

**AJUSTE DE MODELOS BIO-ÓPTICOS
SEMI-EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA
REMOTA DA CONCENTRAÇÃO DE
CLOROFILA NA LAGOA DA CONCEIÇÃO**

Alexa de Godoy Vargas

Florianópolis, 2019

Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental



Alexa de Godoy Vargas

**AJUSTE DE MODELOS BIO-ÓPTICOS SEMI-EMPÍRICOS
PARA ESTIMATIVA REMOTA DA CONCENTRAÇÃO DE
CLOROFILA NA LAGOA DA CONCEIÇÃO**

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão
de Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental. - TCC II
Orientador: Prof. Dra. Patrícia Kazue Uda
Coorientador: Dr. Marcelo Pedroso
Curtarelli

Florianópolis
2019

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade
Federal de Santa Catarina

Vargas, Alexa de Godoy Vargas

Ajuste de modelos bio-ópticos semi-empíricos para
estimativa remota da concentração de clorofila na
Lagoa da Conceição / Alexa de Godoy Vargas ;
orientador, Patrícia Kazue Uda, coorientador,
Marcelo Pedroso Curtarelli, 2019.

81 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, , Graduação
em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis,
2019.

Inclui referências.

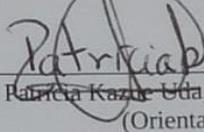
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.
Clorofila-a. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Modelos
bio-ópticos. 5. Lagoa da Conceição. I. Kazue Uda,
Patrícia. II. Pedroso Curtarelli, Marcelo. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL

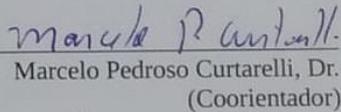
Ajuste de modelos bio-ópticos semi-empíricos para estimativa remota
da concentração de clorofila na Lagoa da Conceição

ALEXA DE GODOY VARGAS

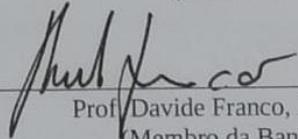
Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão
de Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental. - TCC II



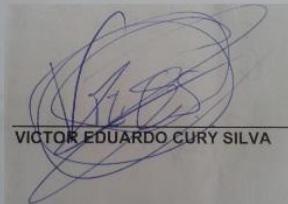
Prof. Patrícia Kazuo Uda, Dra.
(Orientadora)



Marcelo Pedroso Curtarelli, Dr.
(Coorientador)



Prof. Davide Franco, Dr.
(Membro da Banca)



VICTOR EDUARDO CURY SILVA

Victor Eduardo Cury Silva, MSc.
(Membro da banca)

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2019.

Este trabalho é dedicado àquela que nunca mediu esforços para me ver realizada e feliz. Obrigada por tudo, mãe. Esta conquista é nossa.

AGRADECIMENTOS

Neste espaço gostaria de primeiramente agradecer a todas as bênçãos que recebi em forma de amigos, mestres, paisagens, histórias e entusiasmo ao longo, não só deste trabalho, mas de todo o meu percurso desde o início da graduação. Obrigada, Deus, por se fazer tão presente sempre.

Um enorme agradecimento a minha amada mãe, Silmar, que sempre esteve me apoiando, me incentivando, compreendendo minhas ausências e me dando conforto nos momentos de tensão. Também agradeço aos amigos presentes em meu dia a dia, que acompanharam todo o stress, proporcionando momentos de descontração exatamente quando eu precisava e me dando todo o apoio para a conclusão deste trabalho.

Tenho muita gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental por todos os espaços de aprendizado acadêmico, profissional e pessoal. Me formar dentro de uma universidade pública em um curso de altos conceitos em diversas avaliações é uma das conquistas das quais mais me orgulho.

Gostaria de agradecer aos mestres que contribuíram de alguma forma com a execução deste trabalho: Á minha orientadora, professora Dr^a Patrícia Kazue Uda, por toda a paciência, auxílio e instrução acerca dos conceitos de sensoriamento remoto. Ao meu coorientador, Dr. Marcelo Pedroso Curtarelli, por ser tão solícito e ter me ensinado o "caminho das pedras" por tantas vezes.

*Não haverá borboletas se a vida não passar
por longas e silenciosas metamorfoses.
(Rubem Alves)*

RESUMO

Desde sempre a organização de civilizações se fez mais frequente a beira de corpos hídricos, por diversos motivos, como para o abastecimento de água, para maior locomoção, para o lazer, ou pelo desenvolvimento de agriculturas. Estas ocupações em regiões de corpos hídricos tem o histórico de causar alguns desequilíbrios ambientais, principalmente nos dias atuais, em que a ocupação se dá na maioria das vezes de forma desordenada. A Lagoa da Conceição, localizada na ilha de Florianópolis em Santa Catarina, é um exemplo de bairro formado em volta de grandes belezas naturais, porém, por falta de planejamento, vários indícios revelam uma queda na qualidade da água em decorrência da ocupação humana. Por se tratar de um ambiente turístico e bastante movimentado em todas as épocas do ano, é muito importante que a Lagoa da Conceição mantenha-se preservada, e como forma de auxílio a isto, as análises de qualidade da água e identificação de pontos críticos são imprescindíveis para a proposição de soluções para o local. Neste cenário, os modelos bio-ópticos de estimativa de concentração de clorofila-a através de imagens de sensoriamento remoto surgem como uma técnica alternativa para análises de qualidade da água. Com este métodos, as análises poderiam ser realizadas sem precisar sair a campo, facilitando o monitoramento do local. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de modelos bio-ópticos empíricos e semi-empíricos para estimativa da concentração de clorofila-a na lagoa da Conceição por meio de imagens de satélite. Para isto, foram utilizadas análises de concentração de clorofila *in situ* do meses de agosto e setembro de 2015 e imagens do sensor OLI do satélite Landsat 8 com datas próximas das análises de campo, de forma a calibrar modelos bio-ópticos empíricos e semi-empíricos obtidos em literatura consagrada.

