também de cor preta, sendo o objetivo, impedir a entrada de iluminação externa. A estrutura tem as seguintes dimensões: 2,5 metros de altura; 3,0 metros de comprimento e; 2,5 metros de largura (Figura 32).



Figura 32: Sala escura em construção. A estrutura em madeira foi coberta por uma camada de tecido em cor preta (TNT) e duas camadas de lona plástica preta.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Anteriormente às medições radiométricas propriamente ditas, para a obtenção dos dados analisados no presente trabalho, testes radiométricos foram realizados. As medições radiométricas teste foram realizadas sobre água limpa para a determinação da geometria de aquisição e iluminação (Figura 34), sobre o tanque de radiometria seco para verificar o efeito do material do tanque sobre a reflectância e, sobre água contendo fitoplâncton (Os três organismos isolados e em composição), sólidos suspensos inorgânicos (isolado) e sobre a mistura destes componentes ópticos. Estes últimos serviram para verificar os efeitos dos volumes máximos por alíquotas dos componentes ópticos a serem inseridos no tanque de radiometria no decorrer das medições, o que será detalhado posteriormente.

Dois tanques, fabricados em polietileno foram testados para as medições radiométricas, sendo um com capacidade de 1000 litros e outro com capacidade de 12 litros. Apenas o tanque de 1000 litros foi pintado internamente com tinta preta fosca. O tanque de 12 litros manteve-se sem pintura interna, sendo este de fabricação em cor preta. Os testes foram

realizados primeiramente com os tanques contendo água limpa e posteriormente acrescentaram-se sólidos inorgânicos e fitoplâncton.

No tanque de 1000 litros, os ruídos nos espectros de reflectância sobre a água limpa foram significativos em toda a faixa de 400 nm a 900 nm, independentemente da geometria de iluminação ou aquisição testada, inclusive com a inserção de alíquotas de até 20 litros de cultivo de fitoplâncton. Pelo menos 40 litros de cultivo foram necessários para se obter o primeiro espectro de reflectância em tanque de 1000 litros, condizente com aqueles verificados na literatura como sendo influenciados por fitoplâncton.

Por outro lado, o tanque de 12 litros, apesar de seu menor tamanho proporcionou espectros de reflectância sobre a água limpa condizentes com os verificados na literatura (Ex: MANTOVANI, 1993; HAN, 1997) e sendo assim, as geometrias de aquisição dos dados de reflectância e de iluminação (Figura 34) foram determinadas a partir dos espectros de água neste tanque. Além disso, o tanque seco (12 litros) proporcionou um espectro de reflectância homogêneo, ou seja, sem grandes variações da reflectância em toda a faixa entre 400 nm e 900 nm (Figura 33), portanto, a influência do fundo e paredes do tanque, apesar de seu reduzido tamanho, podem ser consideradas semelhantes em todos os comprimentos de onda da referida faixa espectral. Neste tanque (12 litros), inserções de alíquotas de 100 ml dos cultivos na água limpa geraram espectros característicos de fitoplâncton. Neste sentido, optou-se pelo tanque de 12 litros para a realização das medições radiométricas. O tanque de 12 litros pode ser verificado na Figura 35.

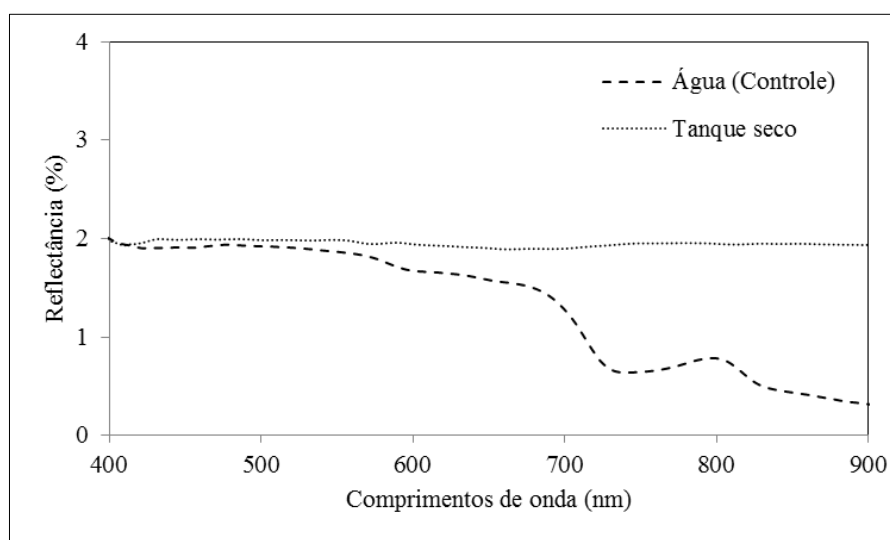


Figura 33: Espectros de reflectância coletados sobre o tanque de radiometria seco e contendo água limpa. O espectro somente sobre água limpa se refere ao espectro médio obtido a partir dos espectros coletados sobre a água limpa antes de cada medição radiométrica realizada neste trabalho e por isso é considerado de controle.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Para manter estável a geometria de aquisição no decorrer das medições, o radiômetro tem como acessório um tripé que permitiu a estabilidade do equipamento. Porém um tripé como suporte para a fonte de luz foi adquirido (Figura 35). A fonte de luz para as medições radiométricas foi uma lâmpada halógena com refletor e potência de 1000 watts (MANTOVANI, 1993), sendo o feixe de luz não colimado. A lâmpada foi mantida ligada no decorrer das medições para todos os tratamentos.

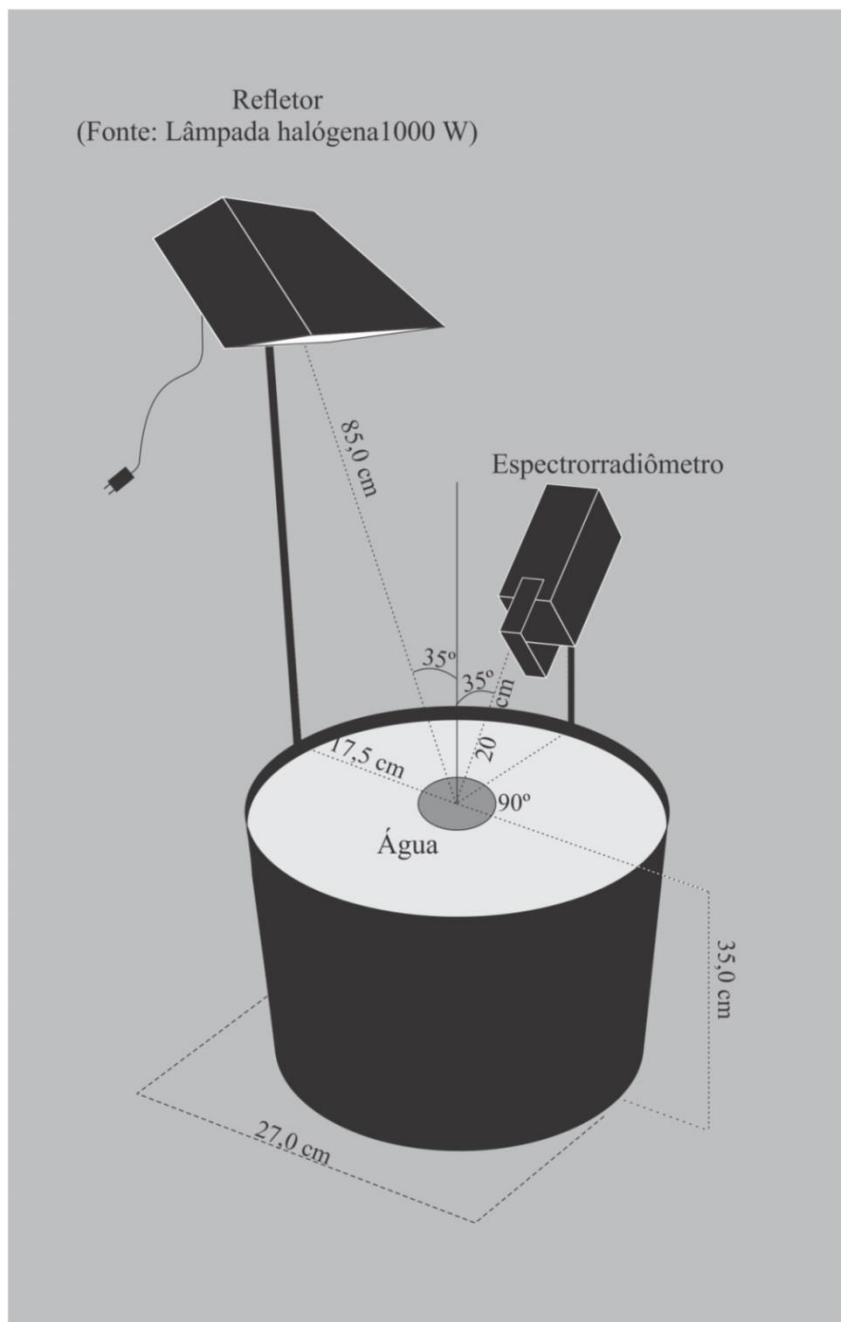


Figura 34: Geometria de aquisição e iluminação para a realização das medições radiométricas.
Fonte: Joceli Augusto Gross.

Na Figura 35 pode ser observada uma geometria de aquisição testada e, além disso, o aspecto interno da sala escura construída para a realização das medições radiométricas, o tanque de radiometria, os tripés utilizados como suporte ao espectrorradiômetro e a fonte de luz. Acoplado ao radiômetro (Preso na parte superior) está um clinômetro para verificar o ângulo de visada do sensor em relação à lâmina de água e o ângulo da fonte de luz. Sobre o refletor da fonte de luz está um nível de construção utilizado para manter o refletor nivelado em relação à lâmina de água.



Figura 35: Aspecto interno da sala escura no decorrer das medições radiométricas. Em específico as medições realizadas para testar geometrias de aquisição e iluminação. Na figura da esquerda o tanque contém apenas amostras saturadas de *Sphaerocavum sp.*; Na figura da direita foram inseridas alíquotas dos cultivos de *Euglena sp.* e *Scenedesmus sp.*, conjuntamente a *Sphaerocavum sp.*. A mudança na cor da água é evidente, no entanto, o ângulo de visualização também é um aspecto influente para esta mudança. Todos os materiais constados nas fotografias, exceto a mesa onde se encontra o tanque, o espectrorradiômetro e seu tripé foram adquiridos com recursos próprios.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Nas paredes da sala escura (Figura 35), observa-se o tecido de TNT, sobre o qual duas camadas de lona plástica de cor preta ajudam a impedir a entrada de luz externa no ambiente de medição. Em detalhe, o espectrorradiômetro exibe o mostrador (*display*) que permite a visualização dos espectros sem o auxílio de computador no decorrer das medições. Além das paredes e do teto da sala escura, o piso e a mesa sobre a qual se encontra o taque de radiometria também foram revestidos com lona plástica de cor preta e tecido de TNT preto, respectivamente, para inibir reflexão da luz e radiações de trajetória.

3.5 Volumes das alíquotas (Clorofila-a e sólidos suspensos inorgânicos)

Os volumes máximos das alíquotas dos componentes a serem inseridos no tanque para as medições radiométricas foram estabelecidos mediante determinação das concentrações de clorofila-a dos cultivos e de sólidos suspensos inorgânicos diluídos em volume conhecido de água destilada.

Objetivou-se concentrações de clorofila-a até um máximo de 100 mg/m³, tanto para os organismos isolados como em composição. Este limite máximo de clorofila-a foi estabelecido com base nos trabalhos de Mantovani (1993), que realizou medições em laboratório com concentrações de clorofila-a até cerca de 50 mg/m³ e, principalmente no trabalho de Arraut et al. (2005), que realizou medições em campo, em que as concentrações de clorofila-a verificadas no ambiente do Lago Grande de Curuai no Estado do Pará, Brasil, chegaram a cerca de 90 mg/m³ em meio a concentrações de sólidos suspensos totais. Para isso, as concentrações de clorofila-a de volumes de 20 ml dos referidos cultivos foram determinadas anteriormente a cada medição radiométrica para a verificação do volume máximo de cultivo a ser inserido por vez no tanque de radiometria. Considerando o efeito cumulativo das amostras no tanque em caso de não diluições, os volumes máximos de cultivo determinados não ultrapassaram os 20 mg/m³ de clorofila-a, quando os mesmos eram diluídos no tanque de 12 litros. Para todos os tratamentos, os máximos volumes inseridos no tanque foram 500 ml para *Sphaerocavum sp.*, 150 ml para *Euglena sp.* e 200 ml para *Scenedesmus sp.*.

Para os sólidos suspensos inorgânicos a concentração máxima almejada foi de 100 mg/L, com base em trabalhos de Manatovani (1993), Han et al. (1994), Lodhi et al. (1997) e Han (1997). Almejaram-se concentrações de sólidos que não afetassem de forma proeminente as feições espectrais ocasionadas pelos organismos fitoplanctônicos. Concentrações de sólidos inorgânicos, superiores a 40 mg/L foram utilizadas somente nos tratamentos 5 e 6 (Tabela 2). Nos demais tratamentos em que os sólidos inorgânicos estavam presentes nas águas, as

concentrações foram todas inferiores a 30 mg/L. Considerando as amostras de sólidos inorgânicos (30 g) (Figura 31) diluídas em um volume constante de água destilada (3,0 L), anteriormente mencionado, mediu-se para um volume de 1,0 ml deste composto a concentração de sólidos em tréplica, o que fez 10,3 miligramas em média. Isso diluído em 12 litros de água do tanque de radiometria fez 0,85 mg/L. Neste sentido, um volume máximo do composto, água destilada mais sólidos inorgânicos, a ser inserido por vez no tanque de radiometria, considerando o efeito cumulativo em caso de não diluições da água do tanque foi determinado em 50 ml (42,9 mg/L de sólidos diluído no tanque).

Destaca-se que um máximo de concentração de clorofila-a e de sólidos suspensos inorgânicos foi determinado, porém no decorrer das medições radiométricas os volumes das alíquotas de cultivo e de sólidos inorgânicos inseridos no tanque de radiometria foram aleatórios para a maioria dos casos (Ver Tabela 2), mas obedecendo aos limites máximos de volume das alíquotas e promovendo diluições da água do tanque devido ao efeito cumulativo.

3.6 Sequência de uma medição radiométrica para um tratamento

A medição inicia-se com a otimização e calibração do espectrorradiômetro (Placa lambertiana Spectralon). Posteriormente um espectro da água limpa é medido e avaliado. Insere-se uma alíquota do componente óptico de interesse na água do tanque, movimenta-se a água para promover homogeneização da amostra inserida. Aguarda-se 30 segundos para que a água do tanque estabilize o movimento, enquanto isso o espectrorradiômetro é otimizado e calibrado novamente. A medição radiométrica é realizada. Ao fim da medição radiométrica uma amostra (1litro) é coletada no tanque e armazenada na geladeira para a determinação das concentrações dos componentes ópticos. Insere-se outra alíquota, mais água limpa até completar os 12 litros do tanque. Aguarda-se 30 segundos para que a água do tanque estabilize o movimento, enquanto isso o espectrorradiômetro é otimizado e calibrado novamente. Outra medição radiométrica é realizada.

Quinze tomadas de espectros de reflectância são realizadas para um tratamento (Ver Tabela 2). Dez espectros são tomados para cada amostra inserida no tanque. Ao final das medições, os dez espectros referentes a cada condição da água em função dos componentes ópticos inseridos na mesma são avaliados individualmente para verificar anomalias. Depois da avaliação, a média é obtida para os espectros, portanto, quinze espectros médios são obtidos. Essa sequência foi realizada para todos os tratamentos.

3.7 Análise estatística

Uma das questões deste trabalho se refere à adequabilidade de modelos empíricos de uma única banda espectral, desenvolvidos por regressão simples para estimar remotamente clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água. Neste sentido, a principal técnica estatística utilizada trata-se da própria regressão simples. Além desta, a análise de correlação e a Raiz do erro quadrático médio também foram aplicadas sobre os dados.

Como referenciado anteriormente, a regressão simples é aplicável somente quando uma variável independente afeta a variável dependente (DOWNING & CLARK, 2007). Aqui, se considera este pré-requisito como o principal para a sua aplicação, o qual, de certa forma corrobora, as hipóteses do presente trabalho, no entanto, cabem comprovações.

O modelo de regressão é expresso pela Equação 3 que descreve um reta, no entanto, outros ajustes podem ser observados, como exponenciais, logaritmos, potências ou polinômios.

$$y = \alpha * x + \beta + \varepsilon_i \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: y = Variável dependente; α = Coeficiente de regressão (coeficiente angular); X = Variável independente; β = Coeficiente linear; ε_i = Erro aleatório.

O coeficiente de determinação (R^2), expressa o quanto a variação dos dados da variável independente, explica a variação dos dados da variável dependente. Esse coeficiente varia de 0 à 1. O coeficiente angular nos mostra a variação nos dados da variável dependente em função da variável independente, o que explica as inclinações das curvas de regressão. O coeficiente linear marca o ponto em que a curva de regressão corta o eixo y e o erro aleatório mostra de maneira geral a variação de y que não é explicada pela variável independente X , sendo os erros considerados independentes (LOPES et al., 2007).

A regressão simples foi utilizada para a geração de modelos de estimativa e validação dos mesmos. Neste contexto, entende-se que quando apenas uma variável independente afeta a variável dependente, não há muitos espaços para erros. Quando estes ocorrem, é um indicativo de outros fatores ou variáveis interferindo nas relações de causa e efeito entre as variáveis de interesse, tratando-se a partir de então de efeitos multivariados sobre a variável dependente.

Aqui se apresenta a análise de regressão simples em diagramas de dispersão, que se trata de planos cartesianos com suas coordenadas (x , y), permitindo a leitura das relações de causa e efeito entre duas variáveis graficamente. Quaisquer dois pontos no diagrama ou plano

cartesiano, podem ser analisados separadamente para verificar suas relações de causa e efeito e seus ajustes, em comparação com o ajuste verificado para todo o banco de dados coletado.

Conjuntamente ao coeficiente de determinação (R^2), a Raiz do erro quadrático médio (RMSE) pode ser utilizada para verificar, principalmente, o quanto uma variável estimada está próxima da mesma variável observada, ou seja, para verificar a acurácia das estimativas (HALLAK & FILHO, 2011). O RMSE é calculado pela seguinte Equação 4, considerando-se aqui concentrações de clorofila-a observadas e estimadas, sobre as quais o RMSE foi aplicado. Valores de RMSE próximos a zero indicam que as variáveis se aproximam, ou seja, são semelhantes em valores.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Chla\ estimada - Chla\ observada)^2}{N} \right] \quad Eq. 4$$

Onde: Chla = clorofila; N = Número de elementos amostrais.

Antes da análise de regressão simples e a geração de modelos para a estimativa da clorofila-a é aconselhado verificar se ocorre correlação entre as variáveis consideradas na análise (ANDRIOTTI, 2003). Este aspecto pode ser verificado com a análise de correlação de *Pearson* que permite a obtenção do coeficiente de correlação (r), variando de +1 a -1 e indicando a existência de correlação ou não entre as variáveis de interesse. Correlogramas podem ser gerados a partir dos dados resultantes da aplicação desta técnica de análise, e permitem uma análise prévia das relações entre as variáveis, sendo os correlogramas a forma de apresentação da análise de correlação neste trabalho.

Em suma, o que se pretende com estas técnicas estatísticas é verificar como a reflectância varia em função das concentrações de clorofila-a para os distintos organismos fitoplanctônicos isolados e em composição, e principalmente verificar se os modelos de uma única banda são capazes de estimar a clorofila-a adequadamente, considerando os diferentes tratamentos expostos no Quadro 1, ou seja, distintas condições das águas relacionadas aos componentes opticamente ativos fitoplâncton e sólidos suspensos inorgânicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão foram divididos em duas partes. A primeira trata dos cultivos dos organismos fitoplanctônicos, em que se descrevem as características dos organismos e as observações sobre os procedimentos de cultivo dos mesmos, relacionando-as em alguns casos aos trabalhos de sensoriamento remoto. A segunda parte se refere à avaliação espectral propriamente dita, em que a reflectância da água, influenciada pelos componentes ópticos é analisada para a estimativa das concentrações de clorofila-a a partir do desenvolvimento de modelos empíricos por regressão simples e com a utilização da reflectância de uma única banda espectral.

4.1 Caracterizações dos organismos e observações nos cultivos de fitoplâncton

No presente trabalho, os referidos organismos fitoplanctônicos foram analisados espectralmente, no entanto, cabe ressaltar brevemente algumas características dos mesmos, verificadas em bibliografias, a partir das observações em microscópio e nos cultivos propriamente ditos. Aspectos dos cultivos ressaltados nos procedimentos metodológicos são retomados neste item do presente trabalho. Além disso, algumas características e observações dos organismos em cultivo são aqui oportunamente relacionadas aos conhecimentos em sensoriamento remoto das águas expostas na revisão bibliográfica, sendo um exemplo disso, os distintos tamanhos e formas dos organismos (Figura 36). Essas particularidades podem proporcionar variações nas grandezas radiométricas, independentemente das concentrações de clorofila-a, como demonstrado por Mueller (1974) em sua simulação de células fitoplanctônicas, além de determinar os espectros de absorção da radiação pelo fitoplâncton *in vivo*, o que foi ressaltado por Kirk (1976; 1983).

Os organismos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.* Azevedo e Sant'Anna 2003), foram coletados em outubro de 2017, em um reservatório localizado no campus da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) (29° 43' 16,88"S – 53° 42' 55,71"W). A coleta foi realizada com rede de plâncton (Poro 25 µm), quando os organismos estavam em floração. Foram coletadas duas amostras de 5 litros (Ver Figura 40c).

De acordo com Azevedo & Sant'Anna (2003) e Bicudo & Meneses (2006) o gênero *Sphaerocavum sp.* (*Cyanophyceae*) é conhecido somente no Brasil, apresentando três espécies de ambientes aquáticos continentais. Esses organismos tem forma de vida colonial com envoltório mucilaginoso. Suas células são esféricas e obrigatoriamente com aerótopos,

estando distribuídas na periferia da colônia. As colônias são ocas, esféricas quando jovens e irregulares quando adultas. *Sphaerocavum* pode ser facilmente confundido com o gênero *Microcystis* (*Cyanophyceae*).

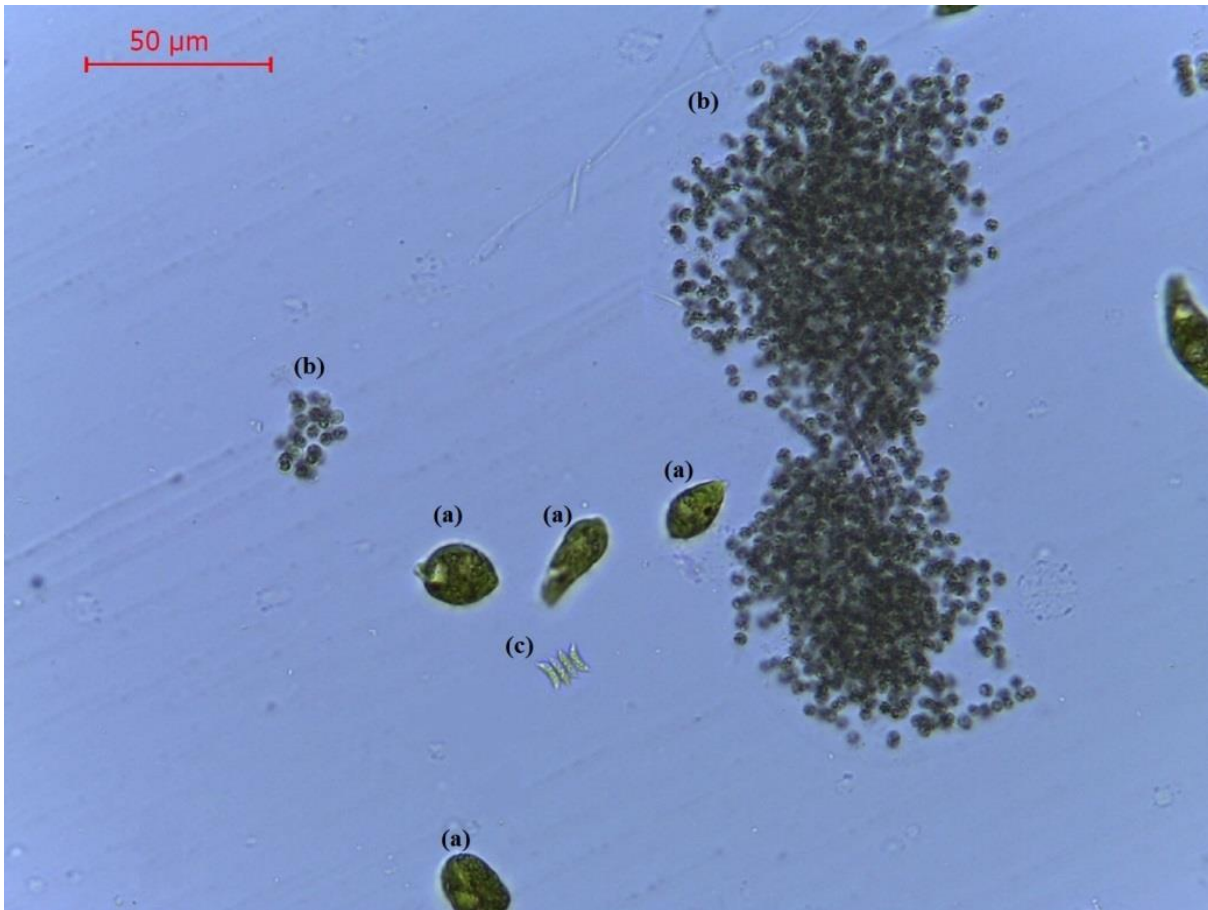


Figura 36: Fotomicrografia (Aumento 400X) dos organismos fitoplanctônicos cultivados para a realização do presente trabalho: (a) *Euglena. Sp.* (*Euglenophyceae*); (b) *Sphaerocavum sp.* (*Cyanophyceae*); (c) *Scenedesmus sp.* (*Chlorophyceae*). A microfotografia foi capturada em microscópio binocular *LEICA*, no laboratório de Ficologia do departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Nos cultivos de *Sphaerocavum sp.*, observaram-se pequenas colônias irregulares ou mesmo pequenos aglomerados de células com envoltório mucilaginoso (Figura 37a), colônias maiores e esféricas (Figura 37b) e grandes colônias com formas irregulares, conforme as verificadas na Figura 36, com células esféricas de 3 a 4 μm de diâmetro. Em meio de cultura ASM1 (GORHAM et al., 1964; ZAGATTO & ARAGÃO, 1992; JACINAVICIUS et al. 2015), *Sphaerocavum sp.*, desenvolveu-se sempre nas formas coloniais, como descrito anteriormente e constadas nas Figuras 36 e 37.

Como fonte de luz, lâmpadas com potências de 40, 25 e 15 watts foram testadas, considerando fotoperíodo de 24 horas (BINA, 2008; OHSE et al., 2009; WOJCIECHOWSKI, 2013; HAKALIN, 2014; HERNÁNDEZ-PÉREZ & LABBÉ, 2014). No entanto, como não se

observou diferenças no desenvolvimento dos cultivos em função da potência das lâmpadas, optou-se pelas lâmpadas de 15 watts, mesmo porque os cultivos foram alocados em estantes fechadas e as lâmpadas com maior potência promovem temperaturas excessivas no período de verão. Porém, para manter a temperatura acima de 20°C ($\pm 22^\circ\text{C}$ segundo Azevedo & Sant'Anna, 2003) no período de inverno, devido à falta de equipamento para o controle da mesma, uma lâmpada alógena de 100 watts foi necessária para o aquecimento em dias mais frios.