Palavras-chave: Clorofila-a, Sensoriamento Remoto, Modelos bio-ópticos, Lagoa da Conceição.

ABSTRACT

The organization of civilizations has always been more frequent at the edge of water bodies, for several reasons, such as for water supply, for locomotion, for recreation, or for the development of agriculture. These occupations in regions of water bodies often cause some environmental imbalances, especially in the present day, where occupation occurs usually in a disorderly way. The Lagoa da Conceição, located on the island of Florianópolis in Santa Catarina, is an example of a neighborhood formed around great natural beauty, but due to lack of planning, several evidences reveal a decrease in water quality mainly related to human occupation. Because it is a tourist place and quite busy at all seasons of the year, it is very important that the Lagoa da Conceição remains preserved, and as a way to help this, the analysis of water quality and identification of critical points are indispensable for proposing solutions to the local. In this scenario, the bio-optical models of estimation of chlorophyll-a concentration through remote sensing images appear as an alternative technique for water quality analysis. With this methods, the analyzes can be done without having to leave the laboratory, facilitating the monitoring of the place. The objective of this work was to evaluate the application of empirical and semi-empirical bio-optical models to estimate the chlorophyll-a concentration in the Lagoa da Conceição through satellite images. In order to do this, it was used data of concentrations of chlorophyll-a *in situ* in the months of August and September 2015 and OLI images of the Landsat 8 satellite with dates close to the field analysis, in order to calibrate empirical and semi-empirical bio-optical models obtained in consecrated literary.

Key words: Chlorophyll-a. Remote sensing. Bio-optical models. Lagoa da Conceição.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Elementos fundamentais no sensoriamento remoto	31
Figura 2 Espectro eletromagnético	32
Figura 3 Representação do IFOV	33
Figura 4 Imagens de alta e pequena resolução	34
Figura 5 Curva média da vegetação fotossinteticamente ativa	37
Figura 6 Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos	39
Figura 7 Análise espectral da água clara e da água contendo algas	41
Figura 8 Fluxograma de atividade	46
Figura 9 Localização da área de estudo.....	48
Figura 10 Padrão de circulação residual do corpo da lagoa.	49
Figura 11 Comparação entre as bandas espectrais dos satélites Landsat 5, 7 (inferior) e 8 (superior).....	53
Figura 12 Aplicação do modelo de Gitelson et al. (2008) ajustado para a Lagoa da Conceição.....	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Curvas espectrais dos polígonos representativos da Lagoa da Conceição	60
Gráfico 2 Curvas espectrais dos polígonos representativos da vegetação	60
Gráfico 3 Curvas espectrais dos polígonos representativos do oceano	61
Gráfico 4 Curvas espectrais dos polígonos representativos da área urbana	61
Gráfico 5 Comparação dos valores de $\ln[cl-a]$ medidos em campo e calculados com a equação gerada na regressão linear	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação do estado trófico de ambientes lênticos	30
Tabela 2 Regiões do espectro mais adequadas ao estudo de propriedades físico-químicas de solos	38
Tabela 3 Dados de análise de concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição em 2015	51
Tabela 4 Principais características dos sensor OLI a bordo do Landsat 8	52
Tabela 5 Modelos para estimativa da concentração de clorofila	56
Tabela 6 R^2 ajustado para a calibração do modelo NIR/RED com valores de concentração de clorofila-a	62
Tabela 7 R^2 ajustado para a calibração do modelo NIR/RED com valores de ln de concentração de clorofila-a	62
Tabela 8 Dados amostrais da ajuste de modelos	63
Tabela 9 Dados amostrais detalhados para o ajuste de modelos	64
Tabela 10 Ajuste do modelo de Gitelson et al. (2008) para Lagoa da Conceição	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANA - Agência Nacional de Águas
LAHIMAR - Laboratório de Hidráulica Marítima
UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
OLI - *Operational Land Imager*
IET - Índice de Estado Trófico
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
REM - Radiação Eletromagnética
IFOV - *Instantaneous Field of View*
USGS - *United States Geological Survey*
COA - Componente Ópticamente Ativo
POI - Propriedade Óptica Inerente
POA - Propriedade Óptica Aparente
TM - *Thematic Mapper*
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
NDCI - *Normalized Difference Chlorophyll Index*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	OBJETIVOS	27
2.1	Objetivo Geral	27
2.2	Objetivos Específicos	27
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
3.1	Eutrofização de corpos hídricos	29
3.2	Conceitos fundamentais de Sensoriamento	30
3.3	Comportamento espectral dos objetos	36
3.3.1	Vegetação	36
3.3.2	Solo	38
3.3.3	Água	38
3.4	Estimativa da concentração de clorofila utilizando Sensoriamento Remoto	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	Fluxograma	45
4.2	Área de estudo	47
4.3	Obtenção de dados <i>in situ</i> - Análises de concentração de clorofila-a	50
4.4	Obtenção de dados orbitais - Imagens de satélite	51
4.5	Pré-processamento de imagens	53
4.6	Análise de dados de reflectância	54
4.7	Definição de dados amostrais para calibração de modelos ...	54
4.8	Ajuste dos modelos bio-ópticos	55
4.9	Aplicação do modelo com melhor desempenho	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Análise de dados de reflectância	59
5.2	Análise e definição dos dados amostrais	62
5.3	Ajuste de modelos bio-ópticos para estimativa da concentração de clorofila-a	64
5.4	Aplicação dos modelos	66