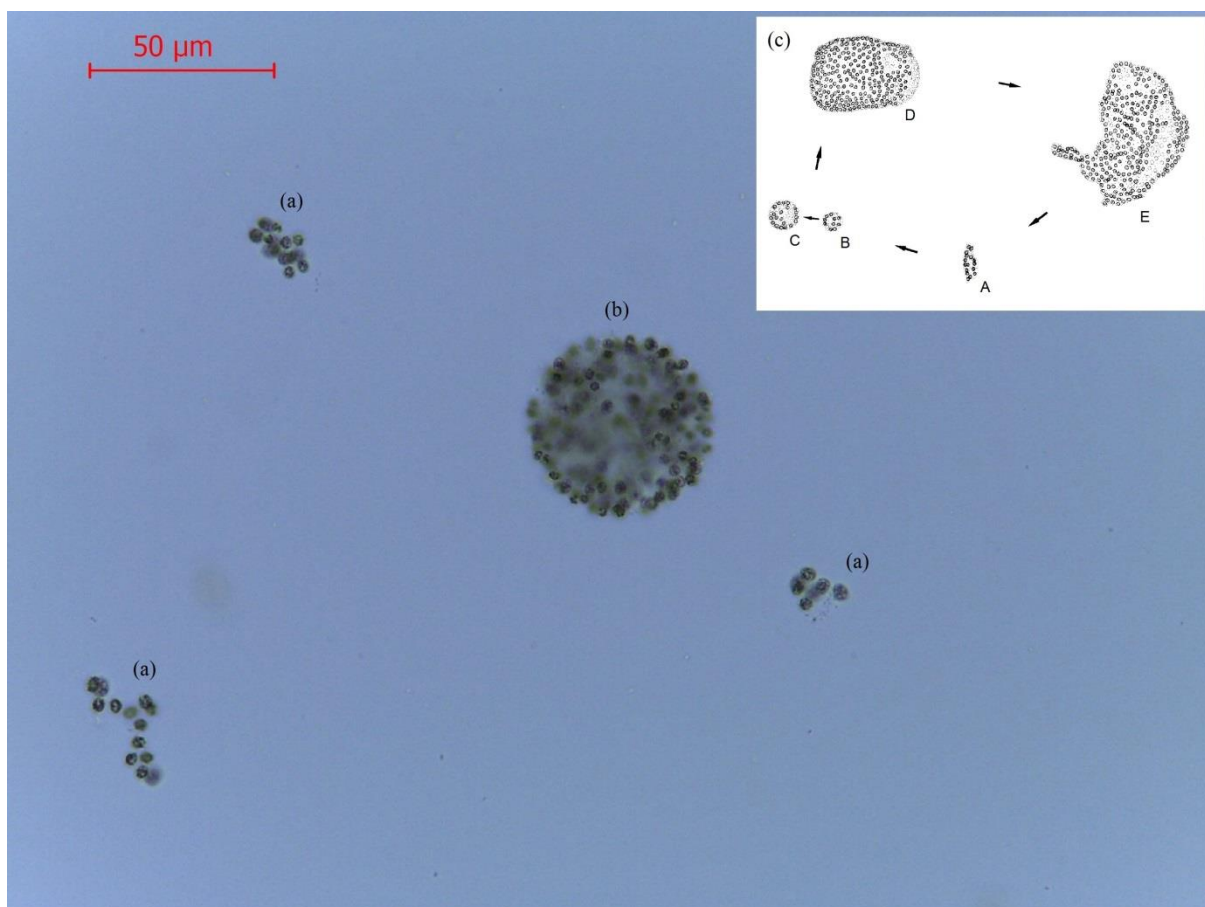


Figura 37: Fotomicrografia de *Sphaerocavum sp.* (Cyanophyceae) (Aumento 400X): (a) Pequenas colônias irregulares ou aglomerados de células com envoltório mucilaginoso; (b) Colônia esférica com envoltório mucilaginoso. Estas observações estão em acordo com Azevedo & Sant'Anna (2003), segundo as autoras as pequenas colônias com forma irregular e a colônia esférica são distintos estágios de desenvolvimento destes organismos, conforme Figura 37c em que: (A) Grupo de células ou células isoladas liberadas de uma antiga colônia; (B-C) Colônias ocas esféricas com arranjo de células semelhantes a redes; Colônia oca maior com furos na camada superficial; (E) Grupo de liberação de colônias ou células isoladas. A microfotografia foi capturada em microscópio binocular LEICA, no laboratório de Ficologia do departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Fonte fotomicrografia: Joceli Augusto Gross. Fonte Figura 37c: Adaptado de Azevedo & Sant'Anna (2003).

Neste sentido, em estante fechada (Figura 38), sem equipamento para o controle, a temperatura variou em determinados períodos do inverno de $\pm 16^\circ\text{C}$ a $\pm 25^\circ\text{C}$, porém com a adição da lâmpada halógena (100 watts), obteve-se uma variação de $\pm 24^\circ\text{C}$ a $\pm 30^\circ\text{C}$. No

verão, quando a lâmpada halógena (100 watts) não foi utilizada, as temperaturas variaram de $\pm 23^{\circ}\text{C}$ a $\pm 32^{\circ}\text{C}$.

Em temperaturas de $\pm 32^{\circ}\text{C}$, os organismos de *Sphaerocavum sp.*, em alguns casos, migraram até a superfície da água em aglomerados de colônias visíveis, conforme as florações que ocorrem em ambientes naturais (LONDE, 2008), com posterior mortandade dos organismos. Em temperaturas de $\pm 16^{\circ}\text{C}$, observou-se queda no desenvolvimento, e da mesma maneira que em temperaturas mais altas ocorre a mortandade de organismos. Entendeu-se que em temperaturas entre 26°C e 29°C ocorre melhor desenvolvimento dos cultivos, sem a formação de aglomerados de colônias que migram até a superfície, ficando o cultivo homogêneo.

Não há a necessidade de aeração turbulenta no cultivo de *Sphaerocavum sp.*, a qual pode ser produzida apenas para ocasionar leve movimentação do meio. Porém, sem a aeração ou movimentação do meio, ocorre uma camada adensada de colônias em superfície, na qual ocorre mortandade de organismos.



Figura 38: Estantes para alocação das culturas de fitoplâncton. (a-b) Estante para descarte cedida pelo departamento de Microbiologia e Parasitologia da Universidade Federal de Santa Maria e reformada pelo autor do presente trabalho, com recursos próprios. (c-d) Estante construída pelo autor do presente trabalho (recursos próprios).

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Uma queda brusca do *pH* desencadeia grandes aglomerados de colônias de *Sphaerocavum sp.*, e outros menores, como exemplificado na Figura 39, o que ocorreu em menos de 0,5 minutos, logo após a inserção de nutrientes diretamente no meio, ainda em testes para cultivos destes organismos, quando o NPK 04-08-14 foi testado. A inserção dos nutrientes sem ajuste do *pH*, proporcionou uma mudança desta variável de 8,0 (*pH* da amostra coletada) para 1,8 (após inserção dos nutrientes). Entendeu-se que a formação rápida dos aglomerados de colônias após a mudança brusca de *pH* se trata de um mecanismo de defesa destes organismos frente a adversidade enfrentada.

Posteriormente ao que ocorreu com uma das duas amostras, após a inserção de nutrientes com pH muito baixo (Figura 39), efetuou-se o controle de pH mantendo o mesmo em 8,0, conforme verificado na outra amostra coletada em campo (Figura 39c2) o que, no entanto, apenas manteve parte dos organismos de *Sphaerocavum sp.* vivos, porém sem desenvolvimento aparente do cultivo. Isso foi realizado por cerca de 30 dias ou até a aquisição de todos os reagentes ou nutrientes do meio de cultura ASM1. Ao final deste período a amostra estava com coloração verde/amarelada.

Inicialmente, o pH do meio ASM1 foi ajustado para 7,4, conforme descrito em Jacinavicius et al. (2015) para as soluções deste meio de cultura. No entanto, em pH 7,4 não ocorreu desenvolvimento de organismos, o que exigiu experimentação, em que, 200 ml de meio de cultura (ASM1) em 11 *Erlenmeyers* (250 ml) foram ajustados para pH variando de 6,0 a 11,0.

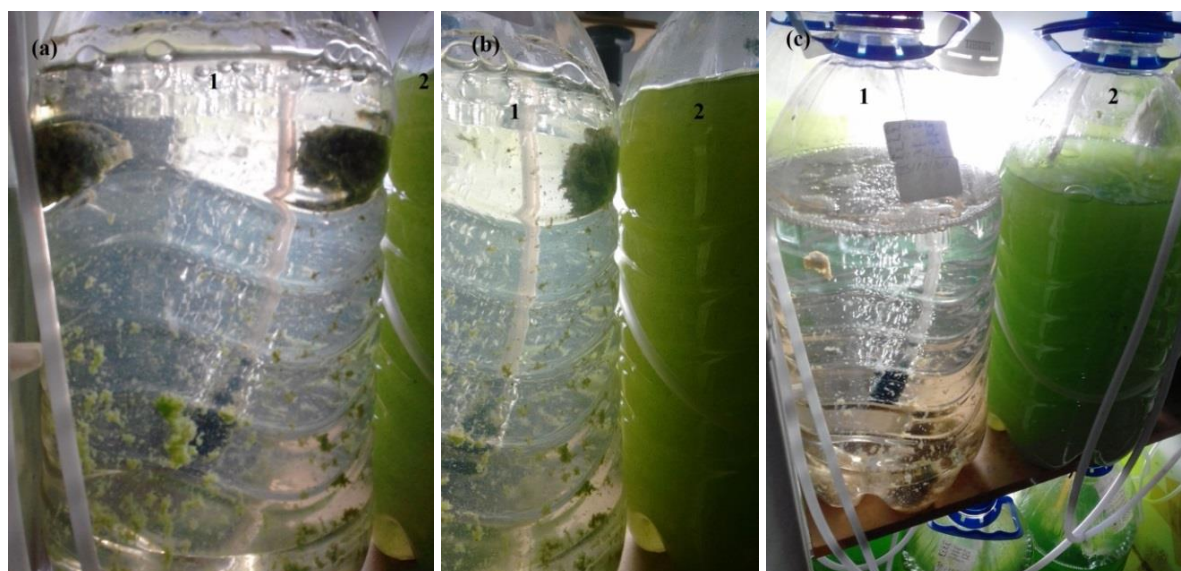


Figura 39: Cultivo de *Sphaerocavum sp.* após mudança brusca de pH . (a1, b1) Aglomerados de colônias de *Sphaerocavum sp.*, logo após mudança brusca de pH do cultivo (De 8,0 para 1,8). (c1) Um dia após a mudança brusca de pH . (a2, b2, c2) Um cultivo de *Sphaerocavum sp.*, proveniente da mesma amostra cultivada em (1). As amostras para cultivo foram coletadas em um reservatório do Campus da Universidade Federal de Santa Maria, quando os organismos estavam em floração, em outubro de 2017.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Na experimentação, em pH ajustado para 9,0, os organismos se desenvolveram (Figura 40a), permitindo a repicagem aos 14 dias de desenvolvimento com maior densidade de organismos. Para os demais ajustes de pH , o desenvolvimento cessou em menos de uma semana ou simplesmente não ocorreu, este último principalmente para pH abaixo de 7,0. Entendeu-se que este procedimento por mais de 30 dias, desde a coleta das amostras até a experimentação para verificar o pH adequado, somente permitiu desenvolver os organismos

de *Sphaerocavum sp.*, devido a alta densidade dos mesmos nas amostras (coletada em floração).



Figura 40: Experimento para ajuste de Ph, amostra de campo e materiais utilizados nos cultivos de fitoplâncton. (a) Cultivos de *Cyanophyceae sp.* em experimentação para ajuste de *pH* do meio de cultura. (b) Preparação das soluções do meio ASM1, no caso a solução de metais. (c) Amostra coletada em floração fitoplanctônica em um reservatório do campus da Universidade Federal de Santa Maria, a partir da qual *Sphaerocavum sp.* foi isolado. (d) Reagentes e/ou nutrientes adquiridos (Recursos próprios) para a preparação do meio de cultura ASM1, além de outros meios testados (Ex: Meio CHU) e ao fundo pode ser verificado o tanque de 1000 litros adquirido para a realização de radiometria.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

À medida que os organismos de *Sphaerocavum sp.* desenvolvem-se o *pH* tende a diminuir, necessitando correção do mesmo, sendo registradas quedas de *pH* de 9,0 a 7,8 em um período de três dias. No entanto, quando o cultivo cessa o desenvolvimento (Estabilização do crescimento), tomando uma coloração amarelada (Figura 42) o *pH* tende a aumentar acima de 9,0, indicando senescência da cultura e mortandade de organismos.

Em caixas plásticas com capacidade 17 e 68 litros (Figuras 38, 41, 43, 49) o desenvolvimento de *Sphaerocavum sp.* foi mais rápido, do que aqueles realizados em frascos tubulares (Garrafas pet – água mineral) com capacidade de 5 litros. Porém, em ambos os casos, os cultivos desenvolveram-se e permitiram a realização das medições radiométricas. Os cultivos em caixas maiores foram efetuados para a realização de testes radiométricos em tanque com capacidade de 1000 litros, o que exigiu maior quantidade de biomassa.

Após a repicagem, é necessária a limpeza dos frascos de cultivo, devido à formação de biofilme em suas paredes, o que dificulta o acesso dos organismos a iluminação. No entanto, nos frascos de 5 litros (garrafas pet), a limpeza é dificultada e devem ser substituídos por novos. Porém a limpeza das caixas de cultivo (Figuras 41) é facilitada e foi realizada somente com água destilada e esponja imersa em álcool 70%, sem adição de detergentes ou outros produtos.



Figura 41: Manutenção dos cultivos. (a) Cultivo de *Sphaerocavum sp.* com mais de 20 dias de desenvolvimento, em que podem ser observados os aglomerados de colônias em superfície e a coloração verde/amarelada do cultivo. (b) O mesmo cultivo em (a) após limpeza da caixa e reposição de nutrientes (ASM1). (c) Balde utilizado para reservar o cultivo e efetuar a limpeza das caixas (Em específico o cultivo contido no balde se refere aquele em (d)), sendo que para cada gênero de organismo um balde distinto foi utilizado, para evitar contaminação. (d-e) Cultivos de *Sphaerocavum sp.* com 10 dias de desenvolvimento.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Cabe aqui ressaltar sobre a referida coloração amarelada dos cultivos (Figura 42), que segundo Zhang et al. (2009) se deve aos produtos da degradação dos organismos, sendo uma importante fonte de matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) em corpos de água eutrófico. O produto da degradação do fitoplâncton e, mais especificamente, a matéria orgânica dissolvida colorida, tem sua importância devido à influência da mesma sobre os dados de reflectância da água, principalmente em comprimentos de onda da região do azul do espectro eletromagnético. Carder et al. (1991) ressaltaram que o produto da degradação do fitoplâncton inclui feopigmentos, detritos e bactérias, perfazendo espectros de absorção da radiação semelhantes aos do CDOM (Matéria orgânica dissolvida colorida) em uma faixa de 410 nm a 640 nm. A matéria orgânica dissolvida prejudica o desenvolvimento de algoritmos para a estimativa da clorofila-a, como salientaram Fischer et al. (1986), Sathyendranath et al. (1989) e Palmer et al. (2015). Neste sentido, nas medições radiométricas do presente trabalho, utilizaram-se cultivos em pleno desenvolvimento no máximo 8 dias após a repicagem, visando inibir a presença dos produtos da degradação dos organismos.

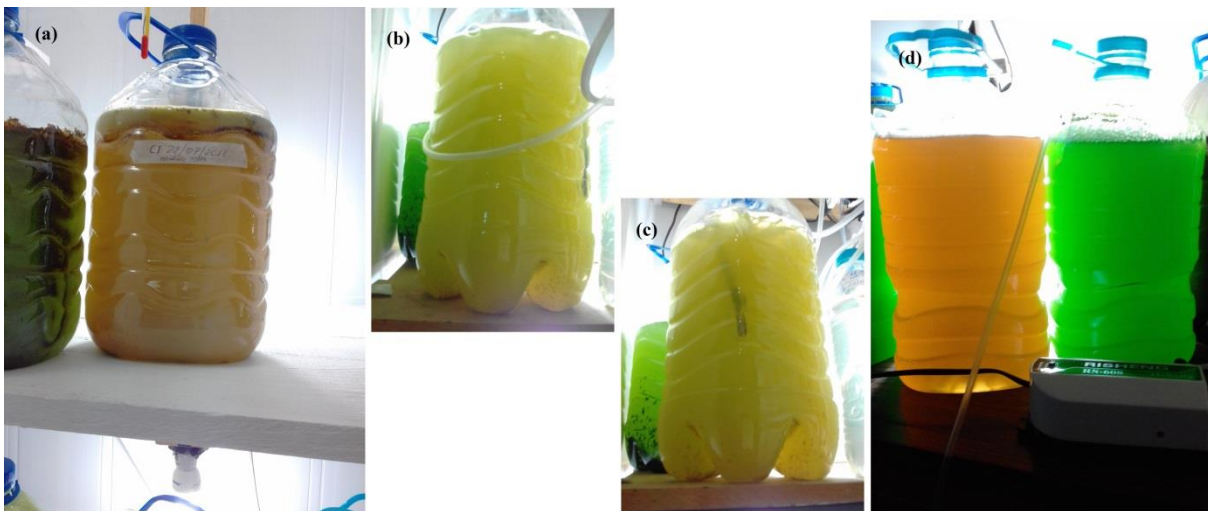


Figura 42: Cultivos em degradação. (a) *Sphaerocavum sp.*. (b-c) *Euglena sp.*. (d) *Scenedesmus sp.*. Note na Figura 42d a direita, outro cultivo de *Scenedesmus sp.* em desenvolvimento. Na Figura 42a, cultivo a esquerda, também de *Sphaerocavum sp.*, pode ser observado o biofilme nas paredes do recipiente.
Fonte: Joceli Augusto Gross.

Segundo Chisti (2007) e Cecy et al. (2007), em se tratando de taxas de crescimento, o fitoplâncton pode dobrar a biomassa em vinte e quatro horas ou em períodos menores na fase exponencial de crescimento, sendo os organismos de *Sphaerocavum sp.*, um exemplo disso, pois se desenvolveram muito rapidamente, com significativas variações das concentrações de clorofila-a em um período relativamente curto (Figura 43), sendo necessárias a reposição de nutrientes a cada sete dias e repicagens a cada quatorze dias. Após o período de quatorze dias,

sem a repicagem, mortalidade de organismos é verificada, tomando o cultivo uma coloração amarelada (Figura 42), além de aumentos do *pH* acima de 9,0 como salientado anteriormente.

O rápido desenvolvimento do fitoplâncton, exemplificado na Figura 43 pelos organismos de *Sphaerocavum sp.*, demonstra a importância da sincronia entre passagem do sensor orbital e a campanha de campo, ressaltada por Whitlock et al. (1982) com vistas no desenvolvimento de modelos para a estimativa de componentes ópticos das águas. Aqui essa particularidade é ressaltada principalmente em relação aos modelos de estimativa remota das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica. Em condições adequadas do meio, o fitoplâncton pode promover a duplicação das concentrações de clorofila-a em menos de vinte e quatro horas (Figura 43) e, além disso, mudanças qualitativas na comunidade fitoplanctônica podem ocorrer em poucos dias (REYNOLDS et al., 1984; CALIJURI et al., 2006).

A não sincronia entre a coleta de dados em campo e a passagem do satélite foi a causa de problemas em experimentos realizados Johnson (1977) (duas horas de diferença) e Rogers (1975) (oito horas de diferença). Em alguns casos foi assumido que os constituintes das águas contidos em um pixel de determinada imagem de satélite, permanecem constantes em períodos entre 2 a 8 horas e, no entanto, erros foram verificados.

Neste sentido, considerando que organismos fitoplanctônicos podem migrar na coluna de água em função de mudanças na intensidade da radiação solar, grandes diferenças, em relação aos períodos entre a coleta das amostras em campo e a passagem do satélite devem ser rigorosamente consideradas. Além disso, a movimentação das águas em função da ação dos ventos podem modificar significativamente as condições das mesmas acerca do fitoplâncton ou até mesmo de outros componentes opticamente ativos em períodos relativamente curtos (WHITLOCK et al., 1982).

Quando a sincronia entre passagem do satélite e campanha de campo é ignorada, o sensor orbital registra um cenário totalmente distinto daquele observado em campo, no que se refere aos componentes opticamente ativos das águas, em especial as concentrações de clorofila-a (Figura 43) e aos organismos que compõe a comunidade fitoplanctônica. Trabalhos de pesquisa desenvolveram relações empíricas entre a reflectância obtida por sensores remotos orbitais e as concentrações de clorofila-a, além de outros componentes ópticos, com diferenças de 10 e mais de 30 dias entre a campanha de campo e a passagem do satélite sobre a área de estudo (Ex: SANTOS, 2016; FERREIRA DOS SANTOS, 2018), ou seja, cenários significativamente distintos (Ex: Figura 43), daqueles verificados em campo podem ter sido registrados pelos sensores orbitais e muito provavelmente as referidas relações empíricas entre a reflectância e os componentes ópticos, não expressaram a realidade de campo.

Se o objetivo for desenvolver um algoritmo para a estimativa das concentrações de clorofila-a ou qualquer outro componente opticamente ativo das águas, a minimização dos erros é de fundamental importância. Ignorar a sincronia entre passagem do sensor e a coleta de dados em campo, é ignorar uma das poucas variáveis que podem ser controladas em campo, e que pode introduzir erros em modelos de estimativa e maximizar as incertezas sobre os dados estimados, quando os algoritmos são aplicados sem as referências de campo, isso para não descaracterizar o que é fundamental em termos de definição de sensoriamento remoto, que é o ato de obter dados e informações sobre um alvo sem entrar em contato com o mesmo, apesar de Jensen (2009) ter essa definição como globalizante.

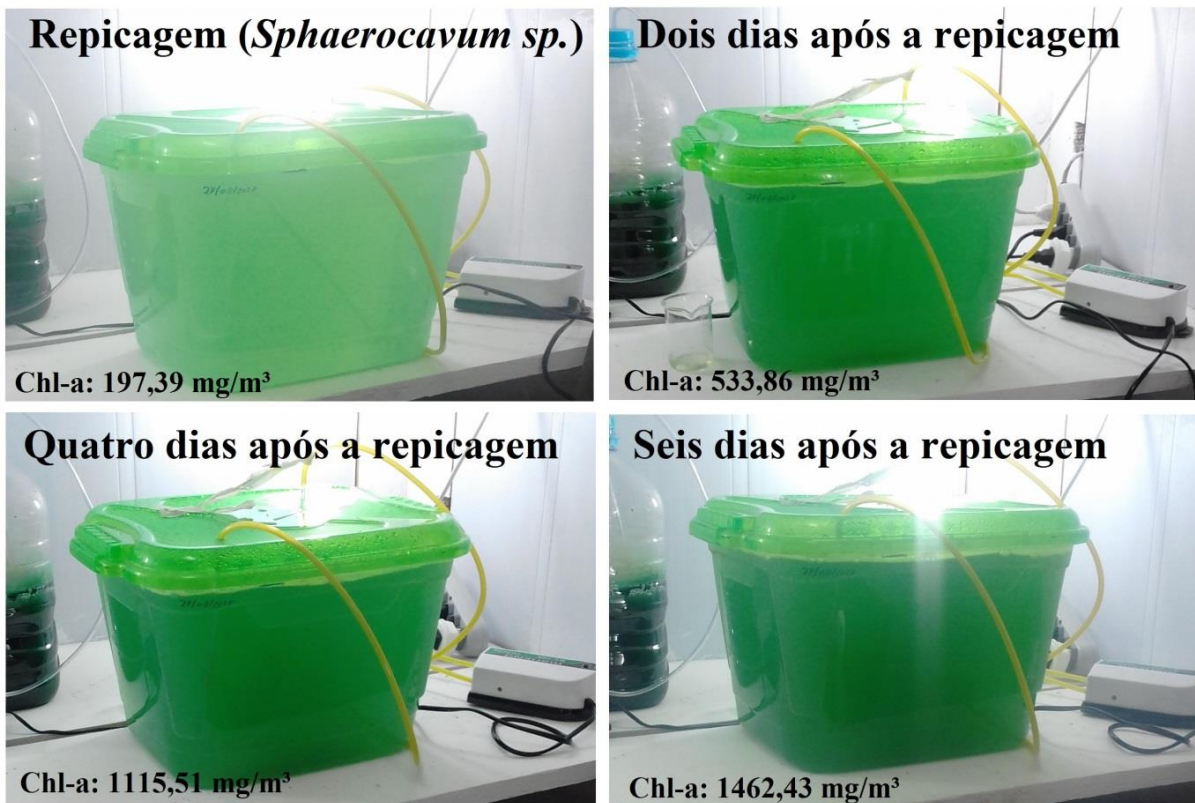


Figura 43: Desenvolvimento de *Sphaerocavum sp.* em meio ASM1. Ao lado das caixas de cultivo, um dos compressores adquiridos com recursos próprios para a aeração dos cultivos, que ao todo somam 10.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

A partir deste ponto, salienta-se sobre os organismos de *Euglenophyceae* (*Euglena sp.* Ehrenberg 1830) em cultivo. O gênero *Euglena sp.* foi o primeiro a manter-se em cultivo para o desenvolvimento do presente trabalho, sendo estabelecido no final de julho do ano de 2016 (Figura 44b), a partir de amostra coletada (2 litros) em um reservatório do campus da Universidade Federal de Santa Maria (29° 43' 16,88"S – 53° 42' 55,71"W) com a utilização de rede de plâncton (Poro 25 µm). Primeiramente, as amostras foram enriquecidas com NPK

04-08-14. No entanto, com essa fórmula de nutrientes os organismos desenvolvem-se lentamente, sendo necessários trinta dias para atingir biomassa considerável (Figura 44d), com reposições de nutrientes a cada sete dias.

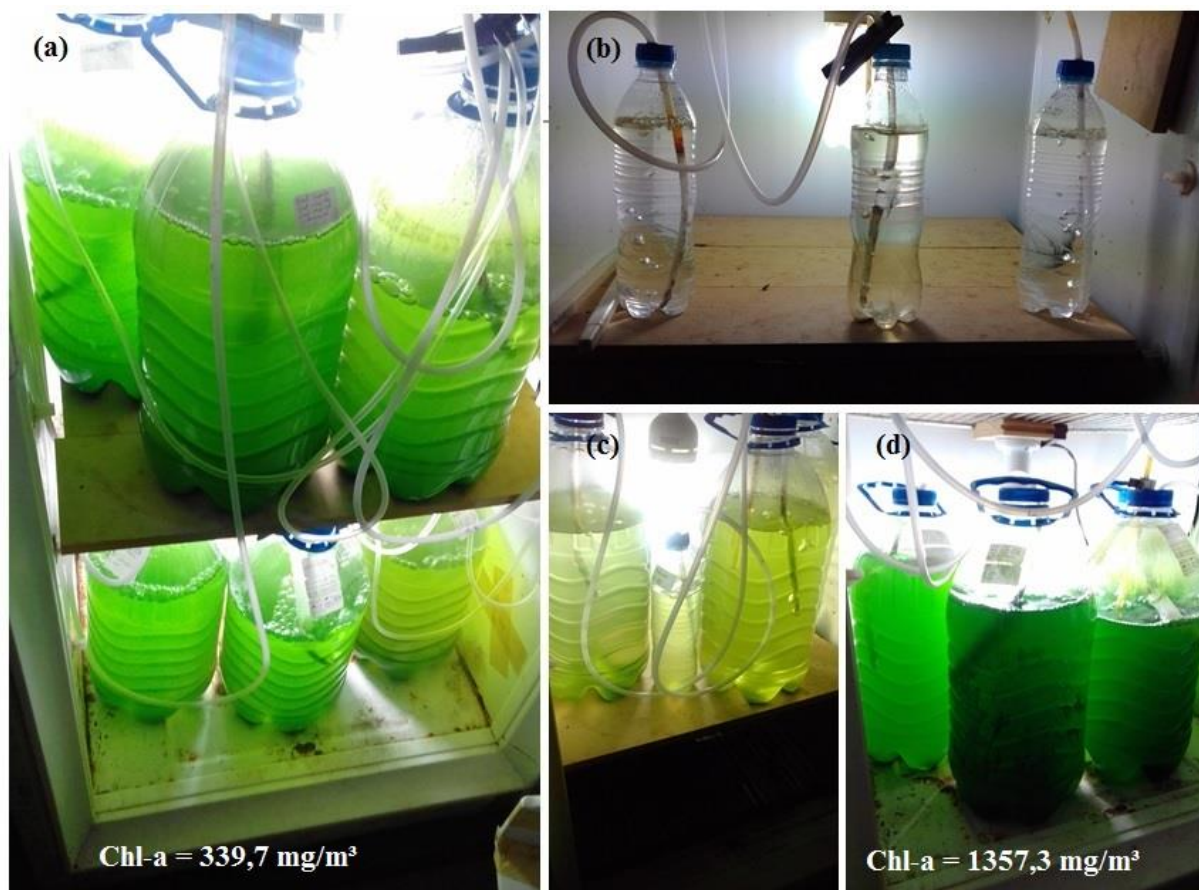


Figura 44: Cultivos de *Euglena sp.* (Euglenophyceae). (a) Cultivos de *Euglena sp.* (Euglenophyceae) provenientes da replicagem do cultivo estabelecido em (c). (b) Primeiro cultivo para a realização do presente trabalho, trata-se de *Euglena sp.*, estabelecido em julho de 2016 a partir de amostra coletada em um reservatório no campus da Universidade Federal de Santa Maria. (c) Primeira replicagem do cultivo de *Euglena sp.* em (b). (d) Cultivos de *Euglena sp.*, em (a) após 30 dias de desenvolvimento.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Em pesquisas e experimentações sobre meios de cultura adequados para promover desenvolvimento mais rápido do fitoplâncton foram testadas outras formulações de nutrientes, sendo a NPK 15-11-11 aquela com os melhores resultados. A essa formulação, e com base nos conhecimentos em Watanabe (2005) foram adicionadas vitaminas (cloridrato de tiamina, cloridrato de piridoxina e cianocobalamina – Obtidas comercialmente no medicamento Citoneurin 5000) e uma solução de nutrientes para aquários (*Micro Nutri*) contendo metais, a qual posteriormente foi substituída pelos metais do meio de cultura BG11 (RIPPKA, 1979 citado em Jacinavicius et al., 2015) com base no trabalho desenvolvido por Ramírez Mérida et al. (2018). A influência para uso de formulação NPK foi de Sipauba-Tavares et al. (2011) e

Hardy & Castro (2000) que utilizaram NPK 20-5-20, para cultivar as espécies de Chlorophyceae *Ankistrodesmus gracilis* (Reinch) Korshicov, *Scenedesmus quadricauda* (Brébisson, 1835) e *Pediastrum quadricauda duplex* (Meyen 1829), no entanto, essa formulação não foi encontrada no comércio local. Ramírez Mérida et al. (2018) utilizaram outra formulação, a NPK 20-10-15 também com bons resultados no cultivo de *Euglena sp.*

De acordo com Bicudo & Menezes (2006), o gênero *Euglena* (Eherenberg 1830) é constituído por indivíduos unicelulares de hábito solitário livre-natante. A célula apresenta, quando em repouso, formas variadas, podendo ser globosa, elipsoide, fusiforme ou cilíndrica (Figura 45). O número de espécies de *Euglena*, a nível mundial, chega a mais de uma centena, ocorrendo principalmente em águas ricas em matéria orgânica.