6	CONCLUSÃO.....	69
	REFERÊNCIAS.....	71
	APÊNDICE A - Porcentagem de reflectância dos polígonos representativos da Lagoa da Conceição.....	77
	APÊNDICE B - Reflectância das bandas de interesse nos pontos geográficos das coletas <i>in situ</i>	79

1 INTRODUÇÃO

Muitas cidades e bairros no mundo inteiro iniciaram suas formações próximas à corpos hídricos por questões de abastecimento de água, transporte, ou lazer. Segundo Barreto (2013), o desenvolvimento das cidades, o crescimento populacional e as atividades humanas são as principais causas de alterações indesejadas nos ecossistemas aquáticos. Como exemplo de alteração indesejada, temos o aporte de nutrientes no corpo hídrico por meio de despejos domésticos sem tratamento. O excesso de nutrientes em um corpo hídrico caracteriza a eutrofização. Barreto (2013) cita diversos efeitos potenciais da eutrofização, causados pelo excesso de nutrientes na água, como a proliferação excessiva de algas e cianobactérias, a redução da transparência da água, a depleção de oxigênio dissolvido e o aumento da frequência da mortalidade de peixes. A ANA (Agência Nacional de Águas) considera o nível de eutrofização de um corpo hídrico como um parâmetro de qualidade da água, o qual pode ser obtido também através da análise da concentração de algas e cianobactérias na água

Desta forma, a qualidade da água é um aspecto muito importante ao tratar de usos de corpos hídricos em suas diversas finalidades. A análise da qualidade da água engloba uma série de estudos das características físicas, químicas e biológicas que um corpo hídrico específico apresenta. O nível de eutrofização de um corpo hídrico é considerado um parâmetro de qualidade da água e pode ser obtido através da análise da concentração de nutrientes, de algas ou cianobactérias na água. Outro fator que pode indicar a eutrofização é a concentração de clorofila, uma vez que a mesma é uma substância que está presente nas algas.

Em virtude da necessidade de análise e monitoramento de importantes corpos hídricos, surgem novos estudos de tecnologias que possam auxiliar nesta tarefa, como o Sensoriamento Remoto. De acordo com Moraes (2002), o sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permitem a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos. Ou seja, o sensoriamento remoto utiliza da interação da superfície terrestre com uma fonte de energia eletromagnética para a aquisição de informações sobre um determinado alvo. As interações são determinadas pelas propriedades físico-químicas e biológicas do determinado alvo e podem ser identificadas nas imagens e dados de sensores remotos.

Sendo assim, o uso de sensores remotos para o monitoramento de corpos hídricos apresenta uma grande potencialidade, uma vez que extensas regiões ou lugares de difícil acesso podem ser cobertos em apenas alguns minutos de sobrevôo. Muitos estudos já são feitos através de mapas periódicos, contendo a distribuição da concentração de clorofila nas camadas superficiais da água. Estes estudos, dentre tantas outras finalidades, são de grande valia para conclusões sobre a dinâmica de fluorescência de algas e suas possíveis causas e consequências no meio ambiente.

Neste cenário, a Lagoa da Conceição, localizada na cidade de Florianópolis, é um exemplo de corpo hídrico que sofreu queda de sua qualidade ao longo do tempo. O mau planejamento da ocupação do solo do bairro acabou atingindo o ecossistema aquático, afetando de forma negativa a biota e a balneabilidade da lagoa. L.K. Lisboa et al. (2008) citaram Barbosa (2003) na caracterização das principais fontes de poluição da lagoa, que seriam os esgotos domésticos, gorduras, embarcações, agrotóxicos, assoreamento e acidificação, todas as fontes obviamente muito ligadas a causas antrópicas.

O estudo do presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação da aplicação de modelos bio-ópticos empíricos e semi-empíricos para estimativa da concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição. Como base de dados, foi utilizado uma série histórica de análises de concentração de clorofila-a do local e imagens do sensor OLI do satélite Landsat 8, além de modelos bio-ópticos de estimativa de clorofila-a obtidos em literatura consagrada.