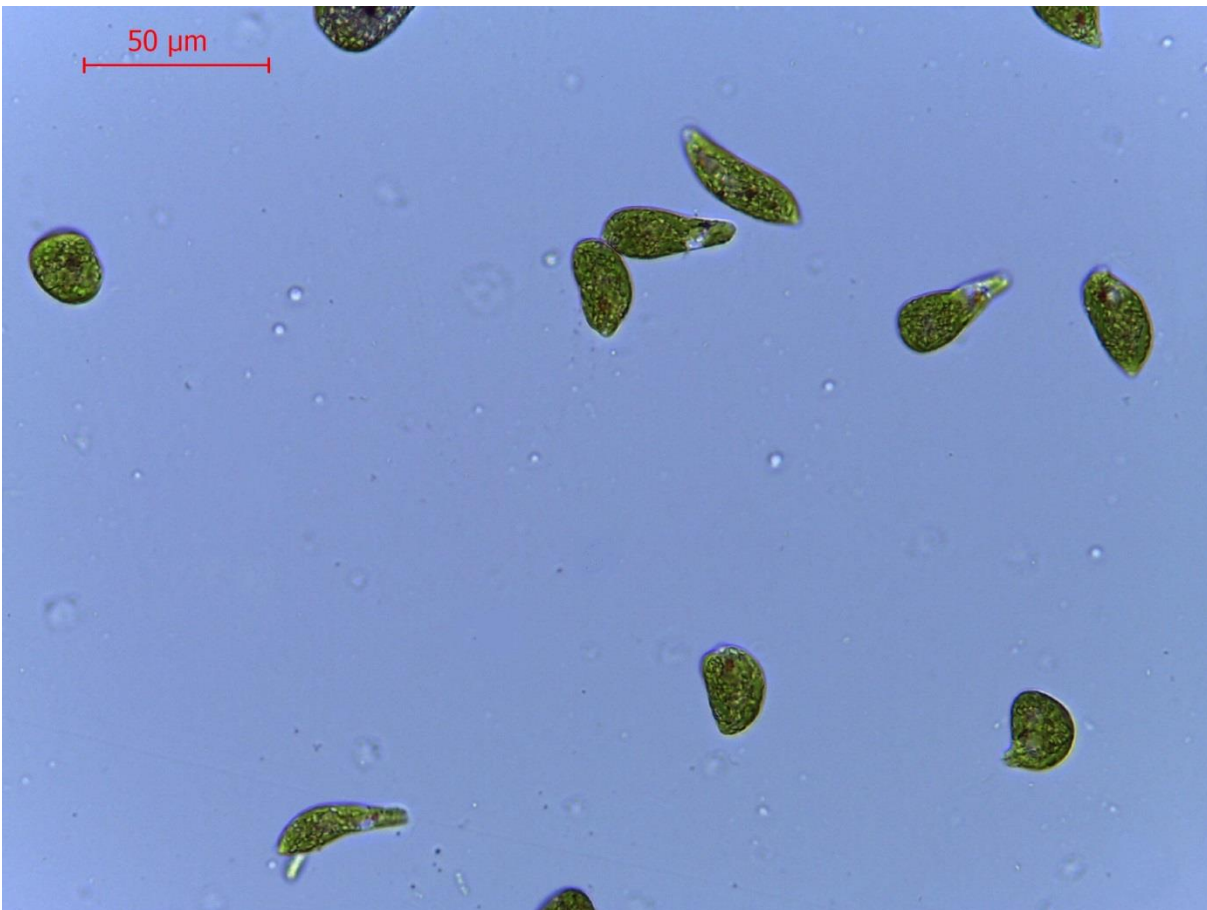


Figura 45: Fotomicrografia de *Euglena sp.* (Euglenophyceae) (Aumento 400X). A microfotografia foi capturada em microscópio binocular *LEICA*, no laboratório de Ficologia do departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Dos organismos cultivados para o presente trabalho, *Euglena sp.* é o único que tem movimento próprio, o que por sua vez proporciona as variadas formas das células mencionadas pelos autores acima citados (Figura 45). Quando em deslocamento, a célula

apresenta a forma cilíndrica e um estreitamento da mesma. As células são muito flexíveis, ou seja, mesmo que não estejam em deslocamento, mas movimentando-se em um único ponto do campo do microscópio, devido à metabolia destes organismos (MARTINS, 2008) ou em movimentos giratórios muito rápidos, varia a forma constantemente, o que influencia as medidas de seu tamanho. O comprimento (máxima distância linear sobre a célula) de uma única célula, em movimento em um mesmo ponto no campo do microscópio, variou de 24,0 μm até 45,0 μm , o que repercutiu no diâmetro da mesma, que variou de 10,0 μm até 15 μm em algumas medições realizadas.

Euglena sp. requer temperaturas mais baixas para melhor desenvolvimento, entre $\pm 20^{\circ}\text{C}$ e $\pm 26^{\circ}\text{C}$. Pinto (2012) considerou a temperatura de 20°C em cultivos de *Euglena gracilis*. Neste sentido, sem equipamento para o controle da temperatura, estes organismos mostraram melhor desenvolvimento no período de inverno, em que as próprias lâmpadas para iluminação dos cultivos e quando necessário uma lâmpada halógena de 40 Watts foram o suficiente para manter a temperatura adequada nos dias mais frios, considerando um ambiente fechado para alocação dos cultivos (Estantes - Figura 38). As temperaturas variaram no inverno de $\pm 18^{\circ}\text{C}$ até $\pm 27^{\circ}\text{C}$.

Temperaturas muito altas promovem sedimentação de células e por isso, os cultivos de *Euglena sp.* foram alocados em estante separada no período de inverno, devido as temperaturas mais altas promovidas aos organismos de *Cyanophyceae sp.*, pela lâmpada halógena de 100 watts. Porém, no verão, as temperaturas variaram semelhantemente para todos os organismos cultivados, o que de certa forma repercutiu no desenvolvimento dos mesmos, principalmente de *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae*. Neste sentido, as medições radiométricas foram realizadas no período de inverno.

A aeração é necessária para manter o cultivo de *Euglena sp.* homogêneo, no entanto, a ausência da mesma não inibe o crescimento dos organismos, mesmo porque *Euglena sp.* tem movimento próprio e desloca-se no meio. Anteriormente a repicagem, principalmente de cultivos mais velhos, com muitos resíduos dos próprios organismos (Ex: Células mortas), se a aeração for cessada, é facilitada a captura de organismos sobrenadantes com a utilização de pipeta esterilizada (autoclavada), para a preparação de novo cultivo. O mesmo pode ser dito se for necessário novo isolamento, em caso de contaminação por outros organismos fitoplanctônicos sem movimento próprio, os quais sedimentam na ausência de movimentação do meio (Ex: *Scenedesmus sp.*).

Euglena sp. requer meio ácido para seu desenvolvimento. Um *pH* de 6,0 no meio de cultura diminui a medida que os organismos desenvolvem-se, chegando a menos 2,0 em

poucos dias (cerca de cinco dias), o que pode ser verificado também em Ramírez Mérida et al. (2018). Neste sentido, considerou-se *pH* inicial do meio de cultura entre 3,0 e 4,0 (DACH, 1943) quando as repicagens eram realizadas. Verificou-se cultivos em desenvolvimento com *pH* de até 1,8, promovido pela formulação NPK 04-08-14 anteriormente mencionada. Porém em NPK 15-11-11, sem ajuste, o *pH* é cerca de 6,0, que no entanto, chega a valores semelhantes a 1,8, a medida que os organismos desenvolvem-se.

Euglena sp. (Figura 46) está em cultivo por mais de dois anos e alguns cultivos foram deixados sem a reposição de nutrientes. Estes cultivos também se desenvolveram, mesmo porque os organismos de *Euglena sp.* podem ser autotróficos ou heterotróficos (MARTINS, 2008). Porém, o desenvolvimento dos mesmos parece ser mais lento sem a reposição de nutrientes, sendo esse um aspecto para ser experimentado.



Figura 46: Fotomicrografia de *Euglena sp.* (*Euglenophyceae*) (Aumento 1000X). A microfotografia foi capturada em microscópio binocular *LEICA*, no laboratório de Ficologia do departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Por fim neste subitem do presente trabalho, ressaltam-se os organismos de *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.* Meyen 1829) (Figura 47). O cultivo destes organismos foi estabelecido a partir de uma cepa do gênero *Limnothrix* Meffert 1988, provinda da Universidade Federal de Rio Grande (FURG) (Local de coleta não informado), na qual, organismos de *Scenedesmus sp.* estavam contidos. O gênero *Limnothrix* não se desenvolveu em meio ASM1, mas, no entanto, *Scenedesmus sp.* desenvolveu-se em grande quantidade de organismos, com ASM1 em pH 7,4.

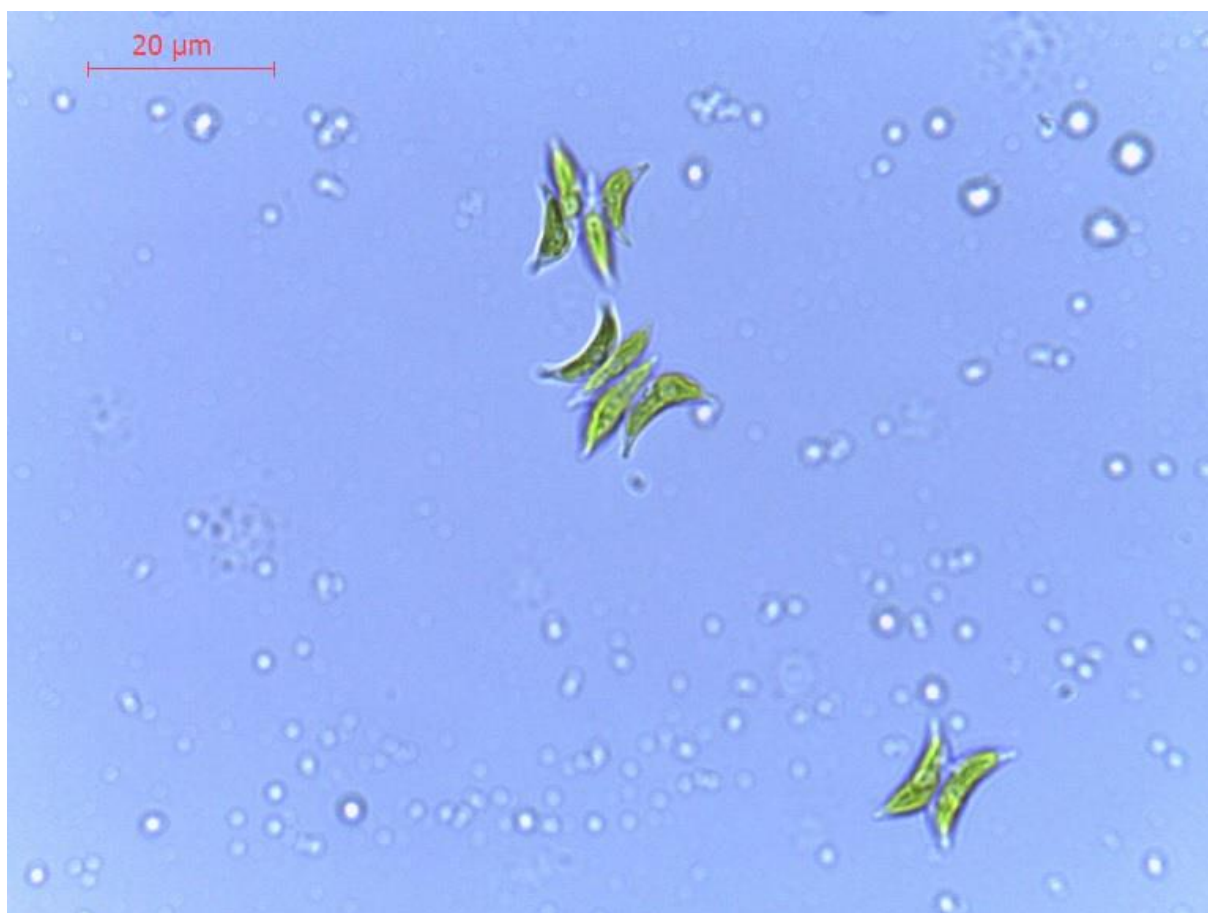


Figura 47: Fotomicrografia de *Scenedesmus sp.* (*Chlorophyceae*) (Aumento 1000X). A microfotografia foi capturada em microscópio binocular *LEICA*, no laboratório de Ficologia do departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Posteriormente, por micropipetagem e diluições sucessivas (ANDERSEN & KAWACHI, 2005), utilizando vidro de relógio em microscópio invertido, foi realizado o isolamento efetivo de *Scenedesmus sp.* em placa de *Elisa* 96 poços com meio ASM1 (Figura 48). Essa mesma técnica de isolamento foi efetuada também para os demais organismos, posteriormente a verificação dos mesmos em desenvolvimento nos respectivos meios por

enriquecimento (inicialmente para *Euglena sp.*) e sintético (*Spaheerocavum sp.*), sendo estes tipos de cultivo referenciados em Watanabe (2005).

Segundo Bicudo & Menezes (2006), o gênero *Scenedesmus sp.* é extremamente comum nos corpos de água, sejam eles oligotróficos, mesotróficos ou eutróficos, sendo um dos primeiros a colonizar um ambiente. *Scenedesmus sp.* é formado por indivíduos coloniais com 2, 4, 8, 16 ou 32 células dispostas lado a lado. As formas das células podem ser elipsoides, ovoides, fusiformes ou lunadas.

Nas observações em microscópio, os organismos de *Scenedesmus sp.* continham 2 e 4 células (Figura 47). Em determinados cultivos observaram-se células livres, o que provavelmente se deve ao novo ambiente de vivência, ou seja, o cultivo.

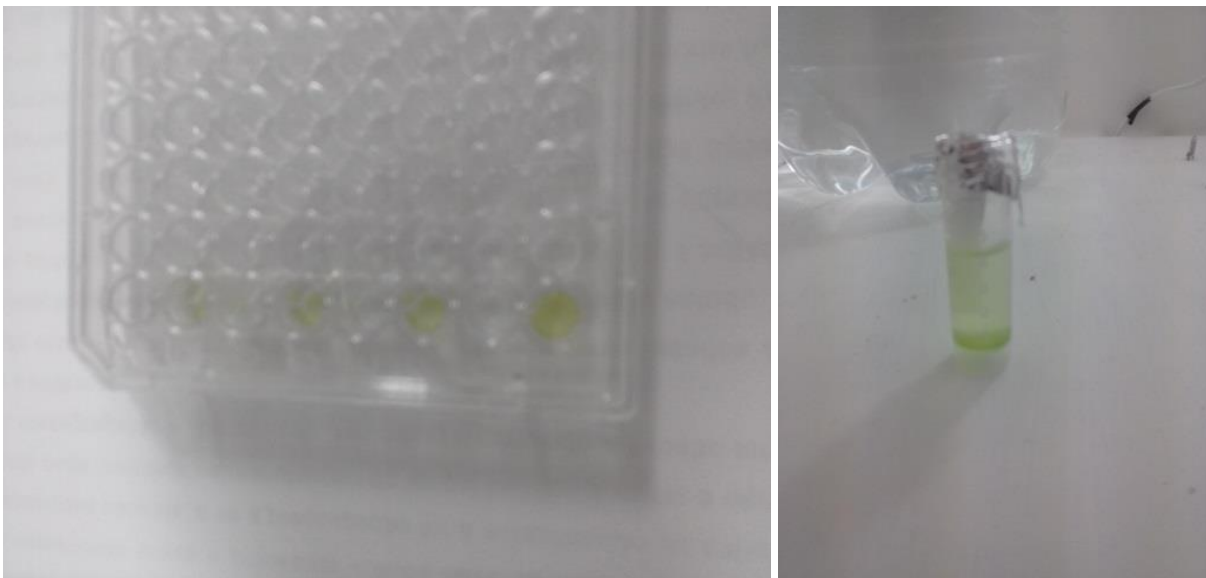


Figura 48: Cepas de *Scenedesmus sp.* em isolamento. A Esquerda, a placa de *Elisa 96 poços*. A direita uma cepa de *Scenedesmus sp.*, retirada da placa de *Elisa*, que posteriormente deu origem aos cultivos.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

Casos em que as temperaturas tornaram-se muito altas, $\pm 32^{\circ}\text{C}$ (Verão), grandes aglomerados de colônias de *Scenedesmus sp.* foram verificados, o que ocasionou sedimentação dos organismos mesmo com aeração. Temperaturas em torno de 26°C são requeridas por estes organismos para seu melhor desenvolvimento. Sem equipamento para o controle da temperatura, o período de inverno foi melhor para cultivar, e assim como para os organismos de *Euglena sp.*, devido às temperaturas mais baixas, apenas as lâmpadas utilizadas para a iluminação e uma lâmpada halógena com potência de 40 watts foram o suficiente para manter temperaturas adequadas. Alocadas na mesma estante que *Euglena sp.*, as temperaturas também variaram de $\pm 18^{\circ}\text{C}$ a $\pm 27^{\circ}\text{C}$.

O cultivo de *Scenedesmus sp.* é melhor de ser realizado em recipientes tubulares, devido à facilidade de movimentação do meio. No caso do presente trabalho, foram utilizadas tanto garrafas pet de 5 litros como caixas de 17 e 68 litros (Figuras 38, 41, 43, 49). Para as garrafas menores e tubulares um compressor com potência de 4,0 watts é o suficiente para manter o cultivo homogêneo. Por outro lado, para as caixas maiores foi necessário um compressor com potencia de 70 watts, que proporciona significativa turbulência no meio.

Scenedesmus sp. foi o último gênero fitoplanctônico isolado e cultivado para a realização dos experimentos radiométricos, o que foi realizado entre junho e julho do ano de 2018. As medições radiométricas propriamente ditas iniciaram-se em outubro de 2018, incluindo testes realizados com os organismos, principalmente em relação às alíquotas de cultivo a serem inseridas no tanque de radiometria para obtenção de determinadas variações das concentrações de clorofila-a. A Figura 49 de certa forma representa a efetivação dos cultivos dos três organismos utilizados nas medições radiométricas do presente trabalho, as experimentações, coletas de amostras, aquisição de diferentes meios de cultura, testes de cultivos, aquisição de outros materiais necessários, construção e reforma de estantes para alocação dos cultivos, resolução de problemas como a falta de equipamento para o controle de temperatura, observações em microscópio, até o último cultivo estabelecido, ou seja, *Scenedesmus sp.*.

Verifica-se que os organismos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.* Azevedo e Sant'Anna 2003), *Euglenophyceae* (*Euglena sp.* Ehrenberg 1830) e *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.* Meyen 1829) estão representados neste item do presente trabalho, de três maneiras distintas, ou seja, em suas formas e tamanhos observados em microscópio e fotomicrografias (Figuras 36, 37, 45, 46, 47), em seus diferentes efeitos na coloração do meio, devido aos seus processos e produtos de degradação (Figura 42) e, nos efeitos de seus pigmentos em interação com a radiação eletromagnética, principalmente a clorofila-a, mais abundante e em comum para os três organismos, e a ficocianina (Pigmento acessório) especificamente para *Sphaerocavum sp.* (Figura 40, 41, 43, 44, 49) que afetam a radiação, principalmente em comprimentos de onda do verde e ciano, respectivamente (RICHARDSON, 1996). Em todos os casos, diferenças podem ser observadas, indicando que estes organismos são componentes opticamente ativos distintos, seja *in vivo* ou em degradação. Cabe então verificar os mesmos espectralmente e analisar os seus efeitos sobre os diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético e, principalmente, sobre a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a, que se trata de uma das principais questões do presente trabalho.

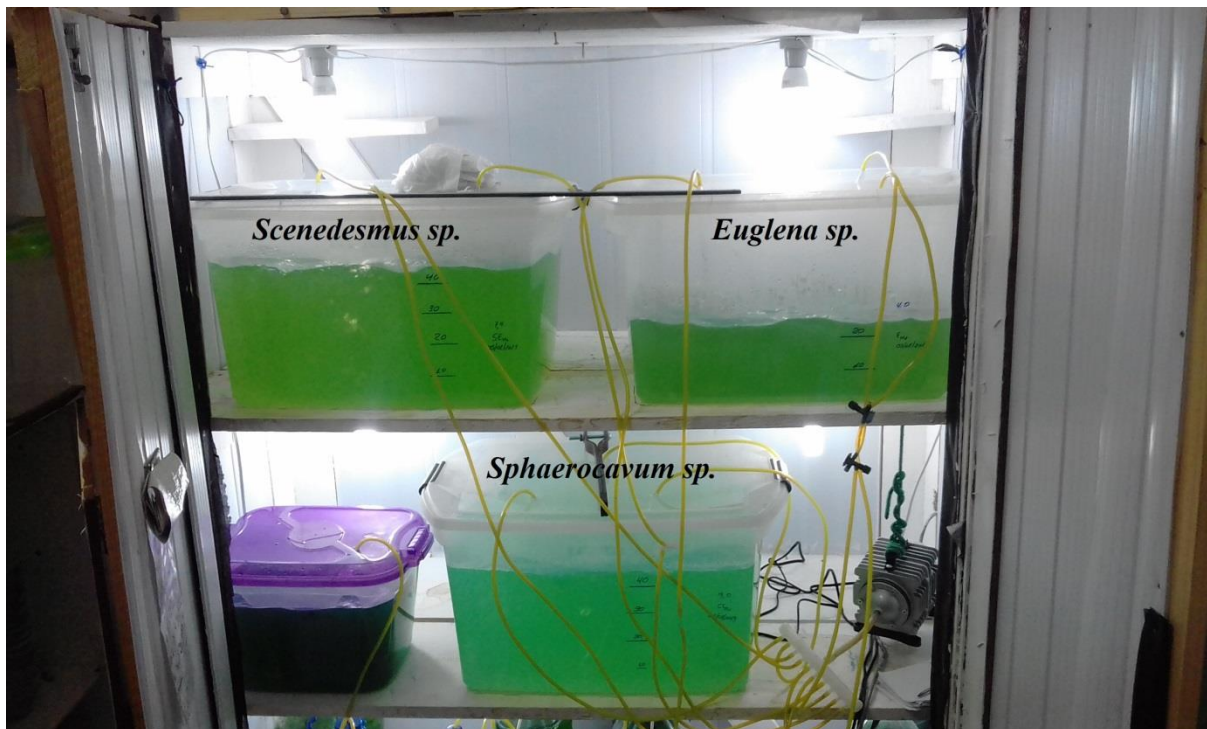


Figura 49: Cultivos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*), *Euglenophyceae* (*Euglena sp.*) e *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.*) em caixas com capacidade de 68 litros. Ao lado direito da caixa com cultivo de *Sphaerocavum sp.*, outro compressor com maior potência adquirido para a aeração adequada nas caixas com capacidade de 68 litros. Os cultivos destas caixas foram utilizados para testes de radiometria em tanque com 1000 litros de capacidade de armazenamento. Todos os materiais nesta fotografia foram adquiridos pelo autor do presente trabalho com recursos próprios.

Fonte: Joceli Augusto Gross.

4.2 Análises da reflectância da água em função de componentes opticamente ativos para a estimativa das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica

Os espectros de reflectância da Figura 50 foram coletados sobre a água contendo somente os organismos fitoplanctônicos cultivados, isolados (Figuras 50a 50b, 50c) e em composição (Figura 50d). Nestes espectros, notadamente a magnitude dos valores de reflectância são superiores para os dados relacionados aos organismos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*) (Figura 50a), apesar de que a variação nas concentrações de clorofila-a (Entre a mínima e máxima concentração) para estes organismos tenha sido muito inferior àquelas verificadas para os demais organismos isolados (Figuras 50b, 50c).

Este aspecto em particular permite retomar algumas considerações realizadas com base nos conhecimentos obtidos em Metsamaa et al. (2006) e constadas na revisão bibliográfica do presente trabalho. Estes pesquisadores ressaltaram que o espalhamento da radiação proporcionado pela água contendo espécies de *Cyanophyceae* é maior que o de outras espécies de fitoplâncton. Isso significa que a porção de organismos de *Cyanophyceae*

contida em uma composição da comunidade de fitoplantônica pode proporcionar um sinal de reflectância mais expressivo do que seria sem a sua presença.

Isso também pode ser observado na Figura 50d, na qual, os espectros de reflectância são o resultado do efeito combinado de *Cyanophyceae*, *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae*, ou seja, uma composição qualitativa no que se refere as classificações dos organismos presentes na água. No entanto, nessa composição de organismos ocorreram variações quantitativas aleatórias, no que se refere à abundância relativa entre os organismos. O efeito combinado dos três organismos e as variações em abundância relativa entre os mesmos proporcionaram variações distintas da reflectância em função das concentrações de clorofila-a, quando comparadas com aquelas das Figuras 50a, 50b e 50c referentes aos organismos isolados.

As variações da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a marcam de forma proeminente as diferenças espectrais entre os três organismos. Na região do visível do espectro eletromagnético, as variações da reflectância para os dados de *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* são inversas em relação às variações nas concentrações de clorofila-a (Figuras 50b; 50c), sendo o oposto verificado para os dados de *Cyanophyceae* (Figura 50a) a não ser para comprimentos de onda do azul (Entre 400 nm e 450 nm) e verde (Entre 500 nm e 600 nm), onde para os dados de *Cyanophyceae* (Figura 50a) e *Chlorophyceae* (Figura 50c), respectivamente, os espectros de reflectância se sobrepõem. Em relação à magnitude de valores de reflectância, os espectros coletados sobre águas contendo os organismos de *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* são semelhantes aqueles coletados por Rundquist et al. (1996), principalmente na região do visível. Os espectros coletados pelo referido autor, não alcançaram os 2% de reflectância na região do verde para concentrações de clorofila superiores a 150 mg/m³ e se sobrepõem até concentrações de 260 mg/m³.

Na região do infravermelho próximo, a variação da reflectância é positiva em relação às variações das concentrações de clorofila-a, para os dados dos três organismos aqui estudados, porém esta variação é inferior para os dados de *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae*, mesmo porque as variações nas concentrações de clorofila-a para estes organismos foram muito superiores daquela verificada para *Cyanophyceae* (Verificar escalas das concentrações de clorofila-a das Figuras 50a, 50b e 50c). Neste sentido, e a julgar pelas magnitudes das variações nas concentrações de clorofila-a, a variação da reflectância coletada sobre a água contendo somente *Cyanophyceae* foi muito superior também nesta região do espectro eletromagnético.

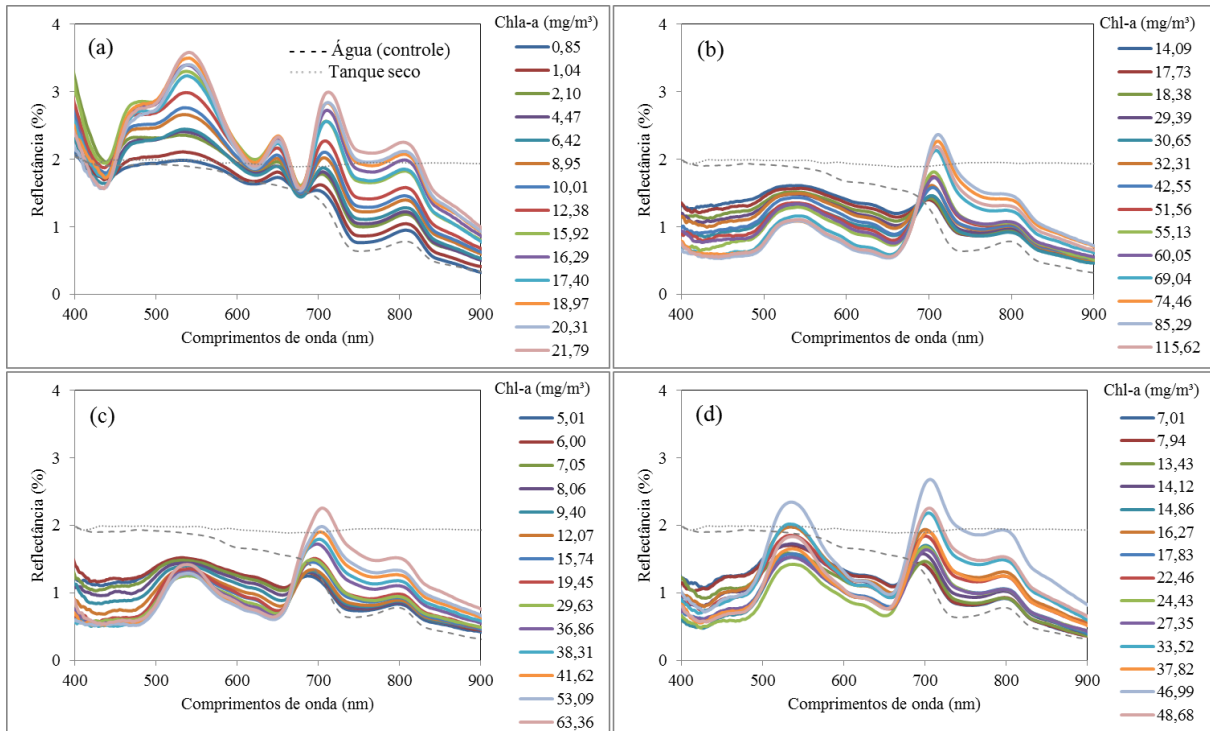


Figura 50: Espectros de reflectância da água contendo os organismos fitoplanctônicos cultivados. (a) *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*). (b) *Euglenophyceae* (*Euglena sp.*). (c) *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.*). (d) Composições dos três organismos (*Sphaerocavum sp.*; *Euglena sp.*; *Scenedesmus sp.*) em variações de abundância relativa. Estes dados se referem aos tratamentos 1, 2, 3 e 4.

No centro de absorção pela clorofila-a na região do vermelho, entre 620 nm e 700 nm, a reflectância para *Cyanophyceae* varia tenuemente e positivamente (Figura 50a). Em especial para esta região do espectro (vermelho), Gitelson et al. (2000) salientaram que ocorre a mínima sensibilidade às variações das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica, o que foi verificado no presente trabalho para os organismos de *Cyanophyceae* isoladamente. No entanto, este aspecto não pode ser considerado verdadeiro para os organismos de *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae*, como foi verificado nos dados das Figuras 50b e 50c e para os dados referentes aos organismos em composição (Figura 50d). Este aspecto também pode ser observado na Figura 51.

A reflectância é significativamente distinta em magnitude de valores, associados a concentrações de clorofila-a semelhantes (Figuras 51c, 51d), o que se deve as variações inversas e distintas da reflectância nas regiões do visível e infravermelho próximo em relação as variações nas concentrações de clorofila-a (Figuras 50a, 50b, 50c, 51a e 51b), respectivamente. Isso indica a presença de outros componentes opticamente ativos na água, além da clorofila-a, e, neste sentido, deve ser destacado que até esse ponto dos resultados, apenas organismos fitoplanctônicos eram as partículas presentes na água, ou seja, as partículas que contém a clorofila-a.

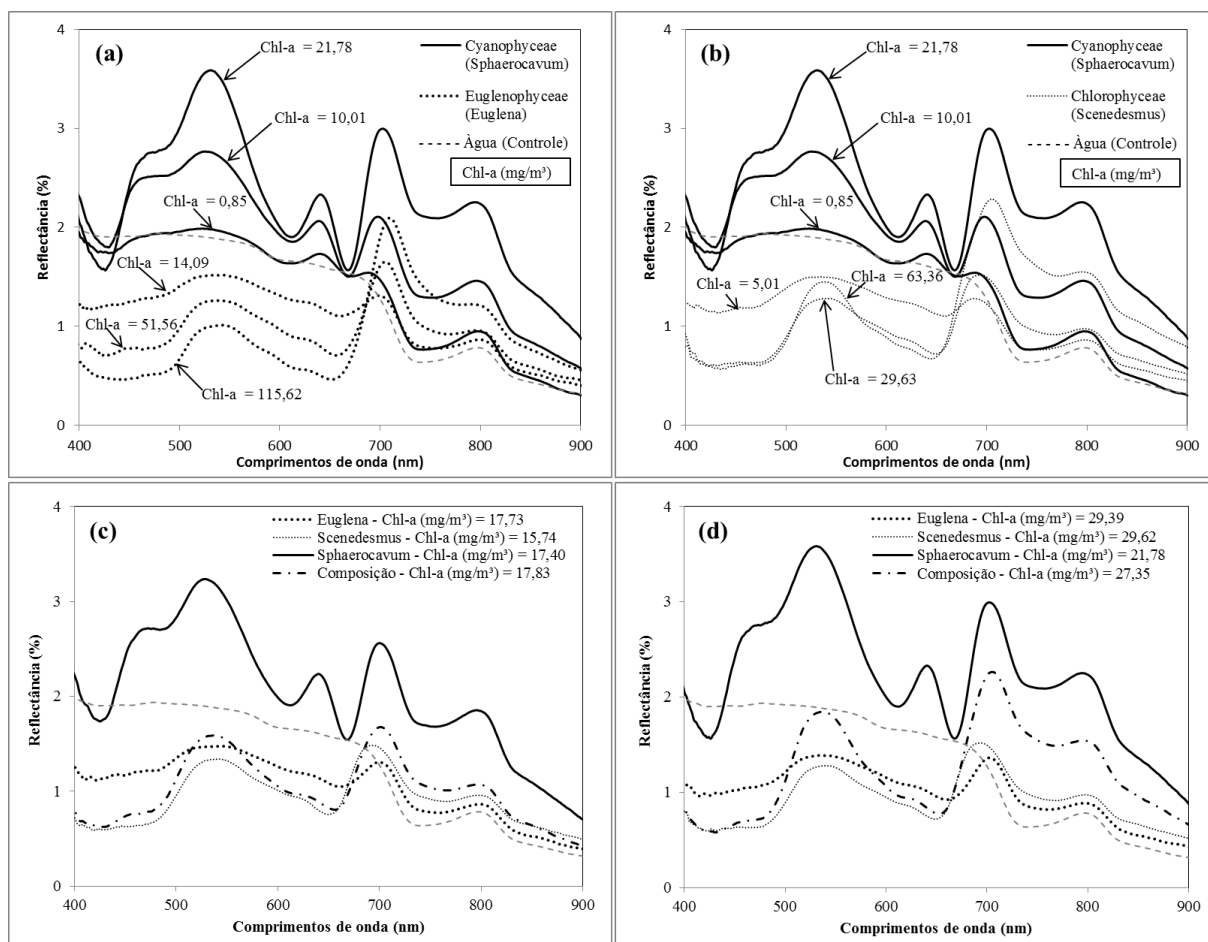


Figura 51: Variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a dos organismos cultivados. (a) *Cyanophyceae* e *Euglenophyceae*. (b) *Cyanophyceae* e *Chlorophyceae*. (c; d) Variação da reflectância em função de concentrações de clorofila-a semelhantes, considerando os dados dos organismos de *Cyanophyceae*, *Euglenophyceae*, *Chlorophyceae* e composições destes organismos.

Os coeficientes de correlação obtidos para os dados da região do visível mostram claramente os efeitos dos organismos espectralmente distintos sobre a reflectância e nas relações desta com as concentrações de clorofila-a (Figura 52). Cabe reforçar que na análise de correlação foram considerados apenas os dados de reflectância nos variados comprimentos de onda de 400 nm à 900 nm em relação as concentrações de clorofila-a, ou seja, para a mesma variável independente (Clorofila-a) em relação a variável dependente (Reflectância) obteve-se coeficientes de correlação, tanto positivos como negativos na região do visível, entre 400 nm e 670 nm, o que comprova que outros componentes opticamente ativos estão presentes nos próprios organismos aqui estudados (Figura 52), caso contrário, entende-se que os coeficientes de correlação seriam todos negativos ou todos positivos nesta região do espectro eletromagnético.

O fitoplâncton não pode ser considerado um único componente opticamente ativo da água, os distintos organismos que o compõe podem promover variações distintas da reflectância para variações semelhantes das concentrações de clorofila-a (Figuras 51c, 51d),

ou seja, uma mudança na composição de organismos contidos na água (Composição da comunidade fitoplanctônica) pode proporcionar variações distintas da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a. Isso corrobora com as constatações de Quibell (1992), no entanto, neste trabalho, acrescenta-se que apenas uma variação quantitativa no que se refere a abundância relativa entre os organismos em composição é o suficiente para ocasionar mudanças nas variações da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a, conseqüentemente erros de estimativa deste pigmento fitoplanctônico como posteriormente será demonstrado. Isso por sua vez ocorre porque os organismos em suas variadas características, que envolvem a clorofila-a contida nos mesmos, afetam a radiação incidente no corpo de água de forma independente das concentrações de clorofila-a, o que permite ressaltar o efeito de “embalagem” destacado Duysens (1956) ou de “empacotamento” relatado por Kirk et al. (1976; 1983). A presença de aerótopos nos organismos de *Cyanophyceae*, os quais segundo Nair (2008) são muito reflexivos, pode ser uma explicação para o sinal de reflectância positivo e expressivo destes organismos em relação as suas concentrações de clorofila-a e, além disso, com variação inversa àqueles observados para os organismos de *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* na região do visível do espectro eletromagnético para a grande maioria dos comprimentos de onda.

Na região do espectro entre 700 nm e 900 nm (Infravermelho próximo) foram verificados altos coeficientes de correlação, somente positivos, tanto para os dados dos três organismos isolados como para as composições destes organismos (Variações quantitativas em termos de abundância relativa entre organismos), mas que, no entanto, se tornaram inferiores para todo o conjunto de dados (Figura 52). Isso significa que o espalhamento da radiação ocasionado pelas células fitoplanctônicas na região do infravermelho próximo (GITELSON et al., 2000; LONDE, 2008) também é distinto para os organismos aqui estudados, o que muito provavelmente ocorreu devido às diferentes formas e tamanhos de suas células (MUELLER, 1974), caso contrário, entende-se que os coeficientes de correlação também seriam altos para todo o conjunto de dados (Figura 52).

Nos resultados da Figura 52 está uma resposta bem plausível ao objetivo de Santos & Pereira Filho (2013), de verificar o comprimento de onda com melhor correlação com as concentrações de clorofila-a. Os dados da Figura 52 comprovam que se considerarmos apenas organismos fitoplanctônicos na água isoladamente, qualquer comprimento de onda entre 400 nm e 900 nm se correlaciona fortemente com as concentrações de clorofila-a, o que se trata da pequena descoberta, ressaltada na revisão bibliográfica, e que seria aqui comprovada. Bastava os autores (SANTOS & PEREIRA FILHO, 2013) terem realizado experimentos controlados,

que, aliás, é o mínimo que se espera frente ao objetivo dos mesmos, para terem verificado isso, porque com dados coletados em campo é praticamente impossível sanar tal objetivo devido aos efeitos dos demais componentes opticamente ativos sobre a reflectância.

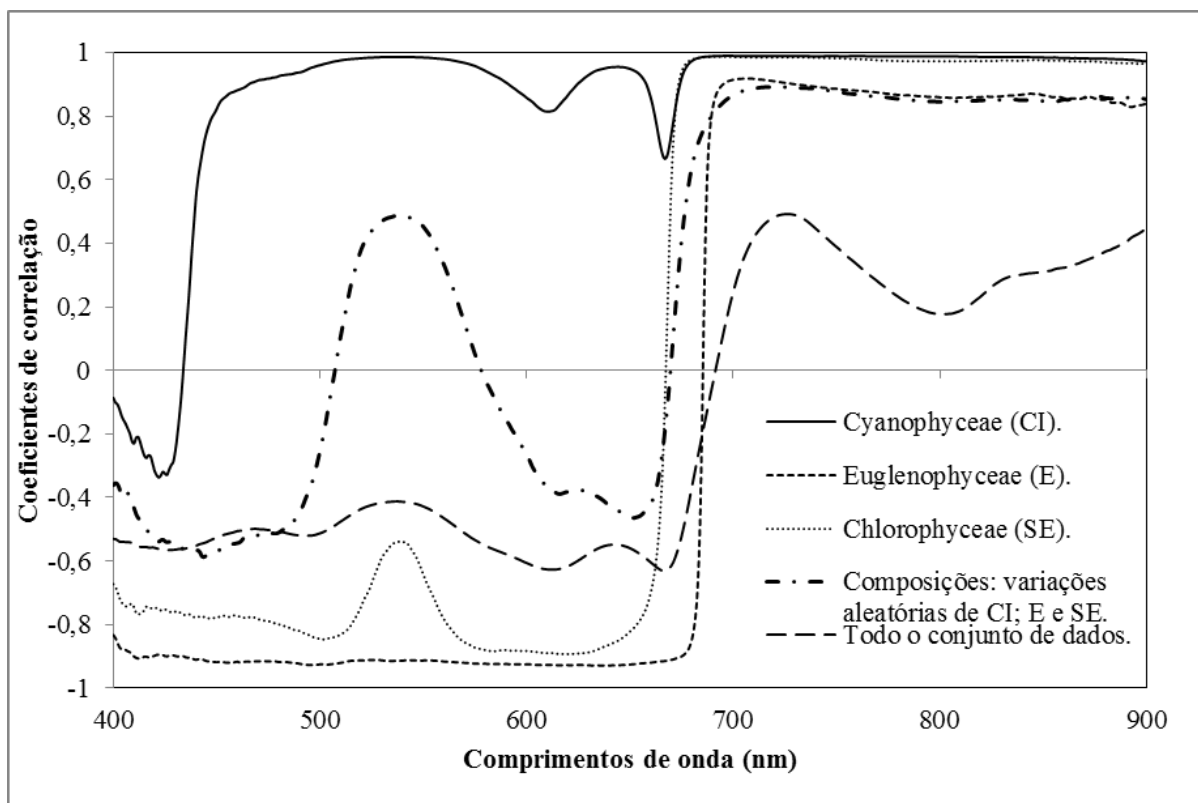


Figura 52: Correlação entre a reflectância dos comprimentos de onda da faixa de 400 nm a 900 nm e as concentrações de clorofila-a dos organismos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum*), *Euglenophyceae* (*Euglena*), *Chlorophyceae* (*Scenedesmus*), de composições aleatórias destes organismos e para todo o conjunto de dados constados na Figura 50.

Os distintos ajustes entre a clorofila-a e a reflectância, e as diferentes inclinações das retas ou curvas nos diagramas de dispersão (Regressão simples) da Figura 53, expressam mais uma vez os organismos fitoplanctônicos espectralmente distintos estudados neste trabalho, apesar de que os dados da Figura 52 tenham elucidado quase que completamente esta questão. Ressalta-se que na região do infravermelho próximo, especificamente em 715 nm, todos os ajustes foram lineares e positivos, porém verificaram-se distintos coeficientes angulares ou inclinações das retas de regressão (Figura 53), o que explica os menores coeficientes de correlação obtidos para todo o conjunto de dados da Figura 52, nesta mesma região do espectro.

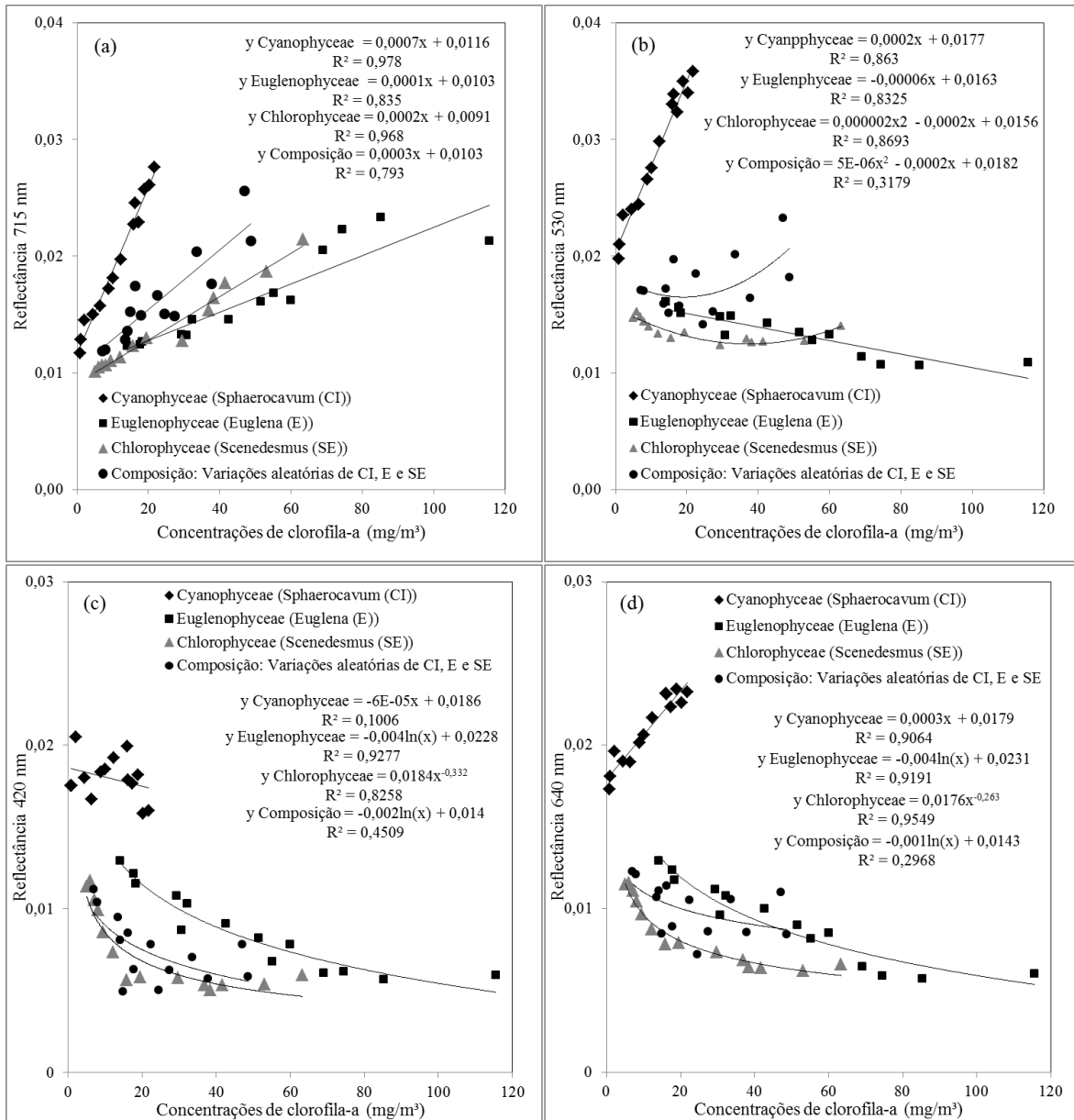


Figura 53: Diagramas de dispersão entre as concentrações de clorofila-a de Cyanophyceae, Euglenophyceae, Chlorophyceae e composições destes organismos e equações de regressão para a estimativa das concentrações de clorofila-a. Todos os dados utilizados nas regressões estão expostos na Figura 50.

Devido as variações distintas da reflectância (Variável dependente considerada) em função das variações nas concentrações de clorofila-a (Variável independente considerada), ressalta-se que a reflectância das Figuras 50a, 50b, 50c, e 50d, variou em função de pelo menos mais três distintas variáveis independentes, das quais apenas a clorofila-a foi extraída e que se tratam das partículas clorofiladas, espectralmente estudadas no presente trabalho, ou seja, os organismos fitoplanctônicos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*), *Euglenophyceae* (*Euglena sp.*) e *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.*). Isso permite dizer que não há um único comprimento de onda, entre 400 nm e 900 nm, que é afetado somente por clorofila-a fitoplanctônica, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton. Outra variável

independente, poderia ser entendida como o efeito combinado destes três organismos fitoplanctônicos sobre a reflectância (Figura 50d – Composições), promovendo sinais compostos desta grandeza radiométrica que variaram diferentemente daqueles sinais de reflectância obtidos para os organismos isolados, e independentemente das concentrações de clorofila-a.

No contexto dos organismos fitoplanctônicos, a clorofila-a participa para a efetuação dos valores de reflectância e variações da mesma, no entanto, não os domina, o que é explicado pelas variações distintas e inversas da reflectância em relação às variações nas concentrações de clorofila-a nas regiões infravermelho próximo e visível do espectro eletromagnético, respectivamente. Modelos gerados por regressão simples não são adequados para estimar remotamente as concentrações de clorofila-a a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral ou comprimento de onda entre 400 nm e 900 nm, mesmo que na água contenha apenas fitoplâncton, porque este tipo de modelo estimará concentrações de clorofila-a para qualquer valor ou variações nos valores de reflectância, independentemente se eles forem ocasionados por clorofila-a ou pelas partículas clorofiladas, ou seja, pelos organismos de *Cyanophyceae*, *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae*, ou ainda pelo efeito combinado destas três partículas, como pode ser verificado nas Figuras 54 e 55, onde erros substanciais nas estimativas das concentrações de clorofila-a são demonstrados e ocorrem devido às influências destas distintas partículas clorofiladas sobre a reflectância.

Em alguns casos, os ajustes entre as concentrações de clorofila-a observadas e estimadas são extremamente significativos, se observarmos os coeficientes de determinação (R^2) (Ex: Figura 54e; 55f). No entanto, os altos erros quadráticos médios (RMSE) demonstram que as estimativas foram errôneas, com significativas subestimações e superestimações das concentrações de clorofila-a, o que também pode ser verificado pelas escalas em valores de clorofila-a estimada e observada nos diagramas de dispersão (Figuras 54 e 55).

As equações de regressão das Figuras 54 e 55, seus coeficientes, não foram capazes de efetuar estimativas corretas, porque foram aplicados sobre águas contendo componentes opticamente ativos distintos daqueles presentes nas águas quando os dados utilizados para o desenvolvimento dos modelos foram coletados, ou seja, outros organismos fitoplanctônicos. Então o problema reside nas condições das águas quando o modelo é aplicado, ou seja, quando não se sabe qual ou quais os componentes opticamente ativos estão influenciando e promovendo variações da reflectância no corpo de água, incluindo os organismos

fitoplantônicos. Em outras palavras, quando o referido tipo de modelo é aplicado sem as referências de campo as incertezas sobre as estimativas são maximizadas.

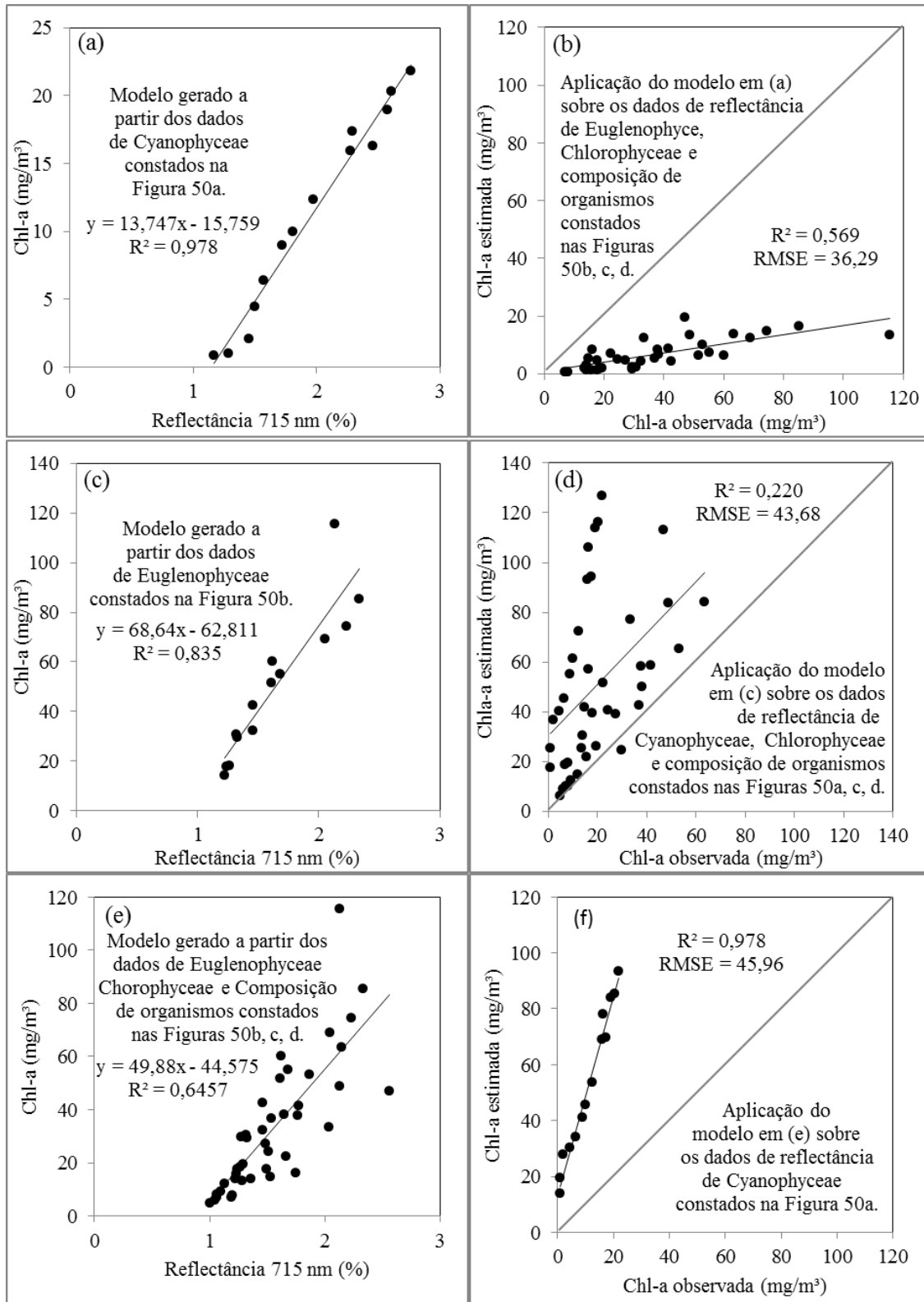


Figura 54: Regressões entre concentrações de clorofila-a e a reflectância (a; c; e) e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a em 715 nm (b, d, f). Os dados utilizados nas regressões estão expostos na Figura 50.

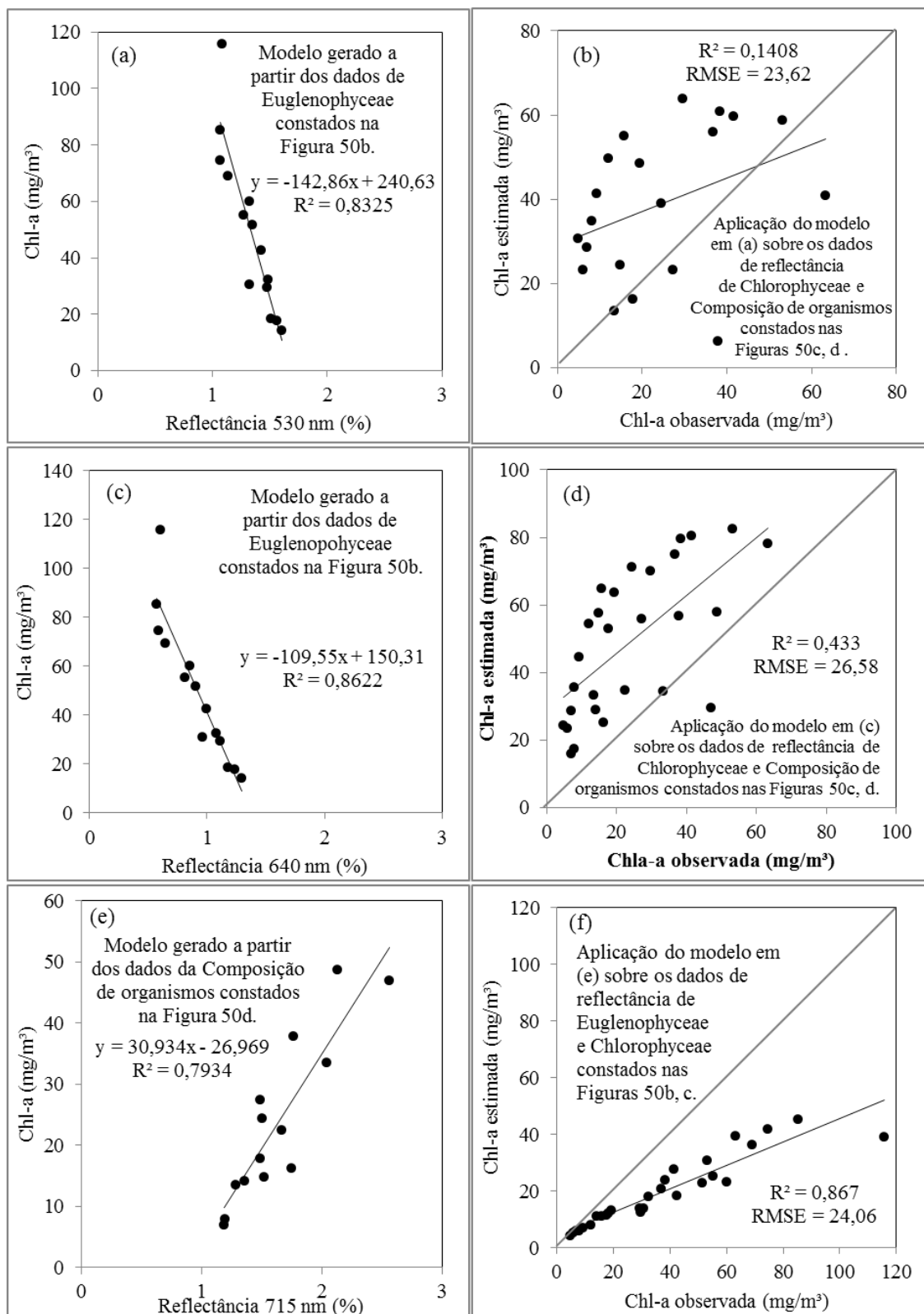


Figura 55: Regressões entre concentrações de clorofila-a e a reflectância (a; c; e), e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância em 530 nm (a, b), 640 nm (c, d) e 715 nm (e, f). Todos os dados utilizados nas regressões estão expostos na Figura 50.