O presente trabalho também servirá para auxiliar como dados de entrada em futuros trabalhos e pesquisas realizados pelo Laboratório de Hidráulica Marítma (LaHiMar) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comparar modelos bio-ópticos empíricos e semi-empíricos para estimativa da concentração de clorofila-a na lagoa da Conceição por meio de imagens de satélite.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento espectral de diferentes usos e coberturas do solo na região da Lagoa da Conceição, como forma de validação da correção atmosférica aplicada nas imagens do sensor *Operational Land Imager (OLI) Level 2* de processamento obtidas no repositório do Earth Explorer;
- Calibrar modelos empíricos e semi-empíricos para a estimativa da concentração superficial de clorofila na Lagoa da Conceição;
- Aplicar o modelo calibrado e validado para estimar a distribuição espacial da clorofila na Lagoa da Conceição.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Eutrofização de corpos hídricos

A eutrofização é um fenômeno que ocorre em corpos hídricos e é caracterizada pelo aumento de nutrientes na água, podendo ter suas causas naturais ou artificiais. De acordo com SMITH & SCHINDLER (2009) (apud Barreto, 2013), "a palavra eutrófico significa rico em nutrientes e eutrofização ou eutroficação vem do grego *eutrophein*, que significa bem nutrido".

A eutrofização artificial é de origem antrópica e pode ter diferentes fontes, como o aporte de efluentes domésticos e dejetos humanos, o escoamento da drenagem pluvial de centros urbanos para corpos hídricos, o aporte de efluentes agrícolas com fertilizantes, entre outros. Estes efluentes possuem altas cargas de nitrogênio e fósforo e tais nutrientes fazem com que algumas algas e cianobactérias se desenvolvam de forma mais rápida.

O desequilíbrio de multiplicação em excesso da massa vegetal na água faz com que a luz solar tenha dificuldade de penetrar na coluna d'água, o que afeta o processo de fotossíntese realizado por outros organismos que não estão nas camadas superficiais, podendo causar a morte dos mesmos. Com a morte de organismos fotossintetizantes, há o crescimento de bactérias aeróbias para a decomposição destes organismos, o que faz com que os níveis de oxigênio dissolvido diminuam ainda mais, afetando também a vida de peixes e outros animais aquáticos.

Tendo em vista as consequências da eutrofização de um corpo hídrico, é muito importante que a qualidade da água seja mantida. Diversas metodologias podem ser utilizadas para a análise de um corpo hídrico, como por exemplo, a utilização de comunidades biológicas, chamadas de bioindicadoras, que são sensíveis às variações da qualidade da água. Dentre alguns índices, um bastante utilizado para analisar o nível de estado trófico é o IET (Índice de Estado Trófico), que tem por finalidade classificar corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas ou ao aumento da infestação de macrófitas aquáticas (ANA).

Segundo a CETESB (2017), o cálculo do IET é feito com uma média dos índices de estado trófico relacionados a Clorofila-a e ao Fósforo Total. O índice relativo ao fósforo (IET(PT)) é apontado como uma medida do potencial de eutrofização, uma vez que o nutriente é o

causador do processo. O índice relativo à clorofila (IET(CL)) é traduzido como uma medida da resposta do corpo hídrico, já que a proliferação de algas em excesso é tido como uma consequência dos altos teores de nutrientes na água.

A classificação dos corpos hídricos de acordo com os valores de IET, concentração de clorofila-a e fósforo total é dada na Tabela 1:

Tabela 1 Classificação do estado trófico de ambientes lênticos

Classificação do Estado Trófico			
Categoria (Estado Trófico)	Ponderação	P-total - P (mg.m ⁻³)	Clorofila <i>a</i> (mg.m ⁻³)
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$	$P \leq 8$	$CL \leq 1,17$
Oligotrófico	$47 < IET \leq 52$	$8 < P \leq 19$	$1,17 < CL \leq 3,24$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$	$19 < P \leq 52$	$3,24 < CL \leq 11,03$
Eutrófico	$59 < IET \leq 63$	$52 < P \leq 120$	$11,03 < CL \leq 30,55$
Supereutrófico	$63 < IET \leq 67$	$120 < P \leq 233$	$30,55 < CL \leq 69,05$
Hipereutrófico	$IET > 67$	$233 < P$	$69,05 < CL$

Fonte: CETESB (2017)

Barreto (2013) cita a CETESB para explicar cada categoria de estado trófico apresentado acima. Basicamente, os estados ultraoligotrófico e oligotrófico apresentam uma produtividade bastante baixa e não possuem limitantes por concentração de nutrientes para o uso da água. O estado mesotrófico possui uma produtividade intermediária e começa a apresentar algumas implicações sobre a qualidade da água. Os estados eutrófico e supereutrófico apresentam alta produtividade e baixa transparência, manifestando problemas nos múltiplos usos da água. Por fim, o estado hipereutrófico traz sérios comprometimentos no uso do corpo hídrico, acentuando a mortandade de peixes e afetando até mesmo atividades pecuárias de regiões ribeirinhas.