Desenvolver um modelo empírico por análise de regressão simples para estimar clorofila-a a partir da reflectância de uma única banda espectral, obtendo-se bons ajustes entre

a clorofila-a e a reflectância, é razoavelmente fácil, se ocorrer covariação entre a reflectância e as concentrações de clorofila-a (Figura 55). No entanto, um modelo deste tipo que consiga decompor cada valor de reflectância em suas partes, referentes à influência de cada componente opticamente ativo presente em um corpo de água, e que elimine as partes indesejáveis mantendo somente aquela referente à clorofila-a, é extremamente difícil de ser obtido para não dizer improvável, mesmo porque, a clorofila-a está contida em partículas opticamente distintas, como as demonstradas no presente trabalho.

Variações qualitativas e quantitativas (Variações em abundância relativa entre organismos) em uma composição da comunidade fitoplanctônica podem proporcionar erros de estimativa das concentrações de clorofila-a, se o referido tipo de modelo empírico for aplicado. Como não há um único comprimento de onda, entre 400 nm e 900 nm, que é afetado somente por clorofila-a fitoplanctônica, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton, aquele que pode ser considerado o principal requisito para a aplicação da regressão simples não pode ser atendido, ou seja, de acordo com Downing e Clark (2007), a regressão simples é aplicável somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente.

Os aspectos até aqui ressaltados, sobre a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a, se referem aos dados coletados sobre águas contendo apenas os organismos fitoplanctônicos. Por outro lado, a partir deste ponto dos resultados do presente trabalho, os dados de reflectância também são afetados por sólidos suspensos inorgânicos (SSI), ou seja, além dos aqui denominados componentes opticamente ativos distintos *Cyanophyceae*, *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* outra variável independente é acrescentada na água, isoladamente (Figura 56) ou em mistura com os organismos fitoplanctônicos e as concentrações de clorofila-a.

Qualquer modelo para a estimativa das concentrações de clorofila-a, constado ou não nas Figuras 54 e 55 e que tenha sido desenvolvido por regressão simples a partir da reflectância de uma única banda espectral de 400 nm e 900 nm, estimará concentrações de clorofila-a para águas contendo apenas sólidos suspensos inorgânicos (SSI) (Figura 57). Isso se deve ao fato de que a esse tipo de modelo, uma única informação é atrelada, a de que a reflectância varia em função das variações nas concentrações de clorofila-a em determinado comprimento de onda. No entanto, os fatos de que SSI também promove variações da reflectância em qualquer comprimento de onda de 400 nm e 900 nm (Figura 56) e os organismos fitoplanctônicos promovem variações distintas e inversas da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a (Figuras 50, 52 e 53), são ignorados, ou seja, não são considerados no modelo, o que pode ser verificado em várias bibliografias

citadas na revisão bibliográfica do presente trabalho. Este tipo de modelo, como anteriormente mencionado e comprovado, estima concentrações de clorofila-a para qualquer valor ou variações da reflectância, independentemente se estes forem ocasionados por clorofila-a ou não (Figura 57) em qualquer comprimento de onda de 400 nm e 900 nm. Aqui deve ser lembrado que o referido tipo de modelo ainda hoje é utilizado e considerado para estimar clorofila-a em corpos de água do Caso II, a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral como exposto na revisão bibliográfica do presente trabalho.

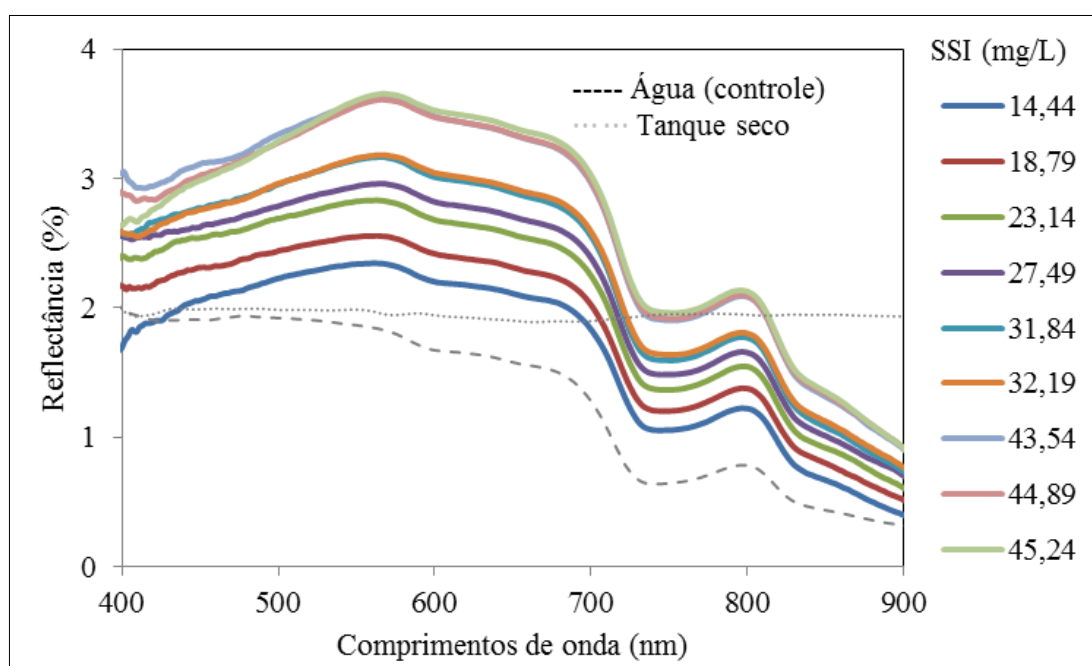


Figura 56: Espectros de reflectância da água contendo concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos (SSI). Estes dados se referem ao tratamento 5.

Nos resultados da Figura 57, os dados de reflectância sobre os quais o modelo foi aplicado foram coletados sobre águas que continham somente sólidos suspensos inorgânicos. As condições das águas quando o modelo foi aplicado eram conhecidas, ou seja, foram proporcionadas em laboratório, no entanto, demonstram o que pode ocorrer quando o referido tipo de modelo é aplicado para estimar clorofila-a sem as referências de campo (amostras), em corpos de água onde as variáveis opticamente ativas não covariam no tempo e espaço (PALMER et al., 2015), variam independentemente em pequenas áreas e em curtos períodos de tempo (FISCHER et al. 1986; SATHYENDRANATH et al. 1989), ou seja, não atendem ao princípio da *multicolinearidade* (WHITLOCK et al., 1982), requerido em regressões simples.

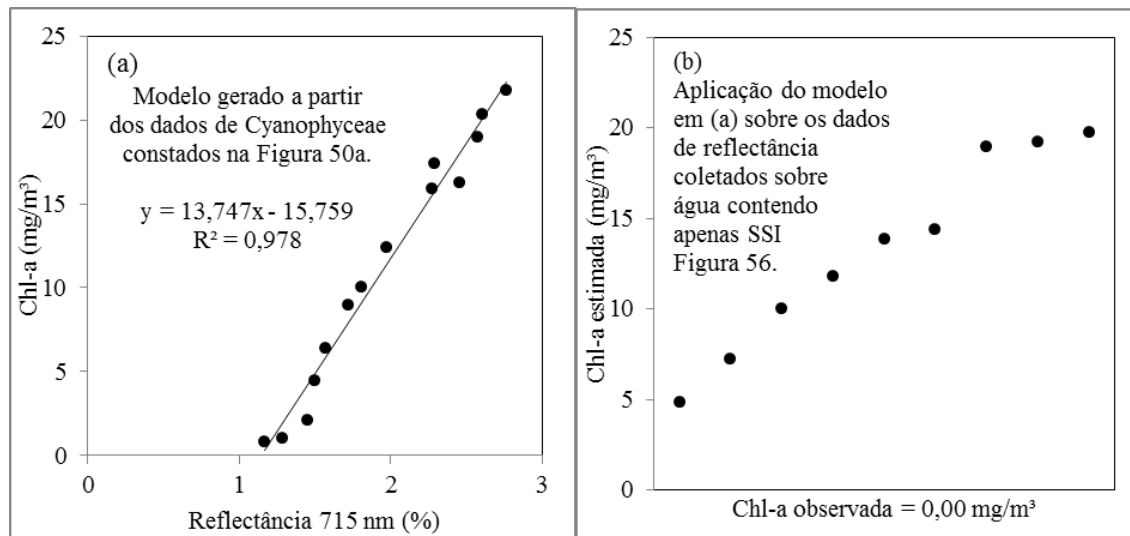


Figura 57: Aplicação do modelo gerado por análise de regressão simples a partir de dados coletados em água contendo somente organismos de Cyanophyceae (Figura 54a), sobre os dados de reflectância coletados em água contendo apenas sólidos suspensos inorgânicos (SSI) (Figura 56).

O que se espera de um modelo desenvolvido para estimar clorofila-a é, obviamente, que ele estime somente as concentrações deste pigmento, no entanto, para o modelo de regressão simples de uma única banda espectral, o que se verifica é que o mesmo recupera clorofila-a a partir dos efeitos sobre a reflectância, de qualquer componente opticamente ativo presente na água (Figura 57). Entende-se que um modelo desenvolvido para estimar clorofila-a deve, antes de tudo, compreender as condições das águas, reconhecer e decompor a reflectância devida aos distintos componentes ópticos para então derivar as concentrações de clorofila-a se elas estiverem presentes nas águas. Quando utilizamos modelos de regressão simples de uma única banda espectral para estimar clorofila-a, estamos considerando que no corpo de água ocorre apenas uma variável independente que afeta a reflectância, ou seja, somente a clorofila-a, o que é improvável, mesmo que na água contenha apenas fitoplâncton, o que foi demonstrado anteriormente neste trabalho.

A Figura 58 exhibe os dados de reflectância coletados sobre a água contendo uma concentração de clorofila-a constante e variadas concentrações de sólidos suspensos inorgânicos (SSI). A variação da reflectância foi proporcionada pelas variações de SSI, ou seja, para todos os espectros de reflectância a clorofila-a e os organismos de *Cyanophyceae* estavam presentes e participaram para a efetuação dos valores de reflectância em cada espectro de reflectância e comprimento de onda, no entanto, não proporcionaram variações dos mesmos, a não ser em relação ao espectro da própria água (Controle).

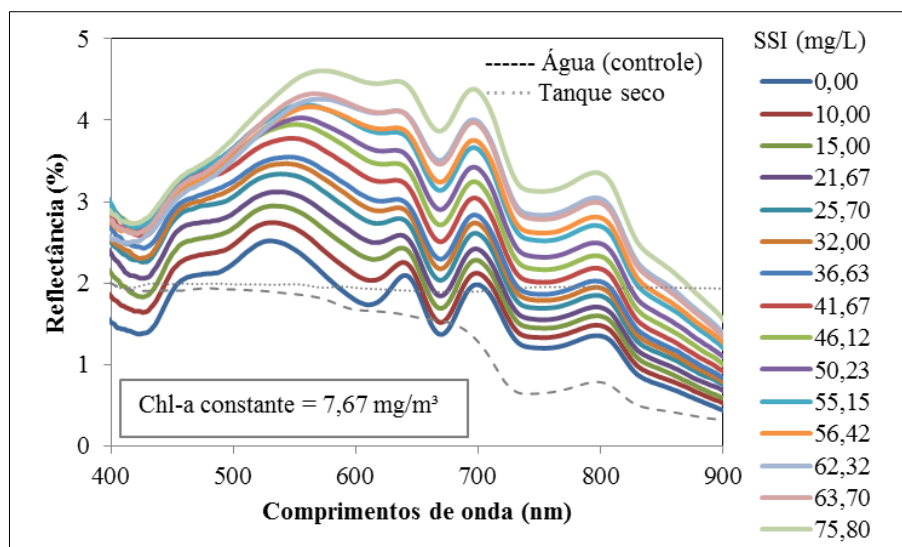


Figura 58: Espectros de reflectância da água contendo uma concentração constante de clorofila-a ($\text{Chl-a} = 7,67 \text{ mg/m}^3$) e concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos (SSI). Observe que nos centros de absorção pela clorofila-a das regiões do azul e vermelho, tem-se variação significativa da reflectância, o que não ocorreu para os dados constados na Figura 50a influenciados apenas por *Cyanophyceae*. Estes dados se referem ao tratamento 6.

Nos dados expostos na Figura 58, tem-se quinze espectros de reflectância, ou seja, têm-se quinze valores distintos de reflectância para a mesma concentração de clorofila-a em qualquer comprimento de onda de 400 nm a 900 nm, o que é condizente para com a análise dos resultados dos experimentos de Han et al. (1994) e Han (1997) realizada pelo autor do presente trabalho na revisão bibliográfica, sendo que os referidos autores não teceram nenhum comentário sobre os aspectos ressaltados neste trabalho. Neste contexto, os modelos para a estimativa das concentrações de clorofila-a, constados nas Figuras 54a, 54c e 54e, aplicados sobre os dados de reflectância constados na Figura 58, estimaram concentrações de clorofila-a não existentes (Figura 59), ou seja, a partir das variações da reflectância ocasionadas por sólidos suspensos inorgânicos (SSI), os modelos estimaram variações substanciais de clorofila-a.

Notadamente, o modelo de estimativa gerado a partir dos dados de *Cyanophyceae* da Figura 50a, constado nas Figuras 54a e 59a, realizou a estimativa correta da concentração de clorofila-a para o espectro de reflectância da Figura 58 não influenciado por SSI ($\text{SSI} = 0,0 \text{ mg/L}$), como pode ser verificado na Figura 59b. Isso ocorreu porque o componente opticamente ativo presente na água, era o mesmo que influenciou os dados utilizados para a geração do modelo, ou seja, somente *Cyanophyceae* ($\text{Chl-a} = 7,67 \text{ mg/m}^3$). No entanto, se este modelo tivesse sido desenvolvido a partir de dados de reflectância, influenciados pelos efeitos de outros organismos fitoplanctônicos, espectralmente distintos, erros de estimativa seriam verificados, o que é demonstrado pelos dados das Figuras 59c, 59d, 59e, 59f.

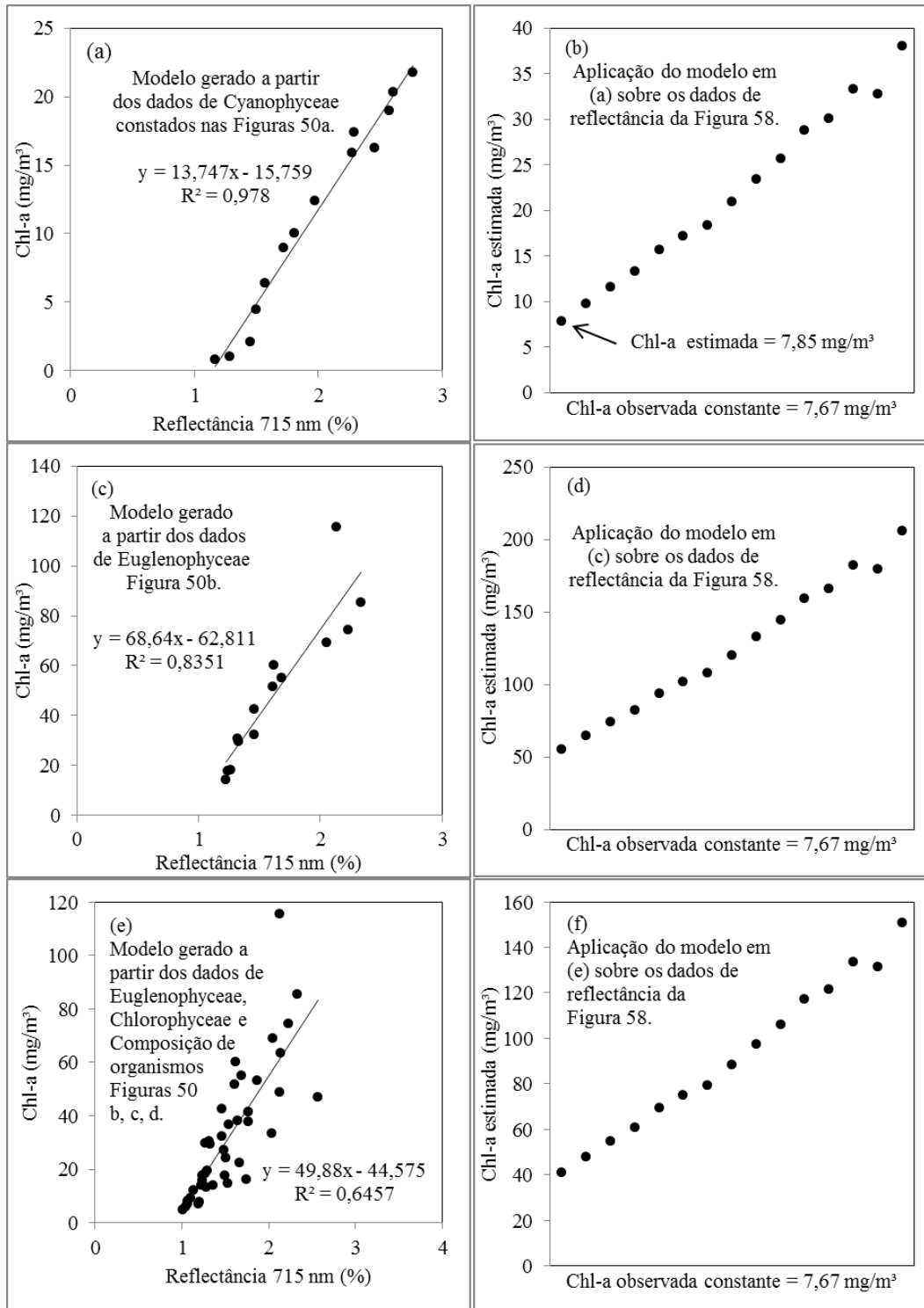


Figura 59: Regressões simples entre concentrações de clorofila-a e a reflectância (a;c;e) e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância da Figura 58, em 715 nm (b;d;f).

Apesar do modelo de estimativa da Figura 59a ter um dos melhores ajustes entre a clorofila-a e a reflectância em 715 nm ($R^2 = 0,978$), em comparação com os demais modelos da Figura 59, isso não significa que o mesmo pode ser aplicado em qualquer condição das águas, em termos de componentes opticamente ativos presentes nas mesmas, o que é

justificado pelas estimativas errôneas do mesmo sobre a reflectância dos espectros da Figura 58 como pode ser verificado na Figura 59b. Este modelo (Figura 59a) poderia ser aplicado para estimar clorofila-a, somente em casos onde a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a são semelhantes àquelas verificadas nos dados utilizados para a geração do modelo, ou seja, em princípio somente sobre águas, onde ocorre pelo menos o domínio de *Cyanophyceae* na composição da comunidade fitoplanctônica e sem a presença de sólidos inorgânicos em suspensão. No entanto, a obtenção dessas informações antes da aplicação do modelo, o que deve ser realizado remotamente para não descaracterizar o que é fundamental no sensoriamento remoto, é significativamente improvável, mesmo porque, se isso fosse possível, já teríamos modelos para estimar clorofila-a fitoplanctônica, o fato, é que não existem modelos aceitos.

O caso específico do modelo de estimativa gerado a partir dos dados de *Cyanophyceae* da Figura 50a e constado nas Figuras 54a e 59a permite dizer que um significativo ajuste entre a clorofila-a e a reflectância, no desenvolvimento de um modelo para estimativa da clorofila-a (Ex: $R^2 = 0,978$ – Figuras 54a e 59a), não significa que o mesmo será eficiente quando aplicado e que suas estimativas podem ser consideradas confiáveis sem as referências de campo. Estimativas corretas dependem da variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a quando o modelo for aplicado, o que pode variar significativamente no tempo e espaço dos corpos de água, como mencionado anteriormente neste trabalho, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton.

No referido tipo de modelo, abordado neste trabalho, não há nenhum termo ou coeficiente em sua equação, que considera os efeitos dos distintos componentes opticamente ativos sobre a reflectância, incluindo os diferentes organismos fitoplanctônicos. Neste sentido, verificar espectros de reflectância de imagens de sensores orbitais hiperespectrais, parece ser uma alternativa viável para ser realizada anteriormente à aplicação do modelo e saber sobre as condições das águas.

A partir de determinadas feições espectrais nos espectros de reflectância, pode-se ter alguma informação do tipo de partículas (clorofiladas ou não) que estão presentes nas águas e, além disso, a partir de dados históricos coletados em campo pode se realizar interpretações sazonais das partículas dominantes no corpo de água como realizaram Arraut et al. (2005) para o período de seca no Lago Grande de Curuai no Estado do Pará -Brasil. No entanto, mesmo com estes procedimentos e com a utilização de dados de sensores orbitais hiperespectrais, não tem como saber qual é a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a ou de qualquer outra partícula presente na água quando o

modelo for aplicado. Um exemplo disso são os dados de reflectância constados na Figura 60, coletados sobre águas contendo concentrações variadas de sólidos suspensos inorgânicos (SSI) e de clorofila-a, sendo estas referentes aos organismos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum* sp.).

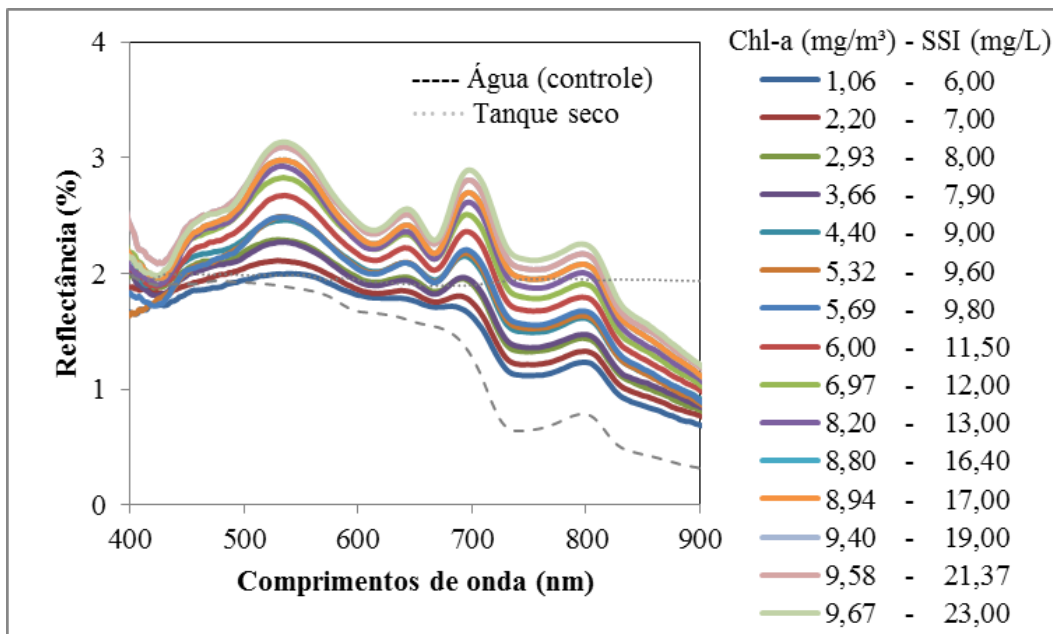


Figura 60: Espectros de reflectância de águas contendo concentrações variadas de clorofila-a de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum* sp.) e sólidos suspensos inorgânicos (SSI). Observe que nos centros de absorção pela clorofila-a das regiões do azul e vermelho, tem-se variação significativa da reflectância, o que não ocorreu para os dados constados na Figura 50a influenciados apenas por *Cyanophyceae*. Estes dados se referem ao tratamento 7.

A variação da reflectância nos dados da Figura 60 ocorreu devido ao efeito combinado das variáveis opticamente ativas distintas sobre a reflectância, em todos os comprimentos de onda de 400 nm a 900 nm. Na maioria dos espectros de reflectância da Figura 60, observando-os individualmente, não tem como saber sobre a presença de sólidos inorgânicos na água, a não ser naquele espectro referente à menor concentração de clorofila-a. Porém quando observamos os espectros de reflectância conjuntamente, algumas informações sobre a presença de sólidos inorgânicos podem ser obtidas neste caso específico, Figura 60, em que se conhecem os tipos e concentrações dos componentes ópticos presentes na água.

Neste sentido, tomando como referência os espectros de reflectância da Figura 50a, coletados sobre águas que continham apenas *Cyanophyceae*, e comparando os mesmos com os espectros de reflectância da Figura 60, verificamos que, nestes, a variação da reflectância nos centros de absorção pela clorofila-a, nas regiões do vermelho entre 650 nm e 700 nm e azul entre 400 nm e 450 nm, ocorreu de forma proeminente e positiva, o que indica a presença dos sólidos suspensos inorgânicos. Isso porque, nos dados da Figura 50a, nas regiões do vermelho e azul do espectro eletromagnético, os organismos de *Cyanophyceae* não

proporcionaram variações substanciais da reflectância para variações da clorofila-a até cerca de 21,0 mg/m³. Apesar disso, e considerando que na aplicação do modelo sem as referências de campo, as concentrações de sólidos suspensos inorgânicos, clorofila-a e, principalmente a composição da comunidade fitoplanctônica (qualitativa e quantitativa) são desconhecidos, não temos como saber se a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a são pelo menos semelhantes aquelas verificadas no desenvolvimento do modelo. Logo, não temos como saber se as estimativas estão corretas ou se pelo menos não extrapolam a faixa de erros estabelecida na validação do modelo, mesmo que o modelo seja aplicado para estimar clorofila-a nos pontos não amostrados na data ou datas, em que os dados foram coletados para o seu desenvolvimento.

Todos os modelos de estimativa constados nas Figuras 61a, 61c e 61e foram desenvolvidos a partir das relações de causa e efeito entre a reflectância de um determinado comprimento de onda e as concentrações de clorofila-a, ou seja, sempre a mesma variável independente, sempre os mesmos parâmetros. Porém, esta variável independente, a clorofila-a, estava contida em diferentes componentes ópticos, que proporcionaram distintos coeficientes angulares no desenvolvimento dos modelos, conseqüentemente estimativas da clorofila-a significativamente distintas foram verificadas, quando o modelo foi aplicado sobre as mesmas condições das águas no que refere aos componentes opticamente ativos.

Deve ser destacado que todos os modelos da Figura 61 foram desenvolvidos a partir da reflectância em 715 nm, em que tanto o fitoplâncton como os sólidos suspensos inorgânicos (SSI) refletem radiação. A reflectância da Figura 60, sobre a qual o modelo foi aplicado foi influenciada por organismos de *Cyanophyceae* e SSI, que proporcionaram variações positivas da reflectância em 715 nm. Neste sentido, os erros de estimativa verificados na Figura 61b, 61d e 61f ocorreram devido as distintas variações da reflectância ocasionadas pelos componentes opticamente ativos presentes na água, que influenciaram os dados utilizados no desenvolvimento dos modelos, não condizentes com a variação da reflectância proporcionada pelos componentes ópticos presentes na água sobre a qual os modelos foram aplicados, ou seja, SSI e *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*). Isso demonstra mais uma vez os efeitos dos distintos organismos fitoplanctônicos aqui estudados, ou seja, os distintos componentes opticamente ativos da água *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*), *Euglenophyceae* (*Euglena sp.*) e *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.*), além dos efeitos das partículas não clorofiladas inorgânicas, sobre a reflectância da água para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a.

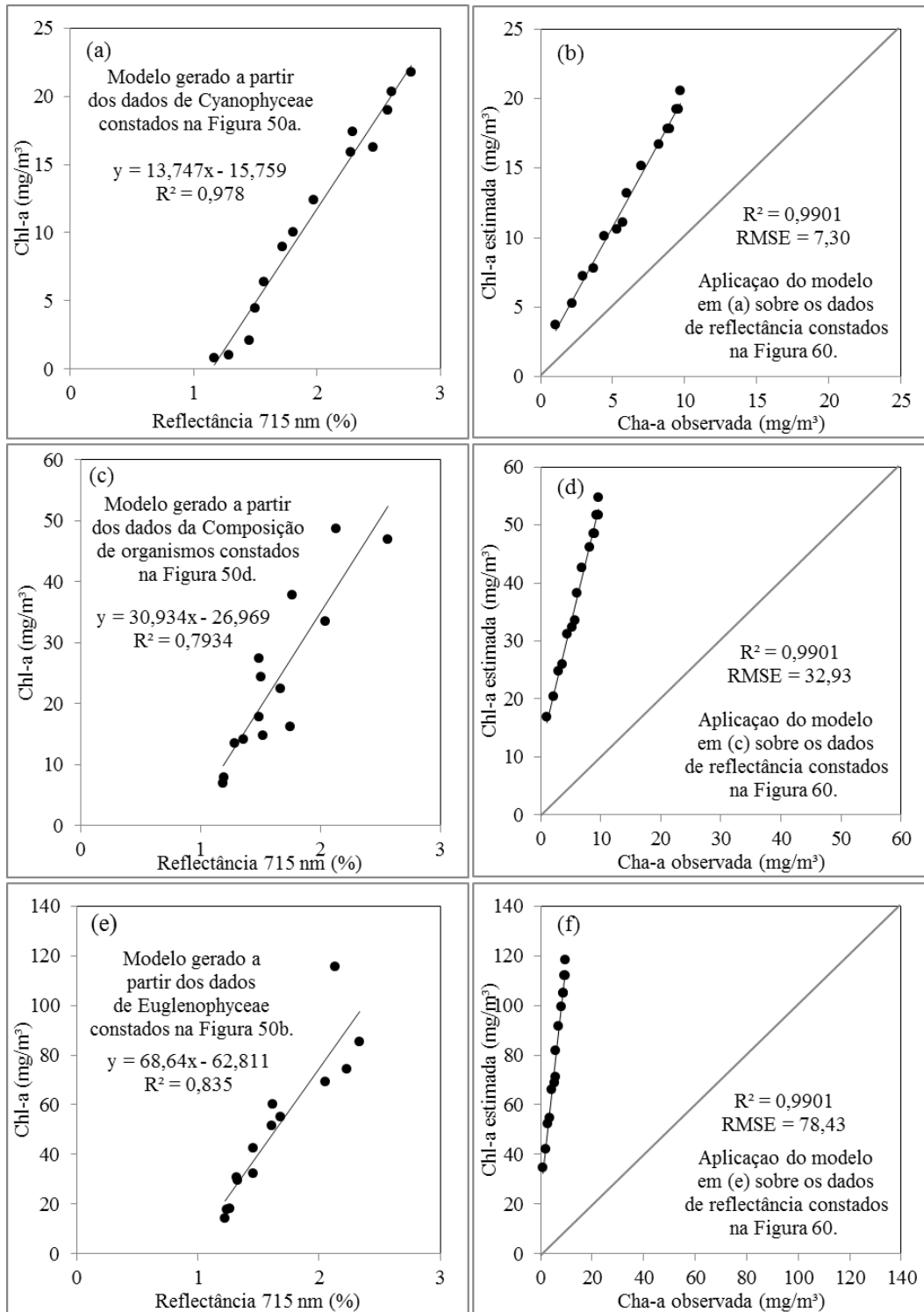


Figura 61: Regressões simples entre concentrações de clorofila-a e a reflectância (a;c;e) e a aplicação das equações de regressão para estimar clorofila-a a partir de dados de reflectância da Figura 60 em 715 nm (b;d;f).

Como mencionado anteriormente, desenvolver um modelo para estimativa das concentrações de clorofila-a por regressão simples, obtendo-se bons ajustes entre a reflectância de uma única banda espectral e a clorofila-a, é razoavelmente fácil se ocorrer covariação entre as variáveis consideradas na análise. No entanto, quando as variáveis não

mantem covariação, desenvolver um modelo com bom ajuste entre as variáveis é impraticável como será exemplificado com os dados da Figura 62, que foram coletados sobre diferentes condições das águas referentes aos componentes opticamente ativos neste trabalho avaliados.

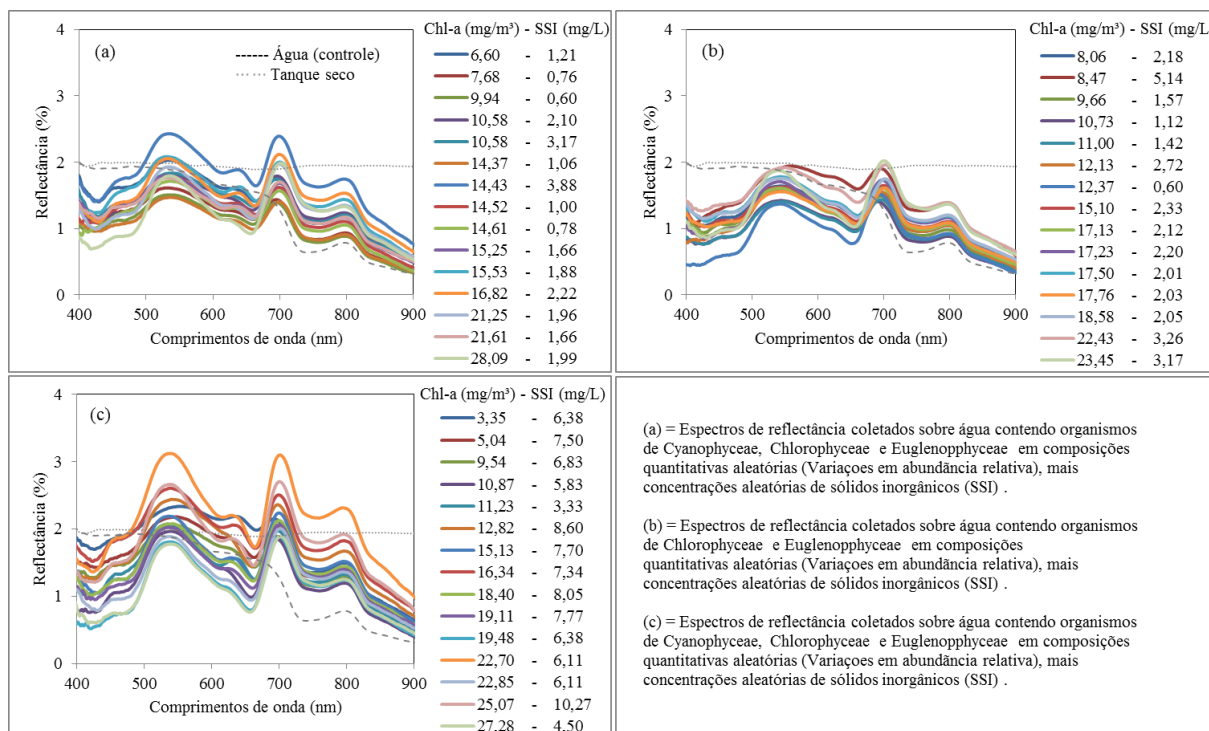


Figura 62: Espectros de reflectância coletados sobre diferentes condições da água, relacionadas às combinações de concentração dos componentes opticamente ativos. Estes dados se referem aos tratamentos 8, 9 e 10.

Todo o conjunto de dados constados na Figura 62, e os dados das Figuras 62a, 62b e 62c separadamente foram submetidos à análise de correlação, no que se refere à clorofila-a e reflectância (Figura 63). Verificou-se semelhança entre os coeficientes de correlação para os dados das Figuras 62a e 62c, que foram na totalidade dos comprimentos de onda mais baixos que aqueles verificados para os dados da Figura 62b. Isso ocorreu porque os dados das Figuras 62a e 62c foram influenciados pelos mesmos componentes opticamente ativos, ou seja, clorofila-a, sólidos suspensos inorgânicos, *Cyanophyceae*, *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae*. Por outro lado, quando um destes componentes opticamente ativos é excluído (*Cyanophyceae*), ou seja, não está presente na água, ocorre modificação nos dados e a reflectância varia diferentemente como é caso dos dados da Figura 62b, ou seja, outras combinações de componentes ópticos estão presentes na água e, dadas as suas características espectrais, proporcionaram coeficientes de correlação mais altos em todos os comprimentos de onda. Para os dados da Figura 62b, os componentes *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* são semelhantes (não iguais) em termos de suas influências na variação da reflectância em função

das variações nas concentrações de clorofila-a (Ambos promovem variações negativas da reflectância na região do visível e positivas na região do infravermelho próximo) e os sólidos inorgânicos não influenciaram de maneira substancial a reflectância, dadas as variações das suas concentrações (De um mínimo de 0,60 até um máximo de 5,14 mg/L, sendo a maioria inferiores a 3,26 mg/L), mas participaram para a variação da reflectância, ou seja, ocorreu, de maneira geral, o domínio dos componentes *Euglenophyceae* e *Chlorophyceae* que perfizeram as variações nas concentrações de clorofila-a e, portanto, a reflectância variou conforme os seus efeitos sobre a mesma e os ajustes com as concentrações de clorofila-a foram melhores.

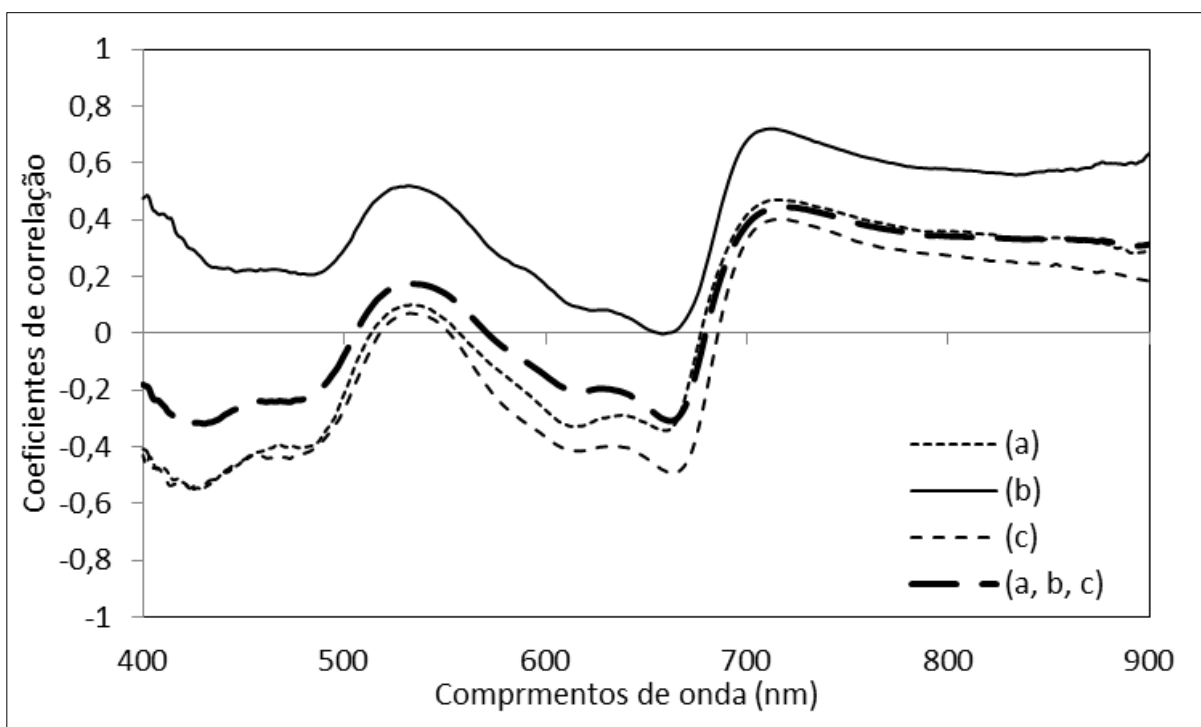


Figura 63: Correlação entre a reflectância dos comprimentos de onda da faixa de 400 nm a 900 nm coletados sobre diferentes condições das águas e as concentrações de clorofila-a verificadas nos dados das Figuras 62a (a), 62b (b), 62c (c) e para todo o conjunto de dados da Figura 62 (a, b, c).

Neste sentido, a não presença de *Cyanophyceae* nos dados da Figura 62b e a pouca influência dos sólidos inorgânicos proporcionaram melhores ajustes entre as variáveis para este caso em específico. No entanto, quando todo o conjunto de dados das Figuras 62a, 62b e 62c é considerado, os coeficientes de correlação se modificam mantendo certa semelhança com aqueles verificados para os dados das Figuras 62a e 62c. O efeito de *Cyanophyceae* nos dados das Figuras 62a e 62c e a presença de sólidos inorgânicos em maior concentração nos dados da Figura 62c, promoveram as variações da reflectância distintamente daquelas verificadas para a Figura 62b e, conseqüentemente, menores coeficientes de correlação são observados para todo o conjunto de dados (Figura 63).

Vejamos então a aplicação de um modelo de estimativa desenvolvido por regressão simples a partir da reflectância do comprimento de onda com melhor correlação com as concentrações de clorofila-a verificado na Figura 63 e referente aos dados constados na Figura 62b, conforme Figura 64. O comprimento de onda se trata daquele em 713 nm. As estimativas foram melhores na Figura 64b, porque para este caso os dados de reflectância sobre os quais o modelo foi aplicado tiveram menores influências de sólidos inorgânicos (Ver Figura 62a) e, mesmo assim, alguns erros de estimativa são observados. Nas estimativas constadas nas Figuras 64c e 64d, erros maiores foram verificados, devido a maior influência de sólidos inorgânicos em suspensão (Ver dados da Figura 62c) e das variações nas composições de organismos.

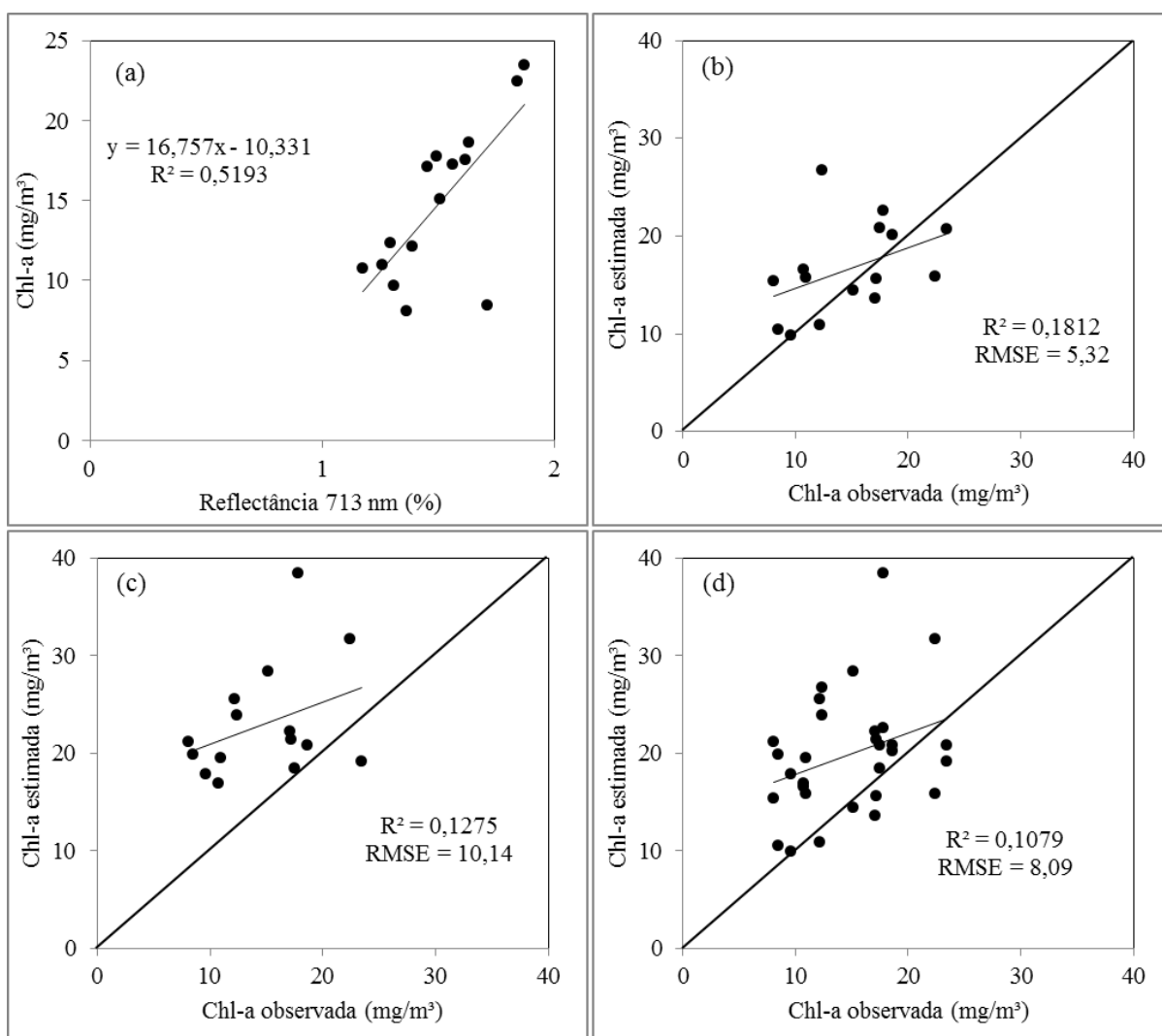


Figura 64: Estimativa das concentrações de clorofila-a sobre distintas condições das águas. (a) Regressão simples entre concentrações de clorofila-a e a reflectância dos dados constados na Figura 62b. (b, c) Aplicação da equação de regressão em (a) para estimar clorofila-a a partir dos dados de reflectância em 713 nm, constados nas Figuras 62a e 62c respectivamente. (d) Aplicação da equação de regressão em (a) para estimar clorofila-a a partir do conjunto de dados de reflectância em 713 nm, constados nas Figuras 62a e 62c.

Por fim, uma última avaliação foi realizada com base nos procedimentos metodológicos constados em Breunig et al. (2017) para o desenvolvimento de um modelo de estimativa das concentrações de clorofila-a a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral. Neste sentido, dos dados constados na Figura 62, 70% foram determinados aleatoriamente e utilizados para a realização de uma análise de correlação (Figura 65) e posteriormente para desenvolver um modelo de estimativa das concentrações de clorofila-a por regressão simples (Figura 66a). Os demais 30% dos dados foram reservados para a validação do modelo (Figura 66b).

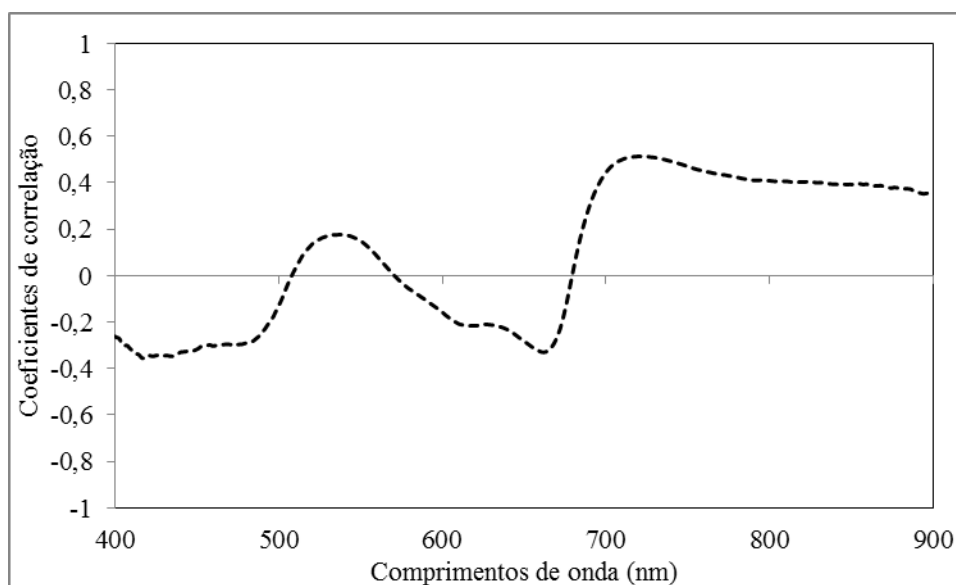


Figura 65: Correlação entre clorofila-a e reflectância em diferentes condições das águas. O correlograma se refere a 70% dos dados de reflectância e clorofila-a, selecionados aleatoriamente nos dados constados na Figura 62.

Considerou-se o maior coeficiente de correlação obtido para a análise de regressão simples, sendo este para o comprimento de onda de 721 nm, conforme correlograma da Figura 65. A clorofila-a explicou não mais de 26,27% da variação da reflectância em 721 nm (Figura 66a), portanto, é um coeficiente de determinação (R^2) muito baixo e, além disso, na validação ocorreram erros de estimativa (Figura 66b) o que é expresso pelo erro médio quadrático (RMSE).

Por outro lado, a grande maioria das concentrações de clorofila-a estimadas está dentro do contexto das concentrações de clorofila-a observadas (entre mínima e máxima concentração) e quando as mesmas são verificadas pelas suas médias, estas não destoam em grande magnitude (Figuras 66b). Isso ocorreu porque os dados utilizados para a validação do modelo inserem-se no contexto (Entre o mínimo e máximo valores de ambas as variáveis) dos

dados utilizados para o desenvolvimento do mesmo, e este não estima concentrações de clorofila-a fora de seu universo de dados. Os valores de reflectância e as concentrações de clorofila-a sobre a qual o modelo foi aplicado (30% dos dados da Figura 66b) não extrapolaram os limites máximo e mínimo do banco de dados utilizado no desenvolvimento do modelo (70% dos dados da Figura 62) e, sendo assim, tanto as estimativas como os erros de estimativa obedeceram aos referidos limites.

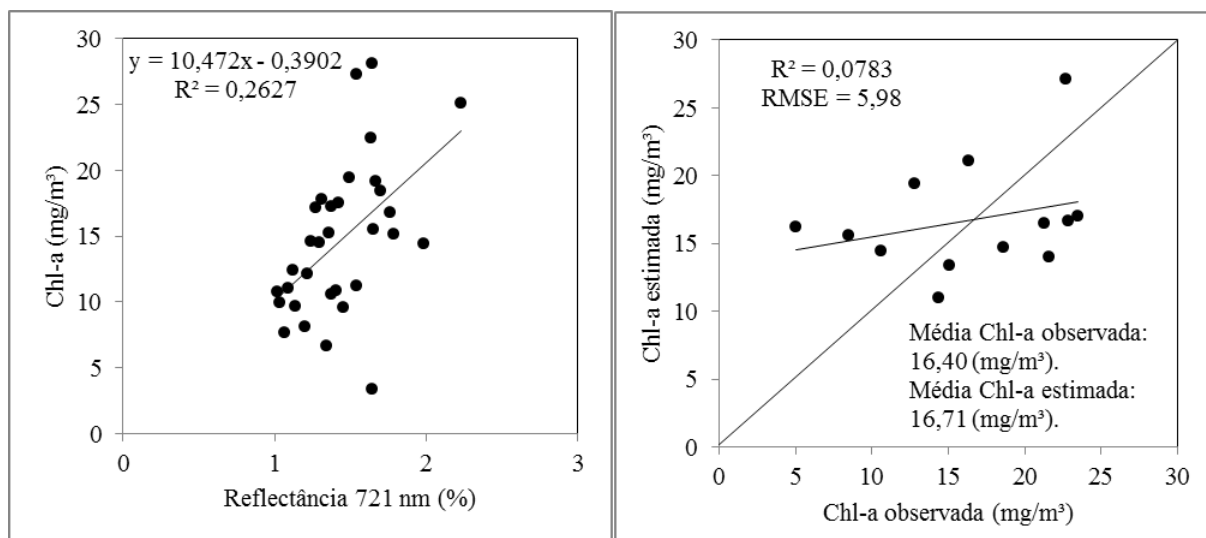


Figura 66: Estimativa das concentrações de clorofila-a sobre distintas condições das águas. Regressão simples entre concentrações de clorofila-a e a reflectância considerando 70% dos dados constados na Figura 62 e a aplicação da equação de regressão para estimar clorofila-a a partir dos demais 30% de dados de reflectância (721 nm) da Figura 62.

O modelo pode ser aplicado somente sobre dados que obedecem aos seus limites. No entanto, apenas os limites referentes à reflectância podem ser verificados anteriormente a aplicação do modelo. Sem as referências de campo, as variações nas concentrações de clorofila-a serão desconhecidas e mesmo com as referências de campo, estas devem cobrir toda a variabilidade óptica do corpo de água, o que significa saber sobre todos os componentes ópticos presentes no mesmo, incluindo a composição da comunidade fitoplanctônica. Como verificado anteriormente, nos dados coletados sobre os organismos fitoplanctônicos isolados, a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a são muito distintas.

Em campo, devemos contar com muitos outros distintos componentes ópticos, além daqueles aqui avaliados e quando se utiliza o referido tipo de modelo, de uma única banda espectral desenvolvido por regressão simples, o que verificamos se trata de um jogo de números de reflectância, influenciados pelas combinações destes muitos outros componentes,

que variam em concentrações no tempo e espaço dos corpos de água, variam independentemente em pequenas áreas e em curtos períodos de tempo (FISCHER et al. 1986; SATHYENDRANATH et al. 1989; PALMER et al., 2015), e que podem permitir ou não estimativas corretas, o que não temos como saber sem as referências de campo para cada valor de reflectância inserido no modelo, quando este for aplicado. Não temos como saber de maneira confiável antes da aplicação do modelo quem ou quais são os componentes ópticos que estão influenciando as variações da reflectância no corpo de água e, principalmente, como a reflectância está variando em função das variações nas concentrações de clorofila-a, sendo esta na verdade, a única informação almejada no desenvolvimento de modelos de estimativa de uma única banda espectral em regressões simples. Um coeficiente de determinação alto não significa que a clorofila-a está dominando as águas ou que a clorofila está explicando a variação da reflectância, apenas significa que as variáveis se ajustaram proeminentemente e nada mais, mesmo porque a variação proeminente da reflectância pode ser devido ao efeito de outros componentes opticamente ativos como foi demonstrado no presente trabalho.

Como dito anteriormente, não há um único comprimento de onda que é influenciado somente por clorofila-a, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton. Portanto, de acordo com os experimentos, dados coletados e as análises de correlação, regressão simples e o erro quadrático médio aplicados neste trabalho, os modelos de uma única banda espectral desenvolvidos por regressão simples, não são adequados para estimar remotamente a clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água. São aplicáveis somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente (DOWNING & CLARK, 2007). As referências de campo são fundamentais para os estudos que visam o desenvolvimento de modelos de estimativa remota das concentrações de clorofila-a e a verificação das relações de causa e efeito entre a reflectância e os componentes ópticos da água. No entanto, é necessária a obtenção de referências espectrais que possibilitem maiores certezas nas estimativas remotas.

Quando um modelo de regressão simples é aplicado para estimar clorofila-a fitoplanctônica, dado o pré-requisito de aplicação desta técnica estatística, aqui referenciado em Downing & Clark (2007), está se dizendo que no corpo de água ocorre apenas clorofila-a e nada mais, ou seja, apenas a molécula de clorofila-a, mesmo porque, se os diferentes organismos fitoplanctônicos estiverem presentes nas águas, não podemos aplicar regressão simples, porque assim verificamos mais de um componente opticamente ativo, ou melhor, mais de uma variável independente que não covariam no tempo e espaço do corpo de água, como foi demonstrado no presente trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Antes de adentrar nas considerações finais referentes às análises espectrais propriamente ditas e salientar sobre a comprovação das hipóteses do presente trabalho, farei algumas menções a cerca dos cultivos de fitoplâncton que apesar de terem sido almejados para a obtenção dos principais alvos de interesse desta pesquisa, ou seja, o fitoplâncton e clorofila-a fitoplanctônica, proporcionaram uma riqueza de informações que em outras situações como, por exemplo, em coletas de dados em campo, muito provavelmente não seriam obtidas. Porém, essas informações tomam maior relevância neste trabalho, quando relacionadas às pesquisas em sensoriamento remoto das águas.

Observar os organismos fitoplanctônicos em desenvolvimento, acompanhando no tempo os aumentos nas concentrações de clorofila-a, poderia ser uma atividade obrigatória para quem objetiva relacionar a clorofila-a fitoplanctônica com a reflectância de imagens de sensores remotos orbitais. Em condições adequadas do meio, como os de cultivo experimentados no presente trabalho, determinados organismos desenvolvem-se muito rapidamente, praticamente dobrando as concentrações de clorofila-a em períodos de vinte e quatro horas. Isso recai sobre o que ainda na década de mil novecentos e setenta foi relatado por cientistas como sendo a causa de erros nas análises dos dados coletados, ou seja, a falta de sincronia entre a coleta de dados em campo e a passagem do satélite. Naquele período, os cientistas enfatizaram a importância e implicações sobre a referida falta de sincronia, principalmente nos casos em que o foco do trabalho se tratava das análises de correlação entre clorofila e reflectância do sensor orbital. Neste contexto, os pesquisadores relataram erros nas análises dos dados, devido a defasagens de apenas duas horas entre passagem do satélite e coleta de dados em campo.

Os organismos cultivados para o presente trabalho estão em cultivo por mais de dois anos e meio e foram observados quase que diariamente neste período, seja em microscópio, nas determinações das concentrações de clorofila, na manutenção dos cultivos com repicagens e limpeza dos recipientes de cultivo. Este contato quase diário com os organismos, verificando suas necessidades nutricionais e ambientais de desenvolvimento, permitiu constatar a importância de o próprio pesquisador ou autor do trabalho em sensoriamento remoto, realizar as atividades de coleta de dados, que no caso foram às práticas de cultivo, ou seja, desenvolver e observar o alvo de sensoriamento remoto de interesse para saber mais sobre suas características.