3.2 Conceitos fundamentais de Sensoriamento

De acordo com Novo (2010), sensoriamento remoto pode ser entendido como uma forma de obtenção de informações sobre eventos, fenômenos, processos ou alvos na superfície da Terra, sem que haja contato direto entre o objeto observado e o sensor. A obtenção de informações por sensoriamento remoto baseia-se no registro e análises de interações da radiação eletromagnética (REM) com as substâncias que compõem os diferentes alvos presentes na superfície terrestre. A

captura da informação de interação da REM com os diferentes alvos terrestres é feita por meio de sensores que captam, processam e transmitem os dados de interesse para estações de coleta localizadas em diferentes pontos da Terra. De maneira geral, o processo de sensoriamento remoto de determinado alvo (objeto) depende dos seguintes fatores: (1) uma fonte de energia eletromagnética; (2) interação da radiação eletromagnética com a superfície terrestre; e (3) Sensor para captação da informação.

Figura 1 Elementos fundamentais no sensoriamento remoto



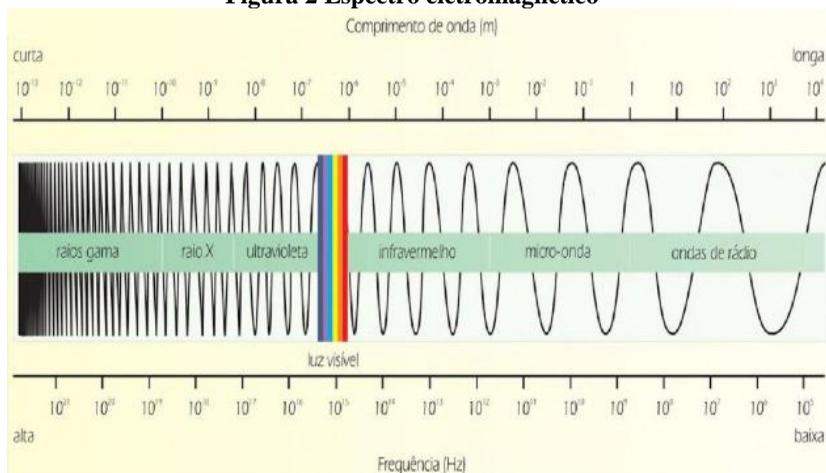
Fonte: Florenzano, 2011.

1. Fonte de energia: Segundo Novo (2010), o Sol é a maior fonte de energia eletromagnética. Portanto, é responsável pela maioria dos comprimentos de ondas eletromagnéticas que chegam na Terra. Contudo, toda a matéria acima da temperatura do zero absoluto também emite energia, podendo ser considerada uma fonte de radiação eletromagnética.
2. Interação da radiação eletromagnética com a superfície: A radiação eletromagnética é uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com a matéria, fazendo com que a energia seja depositada completa ou parcialmente no alvo.
3. Sensor: É através dos sensores que a informação é captada, processada e transmitida. Portanto, conforme cita Souza (2010),

o sensor é quem converte a energia proveniente dos objetos em dados, apresentados usualmente na forma de imagens ou gráficos.

A radiação eletromagnética (REM) pode ser caracterizada em função de seus comprimentos de onda e suas respectivas frequências. O conjunto dos diferentes comprimentos de onda da REM é conhecido como espectro eletromagnético, sendo usualmente apresentados em faixas, como ilustrado na Figura 2:

Figura 2 Espectro eletromagnético



Fonte: Florenzano, 2011.

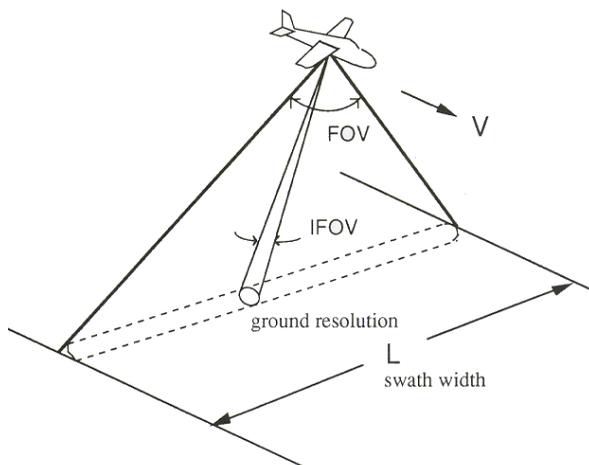
Com relação as grandezas físicas relacionadas ao sensoriamento remoto de alvos na superfície terrestre, podem ser destacadas a irradiância, a radiância e a reflectância. Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), irradiância é a intensidade do fluxo radiante captado no topo da atmosfera, medida pela densidade do fluxo radiante incidente em uma determinada superfície por unidade de área. Já a radiância, é a intensidade média do fluxo radiante que é refletido em uma determinada área, descrevendo a distribuição da radiação no espaço. A radiância é obtida pela razão entre o fluxo radiante refletido por unidade de área projetada e por unidade de ângulo sólido. E, por fim, a reflectância é uma propriedade de um determinado objeto associada a sua capacidade de refletir a radiação eletromagnética sobre ele incidente, sendo usualmente expressa através de fatores de reflectância.

Outros conceitos importantes a serem abordados para o entendimento deste trabalho são as características dos sensores, imagens e outros produtos do sensoriamento remoto. O termo resolução em sensoriamento remoto pode ser entendido em quatro formas: resolução temporal, resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométrica.