Com algumas poucas observações dos organismos fitoplanctônicos em microscópio percebe-se suas diferenças, principalmente no que se refere a suas morfologias. Seus diferenciados tamanhos são referenciados como protagonistas de distintos efeitos sobre dados de sensoriamento remoto e nos dias atuais considerados em modelos de estimativa das concentrações de clorofila. Os efeitos dos organismos de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.* Azevedo e Sant'Anna 2003), *Euglenophyceae* (*Euglena sp.* Ehrenberg 1830) e *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.* Meyen 1829) sobre a radiação eletromagnética incidente foram visíveis. As diferentes colorações dos seus produtos da degradação e pigmentação ressaltaram suas diferenças espectrais antes mesmo de observar seus espectros de reflectância isoladamente, demonstrando a importância de considerá-los separadamente nas análises em sensoriamento remoto das águas. Estas diferenças são em grande parte a causa de erros de estimativa das concentrações de clorofila, principalmente quando modelos de uma única banda por regressão simples são utilizados, como será ressaltado no item a seguir.

6.1 Análises espectrais

O presente trabalho questionou a adequabilidade de modelos empíricos desenvolvidos por análise de regressão simples para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral e neste contexto o fitoplâncton como um único componente opticamente ativo da água.

Disse nas hipóteses sobre os modelos de uma única banda espectral e fitoplâncton: “Um modelo empírico desenvolvido por análise de regressão simples para a estimativa remota das concentrações de clorofila-a, a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral estimará concentrações de clorofila-a para qualquer valor ou variações da reflectância da água, independentemente se os mesmos forem ocasionados por clorofila-a ou não e, portanto, são inadequados para estimar remotamente as concentrações de clorofila-a mesmo em águas dominadas por fitoplâncton, porque organismos fitoplanctônicos de diferentes classificações podem promover variações distintas e inversas da reflectância em função das variações de suas concentrações de clorofila-a e serem considerados distintos componentes opticamente ativos das águas”.

Os resultados do presente trabalho permitiram a aceitação das hipóteses. Os modelos empíricos de uma única banda espectral, desenvolvidos por regressão simples estimam concentrações de clorofila-a mesmo quando alimentados com dados de reflectância coletados sobre a água contendo apenas sólidos suspensos inorgânicos. Isso ocorre porque a esse tipo de

modelo apenas uma informação é atrelada, a de que a reflectância da água varia em função das concentrações de clorofila-a e somente isso, independentemente da presença ou não de outros componentes opticamente ativos que proporcionam variações da reflectância, ou seja, este tipo de modelo não contém em sua equação, nenhum coeficiente ou termo que proporcione a discriminação dos valores de reflectância em suas partes referentes aos efeitos dos componentes opticamente ativos presentes nas águas.

Quando utilizamos modelos de regressão simples de uma única banda espectral para estimar clorofila-a, estamos considerando que no corpo de água ocorre apenas uma variável independente que afeta a variável dependente reflectância, ou seja, somente a clorofila-a, o que é improvável, mesmo que na água contenha apenas fitoplâncton, o que foi comprovado neste trabalho, em qualquer comprimento de onda das regiões do visível e infravermelho próximo. Quando aplicamos este tipo de modelo sem as referências de campo, visando a estimativa remota da clorofila-a fitoplanctônica nos pontos não amostrados sobre o corpo de água, mesmo nas datas em que os dados utilizados para o desenvolvimento do modelo foram coletados, erros de estimativa podem ocorrer, simplesmente porque não temos como saber sobre as variações da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a nos pontos não amostrados.

A clorofila-a participa para a efetuação dos valores de reflectância e variações da mesma, no entanto, não os domina, mesmo que não água contiver apenas fitoplâncton, o que é explicado pelas variações inversas da reflectância em relação às variações nas concentrações de clorofila-a na região do visível do espectro eletromagnético, proporcionadas pelos distintos organismos fitoplanctônicos estudados no presente trabalho. O espalhamento da radiação na região do infravermelho próximo também foi distinto para os organismos fitoplanctônicos aqui estudados, o que muito provavelmente ocorreu devido às diferentes formas e tamanhos de suas células.

Devido às variações distintas da variável dependente (reflectância) nas regiões do visível e infravermelho próximo, em função das variações na variável independente (clorofila-a), pode-se dizer que a reflectância analisada neste trabalho, variou em função de pelo menos mais três distintas variáveis independentes, além da clorofila-a e dos sólidos suspensos inorgânicos, das quais apenas a clorofila-a foi extraída e que se tratam das partículas clorofiladas de *Cyanophyceae* (*Sphaerocavum sp.*), *Euglenophyceae* (*Euglena sp.*) e *Chlorophyceae* (*Scenedesmus sp.*). O efeito combinado destes três organismos, em variações de abundância relativa, sobre a reflectância da água pode ser entendido como outra variável

independente, que varia no tempo e espaço dos corpos de água promovendo distintos sinais compostos da reflectância, inclusive para concentrações de clorofila-a semelhantes.

As variações distintas e inversas da reflectância nas regiões do infravermelho próximo e visível, respectivamente, em função das variações nas concentrações de clorofila-a, demonstraram os organismos fitoplanctônicos como distintos componentes opticamente ativos das águas. Apenas uma variação quantitativa na composição da comunidade fitoplanctônica em termos de abundância relativa entre os organismos, é o suficiente para proporcionar erros de estimativa remota das concentrações de clorofila-a se um modelo de uma única banda espectral desenvolvido por regressão simples for aplicado.

O problema para a estimativa remota da clorofila reside nas condições das águas quando o modelo é aplicado, ou seja, quando não se sabe qual ou quais os componentes opticamente ativos estão influenciando e promovendo variações da reflectância no corpo de água, incluindo os organismos fitoplanctônicos. Quando não se sabe sobre a variação da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a antes da aplicação do modelo. Porém, se o objetivo é apenas verificar o comprimento de onda com melhor correlação com as concentrações de clorofila-a, devo salientar que a depender dos tipos de organismos presentes na água, a clorofila-a se correlaciona fortemente com qualquer comprimento de onda entre 400 nm e 900 nm, o que foi verificado quando os organismos foram avaliados isoladamente no presente trabalho.

As referências de campo são fundamentais para a verificação das relações de causa e efeito entre a reflectância e os componentes ópticos da água, logo são úteis nos estudos que visam o desenvolvimento de modelos de estimativa remota das concentrações de clorofila-a fitoplanctônica. No entanto, no contexto da aplicação de modelos de regressão simples para estimar clorofila-a fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral, devo salientar que os coeficientes angulares não são referências confiáveis para estimarmos remotamente a clorofila-a fitoplanctônica, porque eles variam constantemente em um corpo de água e não temos como saber antes da aplicação do modelo qual o coeficiente correto a ser utilizado.

Ao aplicarmos o modelo de regressão simples, o coeficiente angular entre a clorofila-a fitoplanctônica e a reflectância de um determinado comprimento de onda, da equação de regressão desenvolvida, pode não ser compatível com o coeficiente angular que está ocorrendo em campo, ou seja, no corpo de água e não temos como saber sobre isso, remotamente, antes da aplicação do modelo. O coeficiente angular, entre a clorofila-a fitoplanctônica e a reflectância de um determinado comprimento de onda, está em constante

variação no corpo de água, justamente devido às variações em concentração dos variados componentes opticamente ativos, incluindo os espectralmente distintos organismos fitoplanctônicos como demonstrou o presente trabalho e, na equação de regressão, o coeficiente é constante o que não condiz com a realidade observada em campo, ou seja, para cada condição das águas um novo modelo deve ser desenvolvido se a regressão simples for aplicada. Em outras palavras, para cada condição das águas, em termos de combinação de concentração dos diferentes componentes ópticos que, aliás, não covariam no tempo e espaço, um novo coeficiente angular pode ser obtido entre clorofila-a e reflectância.

Não podemos estimar um coeficiente angular (regressão simples) aceitável entre a clorofila-a fitoplanctônica e a reflectância de um dado comprimento de onda, quando coletamos os dados em campo, mas podemos estimar um coeficiente angular aceitável ou mesmo confiável entre a reflectância de um dado comprimento de onda e a clorofila-a de um determinado organismo fitoplanctônico se o isolarmos e controlarmos as variáveis como foi realizado no presente trabalho. Porém, não podemos aplicar tal coeficiente em um corpo de água qualquer, simplesmente porque não temos como saber remotamente quais os organismos que compõe a comunidade fitoplanctônica ou que estão presentes no corpo de água, antes de aplicar tal coeficiente, mas se mesmo assim o aplicarmos, as incertezas sobre as estimativas serão maximizadas, devido ao fato comprovado no presente trabalho de que os distintos organismos fitoplanctônicos promovem diferentes coeficientes angulares entre suas concentrações de clorofila-a e a reflectância de um dado comprimento de onda, sem contar os efeitos dos demais componentes opticamente ativos sobre a reflectância. É necessária a obtenção de referências espectrais confiáveis que possibilitem maiores certezas nas estimativas remotas, isso para não descaracterizar o ato fundamental em sensoriamento remoto, ou seja, o ato de obter dados e informações de um alvo, no caso as concentrações de clorofila-a, sem entrar em contato com o mesmo.

Em síntese, de acordo com os experimentos, dados coletados e as análises de correlação, regressão simples e o erro quadrático médio aplicados no presente trabalho, os modelos empíricos de uma única banda espectral, desenvolvidos por regressão simples podem estimar erroneamente as concentrações de clorofila-a, mesmo que na água estiver apenas fitoplâncton, porque os organismos fitoplanctônicos cultivados promoveram variações distintas e inversas da reflectância em função das variações nas concentrações de clorofila-a e podem ser considerados distintos componentes opticamente ativos das águas. Na presença de sólidos suspensos inorgânicos, os erros de estimativa podem ser ainda maiores, porque os efeitos aditivos desse componente sobre a variação da reflectância da água, não são subtraídos

pelo modelo, mas sim considerados como sendo ocasionados por clorofila-a, aliás, os efeitos dos sólidos inorgânicos ocorrem em toda a faixa entre 400 nm e 900 nm sem excessão em relação a comprimentos de onda específicos. Portanto, os modelos empíricos desenvolvidos por regressão simples a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral são inadequados para estimar clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água, mesmo porque, não há um único comprimento de onda das regiões de visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético que seja afetado somente pela variável independente clorofila-a, mesmo que na água contiver apenas fitoplâncton. Estes modelos são aplicáveis somente quando uma única variável independente afeta a variável dependente e se aplicados sem as referências de campo, as incertezas sobre as estimativas são maximizadas.

6.2 Considerações relacionadas à finalidade da pesquisa

Este trabalho comprovou a inadequabilidade dos modelos de uma única banda para estimar clorofila-a fitoplanctônica e, além disso, comprovou que organismos que compõe o fitoplâncton podem ser considerados componentes opticamente ativos distintos das águas. Neste contexto, cabe reforçar o que justificou comprovar a inadequabilidade dos referidos modelos, ou seja, explanar sobre a finalidade do presente trabalho e nessas considerações, levantar alguns questionamentos.

Em primeiro lugar, devo destacar que os modelos apresentados nos resultados e discussão foram desenvolvidos e aplicados somente para demonstrar e comprovar a inadequabilidade da modelagem por regressão simples, visando à estimativa remota da clorofila-a fitoplanctônica a partir da reflectância de uma única banda espectral. Estes modelos, portanto, não são úteis para estimar clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água, nem mesmo em águas dominadas por fitoplâncton, aliás, de acordo com o que foi verificado nos resultados do presente trabalho, nenhum modelo de regressão simples que considera uma única banda espectral é útil para estimar remotamente a clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água.

Em uma tentativa de contextualizar a importância da busca por modelos de estimativa remota das concentrações de clorofila-a com base no que foi visto nas pesquisas bibliográficas, devo dizer que as concentrações deste tipo de pigmento são requeridas há muitas décadas para a verificação da qualidade das águas, por exemplo, a partir do Índice de Estado Trófico de Carlson (1977). Dados históricos desta variável e coletas sistemáticas

satisfatórias, cobrindo toda a variabilidade espacial e temporal dos corpos de água não existem, porém é uma necessidade, haja vista a sua importância.

Com o advento do sensoriamento remoto, as expectativas no que se refere à discriminação e estimativa dos componentes das águas, embasaram o desenvolvimento de inúmeros trabalhos de pesquisa, dentre os quais aqueles que objetivaram a estimativa remota das concentrações de clorofila fitoplanctônica. A estimativa desta variável a partir de dados de reflectância de sensores orbitais, então se torna atrativa, devido às possibilidades que se apresentavam, principalmente frente aos novos sensores remotos orbitais desenvolvidos e à utilização de modelos de fácil desenvolvimento e aplicação, como é o caso dos modelos empíricos de uma única banda desenvolvidos por regressão simples.

Por outro lado, ao passo que as expectativas aumentavam em trabalhos de pesquisa no decorrer do desenvolvimento do sensoriamento remoto, as contradições referentes à aplicabilidade de tais modelos (modelos de uma banda por regressão simples) desenhavam-se, em alguns casos nos próprios resultados dos trabalhos publicados. Os resultados de trabalhos de pesquisa em sensoriamento remoto, mesmo aqueles que não se utilizaram da regressão simples e nem mesmo, em vários casos, objetivaram a estimativa remota das concentrações de clorofila, demonstravam claramente que a estimativa remota deste tipo de pigmento fitoplanctônico está em outra direção que não a aplicação de modelos de regressão simples de uma única banda, aliás, está em uma direção ainda não bem compreendida, apesar de todas as técnicas aplicadas ou tentadas para o propósito de estimar remotamente a clorofila.

Nos mais de cinquenta anos de desenvolvimento do sensoriamento remoto e de outras ciências, como a Geografia que se utiliza de técnicas de sensoriamento remoto em suas pesquisas, inclusive para estimar remotamente a clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água, nenhum modelo por regressão simples a partir da reflectância de uma única banda espectral é tido como adequado para uso, ou seja, não foram eficazes em seu propósito. Se os modelos de regressão simples fossem adequados para estimar clorofila fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral e dadas às facilidades de desenvolvimento e aplicação desse tipo de modelo, além do fato de termos imagens de reflectância de sensores orbitais disponíveis gratuitamente, deveríamos ter suprido todo o déficit espacial e temporal de dados históricos associados às concentrações deste tipo de pigmento fitoplanctônico, em todos os reservatórios brasileiros a partir de estimativas, mesmo porque estes modelos são conhecidos há décadas. Estes dados poderiam estar sendo utilizados por várias áreas das ciências para a verificação da qualidade das águas em longas séries temporais de imagens de sensores orbitais. E se as imagens de satélite disponíveis não são

adequadas para o propósito de estimar clorofila em corpos de água, pelo menos poderíamos ter como aceitável um modelo de regressão simples desenvolvido a partir de dados de reflectância de uma única banda coletados por espectrorradiômetros, ou seja, dados hiperespectrais. Isso ocorreu? Simplesmente não. Então porque estes modelos ainda estão sendo desenvolvidos? Devo dizer que somente estes questionamentos justificaram a realização do presente trabalho.

Tem-se mais de cinquenta anos de desenvolvimento do sensoriamento remoto e apesar dos vários modelos desenvolvidos em trabalhos de pesquisa, onde estão os vastos bancos de dados de clorofila-a fitoplanctônica estimada em corpos de água? Simplesmente não existem e por uma única razão, as estimativas não são confiáveis, principalmente se os modelos utilizados foram àqueles desenvolvidos por regressão simples e com a utilização da reflectância de uma única banda espectral, como foi comprovado no presente trabalho. Um alto coeficiente de determinação entre clorofila-a e a reflectância não significa que o modelo é ótimo para estimar remotamente a clorofila e isso em qualquer comprimento de onda entre 400 nm e 900 nm e, além disso, um alto coeficiente de determinação entre clorofila-a estimada e observada não significa que as estimativas são confiáveis, como foi demonstrado no presente trabalho.

Desenvolver, uma equação de regressão simples para estimar clorofila-a fitoplanctônica a partir de dados de reflectância de uma única banda espectral é extremamente fácil. No entanto, com este tipo de modelo, obter estimativas confiáveis das concentrações de clorofila sem a necessidade de contato com o alvo é extremamente improvável, exatamente o que o presente trabalho demonstrou e comprovou.

Por fim, devo dizer que este foi o meu primeiro trabalho em sensoriamento remoto das águas, mas mesmo assim me permito salientar que ainda há muito a se descobrir para que possamos realmente estimar remotamente a clorofila-a fitoplanctônica em corpos de água, principalmente do Caso II, ou seja, para obtermos estimativas remotas confiáveis e sem a necessidade de referências de campo o que caracteriza fundamentalmente o sensoriamento remoto. Precisamos de referências espectrais confiáveis para diminuir as incertezas sobre as estimativas.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, S. **Principles of remote sensing. In : Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology.** Proceedings of a Training Workshop held 7-11 July 2003 in Dehra Dun (India), AGM-8, WMO/TD-No. 1182, 423p, 2004.
- AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE SANTA MARIA – SANTA MARIA EM DADOS. Território e Meio Ambiente, Meio Ambiente, Mapa de Solos do Município de Santa Maria, 2019. Disponível em: <http://santamariaemdados.com.br/2-territorio-e-meio-ambiente/2-2-meio-ambiente/>. Acesso em setembro de 2019.
- AGUIRRE-HERNÁNDEZ, E.; GAXIOLA-CASTROA, G.; NÁJERA-MARTÍNEZA, S.; BAUMGARTNER, T.; KAHRU, M.; MITCHELL, B.G. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: summer and autumn 1998. **Deep-Sea Research II**, v. 51, p. 799–816, 2004.
- ALVAIN, S.; MOULIN, C.; DANDONNEAU, Y.; BRÉON, F. M. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, 52(11), 1989–2004, 2005.
- ANDERSEN, R. A.; KAWACHI, M. Traditional Microalgae Isolation Techniques. In. ANDERSEN, R. A. **Algal Culturing Techniques.** Phycological Society of America. San Diego, Elsevier, 589p. 2005.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística.** São Leopoldo: UNISINOS, 165 p. Biblioteca(s): Embrapa Meio Ambiente, 2003.
- APHA - American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. 20 ed. Springfield: Byrd Prepress, 1998.
- ARRAUT, E. M.; RUDORFF, C. M.; BARBOSA, C. C. F.; CARVALHO, J. C.; PEREIRA FILO, W.; NOVO, E. M. L. M. Estudo do comportamento espectral da clorofila e dos sólidos em suspensão nas águas do Lago Grande de Curuai (Pará), na época da seca, através de técnicas de espectroscopia de campo. In: Anais XII **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** Goiânia. São José dos Campos: INPE, 2005.
- AZEVEDO, M. T. P.; SANT'ANNA, C. L. Sphaerocavum brasiliense, a new planktic genus and species of Cyanobacteria from reservoirs of São Paulo State, Brazil. **Algological Studies.** 109:79-92, 2003.
- BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; CARVALHO, J. C.; FILHO, W. P.; MANTOVANI, J. E. Caracterização espectral das massas d'água amazônicas. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,** Belo Horizonte, 2003.
- BAZÁN, R., N. LARROSA, A. COSSAVELLA, F. MONARDE, S. OVIEDO ZABALA, A. RODRÍ- GUEZ & F. BUSSO. Mortandad de peces en el embalse Los Molinos asociados a florecimientos de Ceratium hirundinella. Instituto Superior de Investigación y Servicios de

Recursos Hídricos- UNC. **Dirección Provincial de Agua y Saneamiento**. Aguas Cordobesas S.A, 2007.

BELLINGER, B. J.; COCQUYT, C.; O'REILLY, C. M. Bentic diatoms as indicator of eutrophication in tropical streams. **Hydrobiologia**, v. 573, p. 75-87, 2006.

BICUDO, C. E. M.; MENEZES, M. **Gêneros de algas de águas continentais do Brasil: chave para identificação e descrições**. São Carlos, RiMa, 2006.

BINA, B. **Fatores ambientais e dinâmica da ocorrência de populações de cianobactérias em um reservatório tropical no Sudeste brasileiro**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte - Minas Gerais – BRASIL, 2008.

BISCHOFF, H. W.; BOLD, H. C. **Some soil algae from enchanted rock and related algal species**. Austin: University of Texas Publications, 95 p., 1963.

BORN, M.; WOLF, E.; **Principles of Optics**, Sixth (Corrected) Edition, Cambridge University Press, Cambridge, p. 260,1980.

BOZELLI, R.L. & HUSZAR, V.L.M. Comunidades fito e zooplanctônicas continentais em tempo de avaliação. **Limnotemas 3**. Sociedade Brasileira de Limnologia, 2003.

BRASIL, J; HUSZAR, V. L. M. O papel dos traços funcionais na Ecologia do fitoplâncton continental. **Oecol. Aust. Oecologia Australis** 15(4): 799-834, 2011

BREUNIG, F. M.; PEREIRA FILHO, W.; GALVÃO, L. S.; WACHHOLZ, F.; CARDOSO, M. A. G. Dynamics of limnological parameters in reservoirs: A case study in South Brazil using remote sensing and meteorological data. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 253–263, 2017.

BUKATA, R. P. J. J. H.; KONDRATYEV, K. Y A.; POZDNYAKOV, D. V. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. Boca Taton: CRC Press LLC, 362p, 2000.

CALIJURI, M. C.; ALVES, M. S. A.; SANTOS, A. C. A. Dos. **Cianobactérias e Cianotoxinas em Águas Continentais**, São Carlos, Ed. Rima, 109p, 2006.

CARDER, K. L.; STEWARD, R. G.; PAUL, J. H.; VARGO, G. A. Relationships between chlorophyll and ocean color constituents as they affect remote-sensing reflectance models. **Limnology and Oceanography**., 31,403-413, 1986.

CARDER, K. L.; HAWES, S. K.; BAKER, K. A.; SMITH, R. C.; STEWARD, R. G.; MITCHELL, B. G. Reflectance model for quantifying chlorophyllain the presence of productivity degradation products. **Journal of Geophysical Research**, 96(C11), 20599, 1991.

CARDER, K. L.; CHEN, F. R.; CANNIZZARO, J. P.; CAMPBELL, J. W.; MITCHELL, B. G. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. **Advances in Space Research**, v. 33, n.7, p. 1152-1159, 2004.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, n. 22, p. 361-369, 1977.

CARVALHO, M. C. **Comunidade fitoplanctônica como instrumento de biomonitoramento de reservatórios no Estado de São Paulo**. Tese de doutorado, Faculdade de Saúde Pública, São Paulo, 2003.

CASSOL, A. P. V.; PEREIRA FILHO, W.; Oliveira, M. A.; Domingues, A. L.; CORREA, F. S. & BURIOL, G. A.. First record of a bloom of the invasive species *Ceratium furcoides* (Levander) Langhans 1925 in Rio Grande do Sul state, **Brazilian Journal of Biology**. 74:515–7, 2014.

CAVALCANTE, P. K. et al. First record of expansive *Ceratium Schrank, 1793* species (Dinophyceae) in Southern Brazil, with notes on their dispersive patterns in Brazilian environments. **CheckList**. v. 9. n.4, p.862–866, 2013.

CECY, A T.; CECY, I. Í T; PENTEADO, J. G.; ALVES, K.R. Análise qualitativa da comunidade fitoplanctônica da reserva ecológica do IBGE, Distrito Federal. **Cenarium Farmacêutico**, Revista Eletrônica do Curso de Farmácia do Centro Universitário UNIEURO, Ano 1, nº 1, 2007.

CHEN, Z.; CURRAN, P. J.; HANSOM, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. **Remote Sensing of Environment**, 40(1), 67–77, 1992.

CIOTTI, A. M., LEWIS, M. R., CULLEN, J. J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. **Limnology and Oceanography**, 2002.

CLAPS, M.; ARDOHAIN, D. Zooplankton characterization in a subtropical reservoir (Córdoba, Argentina) during the period 1996-2005. Plankton Symposium IV. **Journal of Biology**, 2: 108, 2007.

CLARKE, G. K; EWING, G. C; LORENZEN, C. J. Spectra of Backscattered Light from the Sea Obtained from Aircraft as a Measure of Chlorophyll Concentration. **Science**, 1970.

CLARK DK. MODIS algorithm theoretical basis document: bio-optical algorithms – case 1 waters, version 1.2. **NOAA**, Washington, DC, 1997.

CHISTI Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**; 25 (3): 294–306, 2007.

DACH, H. V. The Effect of pH on Pure Cultures of *Euglena Mutabilis*. *The Ohio Journal of Science*. v43 n1, 1943.

DARECKI M.; STRAMSKI D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea. **Remote Sensing Environ**. 89: 326–350, 2004.

DE CASTRO, P. H. M.; PEREIRA, A. C. DE F.; BARROS, M. V. Modelos empíricos para inferência de componentes opticamente ativos em ambientes lóticos e semilênticos do rio Tibagi/PR, aplicados às imagens Landsat 8/OLI. **RAEGA O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v.43 Temático de Geotecnologias , p. 75 -92 , 2018.

DEMETRIADES-SHAH, T. H.; STEVEN, M. D.; CLARK, J. A. High resolution derivative spectra in remote sensing. **Remote Sensing Environment**, 33:55-64, 1990.

DE PAULA, M. R. **Relações entre variáveis limnológicas e reflectância do reservatório passo real rs**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Santa Maria, RS Brasil, 2015.

DEVRED, E.; SATHYENDRANATH, S.; STUART, V.; PLATT, T. A three component classification of phytoplankton absorption spectra: Applications to ocean-colour data. **Remote Sensing of Environment**, 115, 2255–2266, 2011.

DOERFFER, R.; SCHILLER, H. Neural Network for retrieval of concentrations of water constituents with the possibility of detecting exceptional out of scope spectra. **IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Honolulu, Hawaii, USA (pp. 714–717), 2000.

DOERFFER, R.; HEYMANN, K.; SCHILLER, H. Case 2 water algorithm for the MEdium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) on ENVISAT. Proceedings of the ENVISAT validation workshop, 9–13 December 2002, ESA report, 2002.

DOERFFER, R.; SCHILLER, H. The MERIS Case 2 water algorithm. **International Journal of Remote Sensing**, 28, 517–535, 2006.

DONAGEMA, G. K. Manual de métodos de análise de solos / organizadores, Guilherme Kangussú Donagema... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 132), 2011.

DOWNING, D; CLARK, J. **Estatística Aplicada**. 2 ed. São Paulo: Saraiva, 2007.

DUNTLEY, S. Q. Light in the sea. **Journal of the Optical Society of America**. 53:214-233, 1963.

DUYSENS, L. N. M. The flattening of the absorption spectrum of suspensions as compared to that of solutions. **Biochim. Biophys. Acta**, 19, 1956.

EHRENBERG, C. G. Neue Beobachtungen Über blutartige Erscheinungen in: A "gypten, Arabien und Sibirien, nebst einer U "bersicht und Kritik der fru "her bekannten. **Pogg. Annalen Der Physik Chemie**. 94:477–514, 1830.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: FINEP. 2.ed., 1998. 575p.

FALKOWSKI, P. G.; RAVEN, J. A. **Aquatic Photosynthesis**. Princeton Univ. Press, Princeton, NJ. 500p, 2007.

FERRAREZE, M.; NOGUEIRA, M.G. Phytoplankton assemblages and limnological characteristics in lotic systems of the Paranapanema Basin (Southeast Brazil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.18, n.4. p.389-405, 2006.

FERREIRA DOS SANTOS, A. K. **Análise do comportamento espectral das águas do reservatório da usina hidrelétrica Barra dos Coqueiros (GO)**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Goiás - Regional Jataí (CAJ/UFG), Jataí, GO, Brasil, 2018.

FINKEL, Z. V.; BEARDALL, J.; FLYNN, K. J.; QUIGG, A.; REES, T. A. V.; RAVEN, J. A. Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry. **Journal of Plankton Research**, 32: 119-137, 2010.

FISCHER, J.; DOERFFER, R.; GRASSL, H. Factor analysis of multispectral radiances over coastal and open ocean water based on radiative transfer calculations. **Applied Optics**, 25(3), 448. doi:10.1364/ao.25.000448, 1986.

FORRER, D. C. **Applications of Landsat-5 tm imagery in assessing and mapping water quality in Bankhead reservoir of the Black Warrior River**. Luoheng han, committee chair robert findlay michael steinberg. A Thesis. Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in the Department of Geography in the Graduate School of The University of Alabama. Tuscaloosa, Alabama, 2012.

FRANZ, B.A.; WERDELL, P. J. A generalized framework for modeling of Inherent Optical Properties in ocean remote sensing applications. **Ocean Optics XX**, Anchorage, Alaska, 27th Sept.–1st Oct. 2010, 2010.

FUNASA. **Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção em água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde: Fundação Nacional de Saúde. 56 pg, 2003.

GALO, M. DE L. B. T.; ENNES, R.; SAMIZAVA. T. M. Detecção de componentes ópticamente ativos no reservatório de Itapararanga a partir de imagens hiperespectrais: uma aplicação de análise derivativa. **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife - PE, 8-11, 2008.

GARVER, S. A.; SIEGEL, D. A. Inherent optical property inversion of ocean color spectra and its biogeochemical interpretation. I. Time series from the Sargasso Sea. **Journal Geophysical Research**, v.102, p. 18607-18625, 1997.