A resolução temporal diz respeito ao intervalo de tempo que um sensor obtém imagens de um mesmo local na superfície da Terra, variando de satélite para satélite.

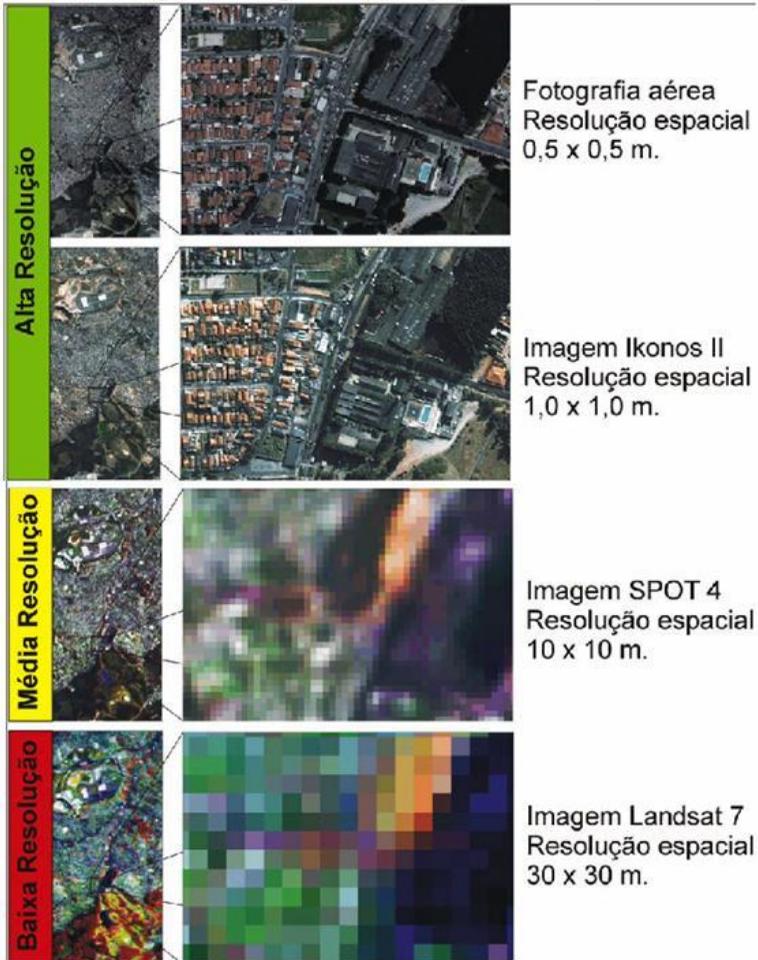
A resolução espacial é definida pela capacidade do sistema sensor em detectar objetos na superfície terrestre; quanto menor o objeto na superfície, maior terá que ser a resolução espacial. A maneira mais comum de se determinar a resolução espacial de um sensor é pelo seu campo instantâneo de visada, chamado IFOV (*Instantaneous Field of View*). Este campo é determinado pelas propriedades geométricas do sistema sensor e define a área do terreno imageado que é observada pelo instrumento sensor de uma dada altitude a um dado momento. Segundo Crósta (1993), o IFOV pode ser considerado uma representação do tamanho do pixel de uma imagem. Abaixo, na Figura 3, têm-se a representação do IFOV. Já a Figura 4, ilustra imagens de diferentes resoluções espaciais, e o impacto da degradação da resolução no poder de discriminar os alvos terrestres.

Figura 3 Representação do IFOV



Fonte: http://sar.kangwon.ac.kr/etc/rs_note/rsnote/cp6/6-2-1.gif. Acesso em 08/10/2018.

Figura 4 Imagens de alta e pequena resolução



Fonte: <http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/resol.html>. Acesso em 08/10/2018.

Para entender a resolução espectral, precisa-se inicialmente citar o conceito de banda espectral. A banda espectral pode ser compreendida como o intervalo que o sensor consegue registrar a informação entre dois comprimentos de onda no espectro eletromagnético. Um sensor com alta resolução espectral é capaz de registrar a informação em um maior número de bandas. Para explicar melhor este conceito, Crósta

(1993) utiliza o exemplo de duas fotografias tiradas de um mesmo objeto, uma em preto e branco e outra colorida. A foto preta e branca representa o objeto em apenas uma banda espectral, enquanto a foto colorida representa o mesmo objeto em três bandas espectrais: vermelha, azul e verde; que quando combinadas por superposição, mostram o objeto em cores. Sendo assim, quanto maior o número de bandas espectrais e menor a largura do intervalo de comprimento de onda coberto pela banda espectral, maior será a resolução espectral de uma imagem e seu poder de discriminar alvos.

A resolução radiométrica é dada pelo número de níveis digitais representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de níveis, maior é a resolução radiométrica. Para entender melhor este conceito, pensemos em uma imagem com apenas 2 níveis (branco e preto) em comparação com uma imagem com 32 níveis de cinza entre branco e preto. Obviamente, a quantidade de detalhes perceptíveis na segunda imagem será maior do que na primeira, portanto a segunda imagem terá uma melhor resolução radiométrica.