GINKEL, C. E. Van; HOHLS, B. C.; VERMAAK, E. A Fish kill in the Hartbeespoort Dam, South Africa, October 1999. Department of Water Affairs and Forestry - Institute for Water Quality Studies, 1999.

GITELSON, A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 13:17, 3367-3373, 1992.

GITELSON, A.; MAYO, M.; YACOBI, Y. Z.; PARPAROV, A.; BERMAN, T. The use of high-spectral-resolution radiometer data for detection of low chlorophyll concentrations in Lake Kinneret. **Journal of Plankton Research**, 16(8), 993–1002, 1994.

GITELSON, A. A.; SCHALLES, J. F.; RUNDQUIST, D.C., SCHIEBE, F. R. E YACOBI, Y. Z. Comparative reflectance properties of algal cultures with manipulated densities. **Journal of Applied Phycology**, v. 11, p. 345–354, 1999.

GITELSON, A. A., YACOBI, Y. Z., SCHALLES, J. F., RUNDQUIST, D. C., HAN, L., STARK, R., & ETZION, D. Remote estimation of phytoplankton density in productive waters, Archive Hydrobiological Special Issues. **Advances in Limnology**, 55, 121–136, 2000.

GOODIN, D. G.; HAN, L.; FRASER, R. N.; RUNDQUIST, C.; STEBBINS, W. A.; SCHALLES, J. F. Analysis of Suspended Solids in Water using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, n. 4, p. 505-510, 1993.

GORDON, H. R.; BROWN, O. B.; EVANS, R. H.; BROWN, J. W.; SMITH, R. C.; BAKER, K. S.; CLARK, D. K. A semianalytic radiance model of ocean color. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p. 10909-10924, 1988.

GORHAM, P. R.; MCLACHLAN, J.; HAMMER, U. T.; KIM, W. K. Isolation and culture of toxic strains of *Anabaena flos-aquae* (Lyngb) de Bréb, **SIL Proceedings, 1922-2010, Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen**, 15:796-804, 1964.

GREEN, R. E.; SOSIK, H. M.; OLSON, R. J.; DURAND, M. D. Flow cytometric determination of size and complex refractive index for marine particles: comparison with independent and bulk estimates. **Applied Optics**, v. 42, n. 3, p. 526-541, 2003.

GROSS, L.; THIRIA, S.; FROUIN, R.; MITCHELL, B. G. Artificial neural networks for modeling the transfer function between marine reflectance and phytoplankton pigment concentration. **Journal Geophysical Research**, v.105, n.2, p. 3483-3496, 2000.

GROSS, J. A.; TONIOLO, G. R.; GAIDA, W.; FACCO, D. S.; SANTOS, F. C. DOS; & PEREIRA FILHO, W. Reflectância da água em função das concentrações de clorofila-a em um compartimento aquático do reservatório de Itaipu. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2019.

GUIRY, M. D.; GUIRY, G.M. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; searched on 04 September 2019.

GUERRERO, J.; ECHENIQUE, R. *Ceratium hirundinella* blooms in Argentine reservoirs. **Harmful Algae News**, 16: 3, 1997.

GUSTAV MIE. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik*. **Vierte Folge**, Band 25, No. 3, p 377-445, 1908.

HAKALIN, N. L. S. **Otimização das condições de cultivo da microalga *Scenedesmus* sp. para a produção de biodiesel**. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Biologia Molecular. Instituto de Ciências Biológicas Universidade de Brasília, 2014.

HALLAK, R.; FILHO, A. J. P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 26(4): 591-608, 2011.

HAN, L.; JORDAN, K. J. Estimating and mapping chlorophyll-a-concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM+ data. **International Journal of Remote Sensing**, 26(23), 5245–5254, 2005.

HAN, L.; RUNDQUIST, D. C.; LIU, L. L.; FRASER, R. N.; SCHALLES, J. F. The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 15, nº 18, 3707-3718, 1994.

HAN, L. Spectral Reflectance with Varying Suspended Sediment Concentrations in Clear and Algae-Laden Waters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 63, No. 6, June 1997, pp. 701-705, 1997.

HAN, L.; RUNDQUIST, D. C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: A case study in a turbid reservoir. **Remote Sensing of Environment**, 62 (3), 253–261, 1997.

HARDY, E. R.; CASTRO, J. G. D. Qualidade nutricional de três espécies de clorofíceas cultivadas em laboratório. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 1, p. 39-47, 2000.

HERBLAND, A.; BOUTEILLER, A. Le; RAIMBAULT, R. Size structure of phytoplankton biomass in the equatorial Atlantic Ocean. **Deep Sea Res.**, 32, 819-836, 1985.

HERNÁNDEZ-PÉREZ, A.; LABBÉ, J. I. Microalgas, cultivo y beneficios. **Revista de Biología Marina y Oceanografía** Vol. 49, Nº2: 157-173, 2014.

HU, C.; LEE, Z.; FRANZ, B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. **Journal of Geophysical Research**, 117, 2012.

Instituto das Águas do Paraná (IAP). Disponível em:
<<http://www.aguasparana.pr.gov.br>>.

JACINAVICIUS, F. R.; GAMA JÚNIOR, W. A.; AZEVEDO, M. T. DE P.; SANT'ANNA, C. L. Manual para cultivo de cianobactérias. **Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo Instituto de Botânica - Núcleo de Pesquisa em Ficologia**, 2015.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2 ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphânio (coordenador); Antonio R. Formaggio; Athos R. Santos; Bernardo F. T. Rudorff; Cláudia M. Almeida; Lênio S. Galvão. São José dos Campos: Parêntese, 672 p. 2009.

JOHANSEN, R.; BECK, R.; NOWOSAD, J.; NIETCH, C.; XU, M.; SHU, S.; YANG, B.; LIU, H.; EMERY, E.; REIF, M.; HARWOOD, J.; YOUNG, J.; MACKE, D.; MARTIN, M.; STILINGS, G.; STUMPF, R.; SU, H. Evaluating the portability of satellite derived chlorophyll- a algorithms for temperate inland lakes using airborne hyperspectral imagery and dense surface observations. **Harmful Algae**, 2018.

JOHNSON, R. W., "Application of Aircraft Multispectral Scanners to Quantitative Analysis and Mapping of Water Quality Parameters in the James River, Virginia," **CO_SPAR Space Research**, M. J. Rycroft and A. C. Strickland, eds. Vol. XVII, Pergamon Press, Inc., pp. 25-31, 1977.

KAMPEL, M. **Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados in situ na costa sudeste brasileira**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo. 2003.

KIEFER, D. A.; SOOHOO, J. B. Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California, **Limnology and Oceanography**, 27, 492-499, 1982.

KIEFER, D. A. Biological sources of optical variability in the sea. in **Ocean Optics VIII**. Orlando, FL 637: p. 25-34. SPIE, 1986.

KIRK, J. T. O. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. I. General treatment of suspensions of pigmented cells. **CSIRO, Division of Plant Industry**, Post Office Box 1600, Canberra City, A.C.T. 2601, Australia, 1976.

KIRK, J. T. O. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. II. Spherical cells. **CSIRO, Division of Plant Industry**, Post Office Box 1600, Canberra City, A.C.T. 2601, Australia, 1976.

KIRK, J. T. O. A theoretical analysis of the contribution of algal cells to the attenuation of light within natural waters. III. Cylindrical and spheroidal cells. **CSIRO, Division of Plant Industry**, Post Office Box 1600, Canberra City, A.C.T. 2601, Australia, 1976.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.

KIRK, J. T. O. **Light & photosynthesis in aquatic ecosystems**. v.2. London: Cambridge University Press, 507p, 1994.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3rd ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

KLEMAS, V. Remote Sensing of Algal Blooms: An Overview with Case Studies. **Journal of Coastal Research**, 278, 34-43, 2012.

KRUK, C.; HUSZAR, V.L.M.; PEETERS, E.T.H.M.; BONILLA, S.; COSTA, L.; LÜRLING, M.; REYNOLDS, C. & SCHEFFER, M. A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton. **Freshwater Biology**, 55: 614-627, 2010.

KULKARNI, A. Water Quality Retrieval from Landsat TM Imagery. **Procedia Computer Science**, 6, 475–480, 2011.

KUTSER, T.; METSAMAA, L.; STROMBECK, N.; VAHTMAE, E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.67, p. 303-312, 2006.

LAILI, N.; ARAFAH, F.; JAELANI, L. M.; SUBEHI, L.; PAMUNGKAS, A.; KOENHARDONO, E. S.; SULISETYONO, A. Development of water quality parameter retrieval algorithms for estimating total suspended solids and chlorophyll-a concentration using landsat-8 imagery at poteran island water. ISPRS Ann. **Photogrammetry Remote Sensing**. Spatial Inf. Sci., II-2/W2, 55-62, 2015.

LAMONT, T.; BREWIN, R. J. W.; BARLOW, R. G. Seasonal variation in remotely-sensed phytoplankton size structure around southern Africa. **Remote Sensing of Environment**, 2017.

LEE Z. P.; CARDER, K. L.; MOBLEY, C. D.; STEWARD, R. G.; PATCH, J. S. “Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model,” **Applied Optics**. 37, 6329–6338 ~1998.

LEE Z. P.; CARDER, K. L.; MOBLEY, C. D.; STEWARD, R. G.; PATCH, J. S. “Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization,” **Applied Optics**. 38, 3831–3843, 1999.

LEE Z. P.; CARDER, K. L.; ARNONE, R. A. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. **Applied Optics**, 41(27), 5755, 2002.

LEE, Z.; LUBAC, B.; WERDELL, P. J.; ARNONE, R. An update of the Quasi-Analytical Algorithm (QAA_v5). **Technical report: International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG)**, 2009.

LIN, Y.; YE, Z.; ZHANG, Y.; YU, J. Spectral feature analysis for quantitative estimation of cyanobacteria chlorophyll-a. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XLI-B7, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic , 2016.

LOBO, E. A.; CALLEGARO, V. L. M.; HERMANY, G.; GÓMEZ, N.; ECTOR, L.; Review of the use of microalgae in South America for monitoring rivers, with special reference to diatoms. **Vie et Milieu-Live and Environment**. v. 54, p. 105-114, 2004.

LOBO, F. DE L.; YUNES, J. S.; BARBOSA, C. C.; LONDE, L. DE R.; THEIL, C. I.; NOVO, E. M. L. DE M.; FILHO, W. P. Propriedades da reflectância de *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) manipulada em altas concentrações de pigmentos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 2009.

LODHI, M. A. RUNDQUIST, D. C. HAN, L. KUSILA, M. S. The potential for remote sensing of loess soils susoended in surfasse water. **Journal of The American Water Resources Association**, v. 33 n° 1, 1997.

LONDE, L. de R.; NOVO, E. M. L. de M.; CALIJURI, M. do C. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 389-396, 2005.

LONDE, L. de R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. INPE - São José dos Campos-SP. Tese de doutorado orientada pela Dra. Evelyn Marcia Leão de Moraes Novo e Dra. Maria do Carmo Calijuri, como requisito para a obtenção do grau de Doutora em Sensoriamento Remoto, 2008.

LOPES, L. F. D.; MULLER, I.; SOUZA, A. M.; ANSUJ, A. P.; MOREIRA JUNIOR, F. DE J.; STRAZZABOSCO, F.; MORAES, D. A. DE O.; PULGATI, F. H. **Caderno Didático - Estatística Geral**, – Santa Maria : UFSM, 2 ed., CCNE, 205 f, 2007.

MACKINNEY, G. Absorption of light by chlorophyll solutions. **The Journal of Biological Chemistry**. v. 140, p. 315 – 322, Mar 1941.

MANTOVANI, J. E. **Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria inorgânica particulada**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

MARGALEF, R. Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. **Oceanologica Acta**, 1: 493-509, 1978.

MARGALEF, R. **Limnología. Omega**. Barcelona. España, 1983.

MARITORENA, S., SIEGEL, D. A.; PETERSON, A. R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications. **Applied Optics**, v.41, p. 2705-2714. 2002.

MARTINS, A. V. DE C. M. **Caracterização molecular e morfológica de isolados brasileiros do gênero Euglena**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-GRaduação em Parasitologia do Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

MATSUMURA-TUNDISI, T., et al. Occurrence of Ceratium furcoides (Levander) Langhans 1925 bloom at the Billings Reservoir, São Paulo State, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**. v. 70. n. 3. p. 825- 829. 2010.

MEFFERT, M. E. Limnothrix Meffert nov. gen. - the unsheathed planktic cyanophycean filaments with polar and central gas vacuoles. **Algological Studies** 50-53: 269-276, 19 figs, 1988.

MEICHTRY, de Z. N.; BOLTOVSKOY, A.; COSTIGLILO-ROJAS C.; RODRIGUEZ, R. M. Primer registro del dinoflagelado invasor Ceratium furcoides (Levander) Langhans 1925

en la Argentina y su distribución en el área de influencia del Embalse Yacyretá (río Paraná, Argentina-Paraguay). **Limnetica**, 33:153–60, 2014

METSAMAA, L.; KUTSER, T. SRÖMBECK, N. Recognising cyanobacterial blooms based on their optical signature: a modelling study. **Boreal Environment Research**, v.11, p.493-506, 2006.

MEYEN, F. J. F. Beobachtungen über einige niedere Algenformen. **Nova Acta Physico-Medica Academiae Caesareae Leopoldino-Carolinae Naturae** 14: 768-778, pl. XLIII [43], 1829.

MITCHELL, B.G.; KAHRU, M.; REYNOLDS, R.; WIELAND, J.; STRAMSKI, D.; HEWES, C.; HOLM-HANSEN, O. **Evaluation of chlorophyll-a ocean color algorithms for the Southern Ocean**. San Francisco, p. 2001.

MOREL, A.; ANTOINE, D. MERIS algorithm theoretical basis documents (ATBD 2.9) — Pigment index retrieval in Case 1 waters (PO-TN-MEL-GS-0005), Issue 4, July 2011. **Technical report: Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (LOV), MERIS ESL, ACRI-ST**, 2011.

MUELLER, J. L. **The influence of phytoplankton on ocean color spectra**. Ph.D. Thesis Oregon State, University Corvallis, 1974.

NAIR, A.; SATHYENDRANATH, S.; PLATT, T.; MORALES, J.; STUART, V.; FORGET, M.-H.; DEVERED, E.; BOUMAN, H. Remote sensing of phytoplankton functional types. **Remote Sensing of Environment**, 112(8), 3366–3375, 2008.

NASELLI-FLORES, L. & BARONE, R. Pluriannual morphological variability of phytoplankton in a highly productive Mediterranean reservoir (Lake Arancio, Southwestern Sicily). **Hydrobiologia**, 578: 87-95, 2007.

NICHOLLS, K. M, W. KENNEDY & C. HANNET. Fish kill Heart Lake, Otario, associated with the collapse of a massive population of *Ceratium hirundinella* (Dinophyceae). **Freshwater Biology**, 10(6): 553–561,1980.

NI, W. M.; ZHANG, J. Y.; DING, T. D.; QI, J. G. Assessment of Spatial Distribution of Algal Biomass in a Subtropical Lake in China by Modeling of Landsat ETM+ Data Coupled with Field Data. **Applied Mechanics and Materials**, 522-524, 12–20, 2014.

NOVO, E. M. M. L. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R. **Sensoriamento Remoto Reflectância dos Alvos Naturais**. Brasília, DF: UnB, Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 15-40, 2001.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. Ed. São Paulo: Blucher, p. 387, 2010.

NUSH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and pheopigment determination. **Arch. Hydrobiol. Bech. Stuttgart**, 14:14-36,1980.

OHSE, S.; DERNER, R. B.; OZÓRIO, R. A.; BRAGA, M. V. C.; CUNHA, P.; LAMARCA, C. P.; SANTOS, M. E. Produção de biomassa e teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e proteína em microalgas. **Ciência Rural**, v. 39, p. 1760 - 1767, 2009.

OLIVEIRA, E.C. **Introdução à Biologia Vegetal**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

OLIVEIRA, H. S. B.; MOURA, A. N.; CORDEIRO-ARAÚJO, M. K. First record of *Ceratium* Schrank, 1973 (Dinophyceae: Ceratiaceae) in Freshwater ecosystems in the semiarid region of Brazil. **CheckList**. v. 7. n. 5. p. 626-628. 2011.

O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B.G.; SIEGEL, D.A.; CARDER, K.L.; GARVER, S. A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C. Ocean chlorophyll algorithms for SeaWiFS. **Journal of Geophysical Research** 103 (C11), 24937–24953, 1998.

O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; O'BRIEN, M. C.; SIEGEL, D. A.; TOOLE, D.; MENZIES, D.; SMITH, R. C.; MUELLER, J. L.; MITCHELL, B. G.; KAHRU, M.; CHAVEZ, R. P.; STRUTTON, P.; COTA, G. F.; HOOKER, S. B.; MCCLAIN, C. R.; CARDER, K. L.; MUELLER-KARGER, F.; HARDING, L.; MAGNUSON, A.; PHYNNEY, D.; MOORE, G. F.; AIKEN, J.; ARRIGO, K. R.; LETELIER, R.; CULVER, M. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, Volume 11. In: S. B. Hooker e E. R. Firestone (ed). **NASA Tech. Memo**. 2000-2206892. Greenbelt, Md, NASA Goddard Space Flight Center, 2000.

PACHECO, J. P.; IGLESIAS, C.; MEERHOFF, M.; FOSALBA, C.; GOYENOLA, G.; MELLO, F. T.; GARCÍA, S.; GELÓS, M. & GARCÍA-RODRÍGUEZ, F. Phytoplankton community structure in five subtropical shallow lakes with different trophic status (Uruguay): a morphology-based approach. **Hydrobiologia**, 646: 187-197, 2010.

PADISÁK, J., BORICS, G., GRIGORSZKY, I., SORÓCZKI-PINTÉR, É. Use of Phytoplankton Assemblages for Monitoring Ecological Status of Lakes within the Water Framework Directive: The Assemblage Index. **Hydrobiologia**, 553(1), 1–14, 2006.

PADISÁK, J.; REYNOLDS, C. S. Selection of phytoplankton associations in Lake Balaton, Hungary, in response to eutrophication and restoration measures, with special reference to cyanoprokaryotes. **Hydrobiologia**, 384: 41- 53, 1998.

PADISÁK, J. Phytoplankton. Pp. 251-308. In: P.E. O'Sullivan & C.S. Reynolds (eds.). *The Lakes Handbook 1. Limnology and Limnetic Ecology*. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK. 699p, 2003.

PALMER, S. C. J.; KUTSER, T.; HUNTER, P. D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. **Remote Sensing of Environment**, 157, 1–8. doi:10.1016/j.rse.2014.09.021, 2015.

PÉREZ-MARTÍNEZ, C.; SÁNCHEZ CASTILLO, P. Temporal occurrence of *Ceratium hirundinella* in Spanish reservoirs. **Hydrobiologia**, 2001.

PERONI, N.; HERNÁNDEZ, M. I. M. **Ecologia de Populações e Comunidades**. 1. ed. Florianópolis: CCB/EAD/UFSC, v. 1, 125 p., 2011.

PINKERTON, M. H.; RICHARDSON, K. M.; BOYD, P. W.; GALL, M. P.; ZELDIS, J.; OLIVER, M. D.; MURPHY, R. J. Intercomparison of ocean colour band-ratio algorithms for chlorophyll concentration in the Subtropical Front east of New Zealand. **Remote Sensing of Environment**, 97, 382–402, 2005.

PINTO, L. H. **Estudo das alterações na atividade fotossintética e no comportamento geral das algas do gênero Euglena Gracilis na presença dos hormônios de 17 α etinilestradiol e 17 β estradiol**. Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Saúde e Meio Ambiente, na Universidade da Região de Joinville. JOINVILLE – SC, 2012.

PITTOIS, S.; JACKSON, M.H.; WOOD, B.J.B. Sources of the eutrophication problems associated with toxic algae: an overview. **Journal of environmental Health**, v. 64, n. 5, p. 25-32, 2001.

POTAPOVA, M.; CHARLES, D. F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in Rivers of the United States. **Ecological Indicators**, v. 7, p. 48-70, 2005.

POZDNYAKOV, D.; GRASSL, H. **Colour of inland and coastal waters. A methodology for its interpretation**. Chichester, UK: Praxis Publishing Ltd, 2003.

QUIBELL, G. Estimation chlorophyll concentrations using upwelling radiance from different freshwater algal genera. - **Int. J. Remote Sensing** 13:2611-2621, 1992.

RAMÍREZ-MÉRIDA, L. G.; RIBAS-BARRETO, A.; GROSS, J. A.; OLIVEIRA L. M. A. Produção de biomassa de euglena sp em meio a base de fertilizantes NPK. **33ª Jornada Acadêmica Integrada UFSM**, 2018.

REYNOLDS, C. S. Phytoplankton associations and their periodicity in stratifying lake systems. **Holarctic Ecology**, 3, 141-159, 1980.

REYNOLDS, C. S, TUNDISI, J. G., HINO, K. Observations on a metalimnetic Lyngbya population in a stably stratified tropical lake (lagoa Carioca, Eastern Brazil). **Archiv für Hydrobiologie**, v. 97, n. 1, p. 7-17, 1984.

REYNOLDS, C. S. Functional morphology and the adaptive strategies of freshwater phytoplankton. Pp. 388-433. In: SANDGREN, C. D. Growth and **Reproductive Strategies of Freshwater Phytoplankton**. Cambridge University Press, New York, NY. 442p, 1988.

REYNOLDS, C. S. & IRISH, A. E. Modelling phytoplankton dynamics in lakes and reservoirs: the problem of in-situ growth rates. **Hydrobiologia**, 349: 5-17, 1997

REYNOLDS, C.; HUSZAR, V.; KRUK C.; NASELLI-FLORES, L. & MELO, S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. **Journal of Plankton Research**, 24: 417-428, 2002.

REYNOLDS, C. S. **Ecology of Phytoplankton**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 535 p., 2006.

RICHARDSON, L. Remote Sensing of Algal Bloom Dynamics. **Bio Science**, 46(7), 492-501, 1996.

RIPPKA, R. Isolation and purification of Cyanobacteria. In: L. Pacher & A.N. Glazer (eds.). **Cyanobacteria Methods in Enzymology**. Blackwell 167: 3-27, 1979.

ROGERS, R. H. "Application of Landsat to the Surveillance and Control of Eutrophication in Saginaw Bay," **Proceedings of the Tenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Environmental Research Institute of Michigan**, pp. 43i-446, 1975.

RUDDICK, K. G.; GONS, H. J.; RIJKEBOER, M.; TILSTONE, G. Optical remote sensing of chlorophyll a in case 2 waters by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties. **Applied Optics**, 40(21), 3575, 2001.

RUDORFF, C. M.; ARRAUT, E. M.; BARBOSA C. C.; CARVALHO, J. C.; FILHO, W. P.; NOVO, E. M. L. M. Avaliação de algoritmos bio-óticos em massas d'água amazônicas. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, 2004.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/eo-1 e de espectrorradiômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 138 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

RUDORFF, C. M.; NOVO, E. M. L. M.; GALVÃO, L. S.; & PEREIRA FILHO. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazônica**, 2007.

RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 62, n.2, p.195-200, 1996.

SANT'ANNA C. L.; AZEVEDO, M. T. P.; AGUJARO, L. F.; CARVALHO, L. R, SOUZA, R. C. R. **Manual ilustrado para identificação e contagem de cianobactérias planctônicas de águas continentais brasileiras**. Rio de Janeiro: Interciência; 2006.

SANTOS, F. C. dos.; PEREIRA FILHO, W. P. Reflectância espectral relacionada aos constituintes opticamente ativos da água do reservatório Passo Real, RS, Brasil. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.

SANTOS, F. C. **Potencial de utilização do sensoriamento remoto para a monitoramento da água do reservatório Passo Real**. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil, 2016.

SATHYENDRANATH, S.; PRIEUR, L.; MOREL, A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. **International Journal of Remote Sensing**, 10:8, 1373-1394, 1989.

SIPAÚBA, TAVARES, L. H.; MILLAN, R. N.; BERCHIELLI, F. DE A.; BRAGA, F. M. DE S. Use of alternative media and different types of recipients in a laboratory culture of *Ankistrodesmus gracilis* (Reinsch) Korshikov (Chlorophyceae). **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 247-253, 2011.

SILVA, L. C., LEONI, I. C.; SANTOS-WISNIEWKI, M J. dos; PERET, A. C.; ROCHA, O. Invasion of the dinoflagellate *Ceratium furcoides*(Levander) Langhans 1925 at tropical reservoir and its relation to environmental variables. **Biota Neotropica**. v..12. n.2. p.93-100, 2012.

SMYTH, T. J.; MOORE, G. F.; HIRATA, T.; AIKEN, J. Semianalytical model for the derivation of ocean color inherent optical properties: Description, implementation, and performance assessment. **Applied Optics**, 45, 8116–8131, 2006.

SVÁB, E.; TYLER, A. N.; PRESTON, T.; PRÉSING, M.; BALOGH, K. V. Characterizing the spectral reflectance of algae in lake waters with high suspended sediment concentrations. **International Journal of Remote Sensing**, Vol. 26, No. 5, 10 March 2005, 919–928, 2005.

TEILLET, P. M.; GAUTHIER, R. P.; CHICHAGOV, A and FEDOSEJEVS, G. Towards integrated Earth sensing: Advanced technologies for in situ sensing in the context of Earth observation. **Canadian Journal of Remote Sensing**, 2002.

THOMAS, G. E.; STAMNES, K. **Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean**, Cambridge University Press, Cambridge, U. K, 1999.

TOLEDO Jr., A. P.; AGUDO, E. G.; TALARICO, M.; CHINEZ, S. J. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. Trabalho apresentado no **XIX Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária Ambiental - AIDIS**. Santiago do Chile, 11 a 16 de novembro de 1984. 56p. 1984.

TRASFERETTI, B. C.; e DAVANZO, C. U. Introdução às técnicas de reflexão especular e reflexão-absorção no infravermelho: (1) reflexão especular. **Química Nova**, Vol. 24, No. 1, 94-98, 2001.

TSAI, F.; PHILPOT, W. Derivative Analysis of Hyperspectral Data. **Remote Sensing of Environment**, 66(1), 41–51, 1998.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 631p, 2008.

WANG, Z.; KAWAMURA, K.; SAKUNO, Y.; FAN, X.; GONG, Z.; LIM, J. Retrieval of Chlorophyll-a and Total Suspended Solids Using Iterative Stepwise Elimination Partial Least Squares (ISE-PLS) Regression Based on Field Hyperspectral Measurements in Irrigation Ponds in Higashihiroshima, Japan. **Remote Sensing**, 9(3), 264, 2017.

WATANABE, M. M. Freshwater Culture Media. In. ANDERSEN, R. A. Algal Culturing Techniques. Phycological Society of America. Elsevier Academic Press, 589p. 2005.

WATANABE, F.; ALCÂNTARA, E.; RODRIGUES, T.; ROTTA, L.; BERNARDO, N.; IMAI, N. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir, Brazil). **Anais Da Academia Brasileira de Ciências**, 90(2 suppl 1), 1987–2000, 2017.

WERDELL, P. J.; FRANZ, B.A.; BAILEY, S. W.; FELDMAN, G. C.; BOSS, E.; BRANDO, V. E. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. **Applied Optics**, 52, 2019–2037, 2013.

WEITHOFF, G. The concepts of ‘plant functional types’ and ‘functional diversity’ in lake phytoplankton - a new understanding of phytoplankton ecology? **Freshwater Biology**, 48: 1669-1675, 2003.

WETZEL, R.G. **Limnology**. Philadelphia, W.B. Saunders, 743p, 1975.

WETZEL, R. G. **Limnologia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbekian, 1110 p, 1993.

WHITTINGTON, J.; SHERMAN, B.; GREEN, D.; OLIVER, R. L. Growth of *Ceratium hirundinella* in a subtropical Australian reservoir: the role of vertical migration. **Journal of Plankton Research**, 22(6): 1025–1045, 2000.

WHITLOCK, C. H.; KUO, C. Y.; LECROY, S. R. Criteria for the use of regression analysis for remote sensing of sediment and pollutants. **Remote Sensing of Environment**, 12(2), 151–168. doi:10.1016/0034-4257(82)90035-9, 1982.

WOJCIECHOWSKI, J. **Efeitos da Temperatura, Fósforo e Luz no crescimento da cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju do reservatório de Alagados, Paraná Curitiba**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Botânica, Setor de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

YAMAMOTO, K.; ISHIDA, H.; Vib. **Spectrosc.** 1994. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0924203194000148?via%3Dihub>> Acesso em: Dezembro de 2015.

ZAGATTO, P. A.; ARAGÃO, M. A. Implantação de métodos para avaliação de algas tóxicas. São Paulo. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). **Relatório Técnico**. 23p, 1992.

ZHANG, Y.; VAN DIJK, M. A.; LIU, M.; ZHU, G.; & QIN, B. The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: Field and experimental evidence. **Water Research**, 43(18), 4685–4697, 2009.

ZHENG, G.; DIGIACOMO, P. M. Remote sensing of chlorophyll-a in coastal waters based on the light absorption coefficient of phytoplankton. **Remote Sensing of Environment** 201, 2017.