O número de níveis é comumente expresso em função do número de dígitos binários ("bits") necessários para armazenar em forma digital o valor do nível máximo. O valor em bits é sempre uma potência do número 2; desse modo, "6 bits" quer dizer que $2^6 = 64$ níveis.

Segundo Brys (2018), as imagens dos satélites possuem distorções geométricas, que podem acontecer devido a rotação da Terra ou à própria curvatura da Terra, ou devido ao arrastamento da imagem durante a varredura mecânica. Além disto, Ponzoni e Shimabukuro (2007) apontam que cada banda espectral possui uma forma de interpretar as informações de radiância detectados, e por este motivo, não se pode comparar os números digitais de uma banda espectral com os valores digitais de outra. Para isto, os números digitais devem ser transformados em Reflectância aparente, a qual as propriedades espectrais são expressas em Fatores de Reflectância, chamados de FRBs. Esta transformação de número digital para FRB faz com que seja possível realizar operações aritméticas com os dados de imagens de bandas diferentes. Porém, os FRBs tem efeitos da atmosfera intrínsecos, que precisam ser eliminados ou minimizados para realização da caracterização espectral de um objeto.

Sendo assim, para a análise das imagens de determinada região obtidas por sensoriamento remoto, faz-se necessário realizar a calibração ou o pré-processamento das mesmas, de forma a excluir ou minimizar os problemas citados acima. Desta forma, destacam-se três

correções: o georreferenciamento, a correção atmosférica e a calibração radiométrica. Todas estas correções já estão realizadas quando se adquire imagens de nível 2 da Coleção 1 do Landsat, através do site Earth Explorer do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

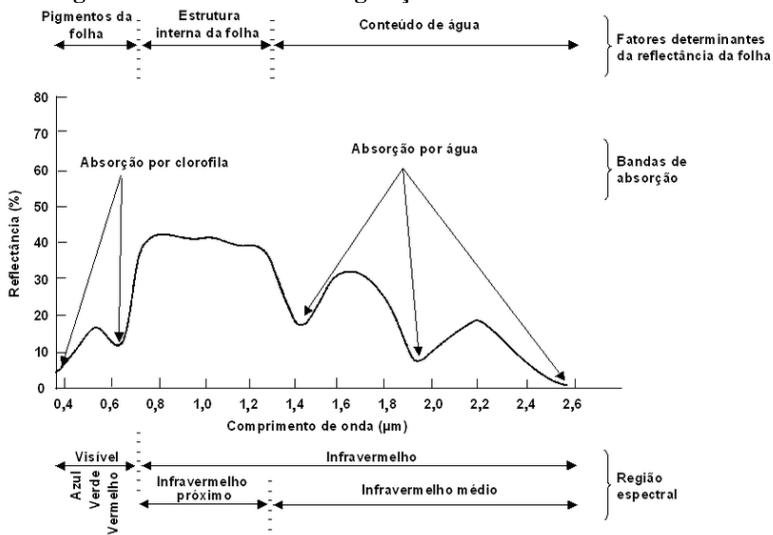
3.3 Comportamento espectral dos objetos

Como já mencionado acima, a energia eletromagnética desenvolve algumas interações ao entrar em contato com os objetos da superfície da Terra. De maneira geral, esta energia pode ser absorvida, refletida ou transmitida pelos objetos, e o que determina a fração de uma destas interações são as características físico-químicas do mesmo. Desta forma, o comportamento espectral dos objetos diz respeito a captação pelo sensor de como cada substância do alvo reflete a radiação eletromagnética nela incidida. Conforme Rudorff (2018) explica, estes estudos propiciam definir adequadamente as bandas espectrais para cada tipo de alvo. A seguir, são apresentados os comportamentos típicos dos principais tipos de alvos estudados em sensoriamento remoto.

3.3.1 Vegetação

Na Figura 5, é representada a curva espectral média da vegetação fotossinteticamente ativa. Como pode-se observar, a curva é dividida em 3 regiões: região visível (azul, verde e vermelho); região infravermelho próximo; e região infravermelho médio. Cada região possui fatores dominantes que caracterizam a reflectância da vegetação.

Figura 5 Curva média da vegetação fotossinteticamente ativa



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Curva-tipica-de-reflectancia-da-vegetacao-Adaptado-de-Rizzi-2004_fig1_301553045. Acesso em 08/10/2018.

Novo (2010) nos dá a seguinte explicação da Figura 5:

- na região da luz visível, do comprimento de onda 0 a $0,7\mu\text{m}$, a reflectância é baixa, caracterizada pela absorção da radiação incidente pelos pigmentos da planta (em $0,48\mu\text{m}$ pelos carotenóides e em $0,64\mu\text{m}$ pela clorofila). Os maiores valores na faixa de luz visível ficam no comprimento de onda próximo a $0,56\mu\text{m}$, que diz respeito à reflectância responsável pela cor verde da vegetação;
- na região de infravermelho próximo, há uma alta reflectância da vegetação de $0,7\mu\text{m}$ a $1,3\mu\text{m}$ devido à interferência da estrutura celular (estrutura do mesófilo);
- na região do infravermelho médio, nos comprimentos entre $1,3\mu\text{m}$ a $2,5\mu\text{m}$, os máximos de reflectância dizem respeito ao conteúdo de água nas folhas, enquanto que os vales são causados pela absorção da energia incidente pela água.

Apesar disso, vale ressaltar que segundo Novo (2010), o comportamento espectral da vegetação pode variar ao longo de seu ciclo vegetativo, com a região do espectro, com o tipo de cultura e com o ângulo de visada do sensor.

3.3.2 Solo

Segundo Moraes (2002), o que define o comportamento espectral dos solos são seus constituintes minerais e orgânicos, além de fatores como a umidade e granulometria. Como o solo é uma mistura complexa de diferentes elementos físicos e químicos, é difícil que haja uma curva espectral típica. No entanto, Novo (2010) apresenta na Tabela 2 as faixas espectrais sugeridas para cada interesse de estudo das propriedades do solo.

Tabela 2 Regiões do espectro mais adequadas ao estudo de propriedades físico-químicas de solos

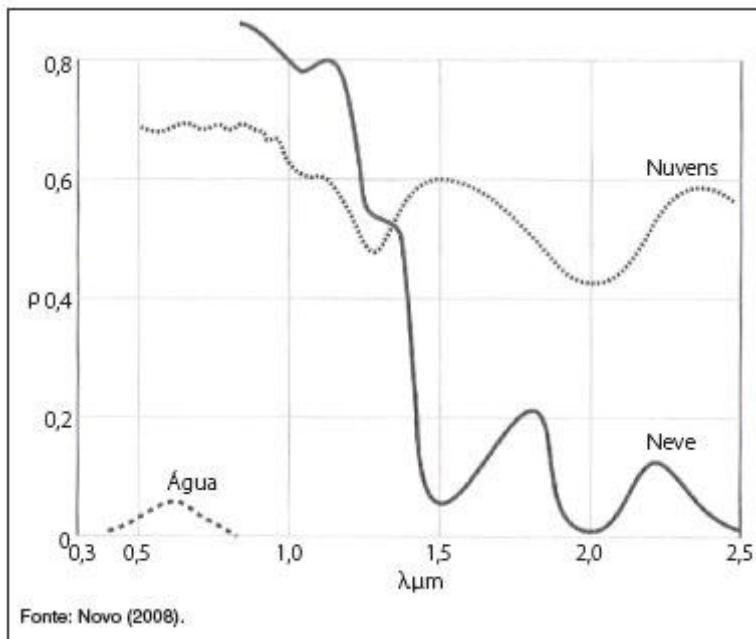
Regiões Espectrais	Propriedades
0,57 μm	Monitoramento de matéria orgânica em solos sem cobertura vegetal
0,7 μm e 0,9 μm	Monitoramento do conteúdo de compostos de ferro férrico
1,0 μm	Monitoramento do conteúdo de compostos de ferro ferroso
2,2 μm	Monitoramento de umidade do solo

Fonte: Novo (2010)

3.3.3 Água

A água tem como característica sua apresentação na natureza sob três estados físicos: água líquida, água em forma de neve e água em forma de nuvens. Estes três estados físicos apresentam comportamentos espectrais distintos, como pode ser visto na Figura 6:

Figura 6 Comportamento espectral da água em seus diferentes estados físicos



Fonte: NOVO (2010)

Conforme Novo (2010) apresenta, a água em seu estado líquido possui curva espectral na faixa da luz visível e em parte no infravermelho próximo. Há uma baixa reflectância, o que indica uma alta absorção da radiação incidente de ondas com comprimento acima de $0,7 \mu\text{m}$. Em forma de nuvens, a água possui uma alta reflectância em todos os comprimentos de onda incidentes. E a água em forma de neve, apresenta elevada reflectância na faixa de infravermelho próximo, entre $0,7 \mu\text{m}$ e $1,2 \mu\text{m}$, decrescendo em um gradiente altíssimo após esta.

Tais comportamentos são dados na água pura, porém, a medida que adicionam-se outros constituintes, o comportamento espectral da água é alterado por conta dos chamados componentes opticamente ativos (COAs). Novo (2010) diz que estes componentes podem ser organismos vivos (fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton); partículas em suspensão orgânicas e inorgânicas, ou partículas orgânicas dissolvidas.

Os componentes opticamente ativos influenciam nas propriedades ópticas aparentes e inerentes da água. As Propriedades Ópticas Inerentes

(POI) dependem exclusivamente do tipo de substâncias e suas concentrações contidas no meio (ALCÂNTARA et. al, 2013). São estas propriedades que definem o quanto a luz será absorvida ou espalhada na superfície. Rêgo (2017) define a absorção ou absorbância como a representação da fração de energia eletromagnética que é absorvida pelos componentes opticamente ativos presentes no corpo hídrico, o que gera certo decaimento do fluxo incidente de luz ao longo do caminho óptico. Já o processo de espalhamento, é determinado como a fração da luz incidente que é espalhada no volume de água. A soma destes dois processos define a perda total de luz, que é chamada de atenuância.

Já as Propriedades Ópticas Aparentes (POA) além de dependerem da concentração e composição do meio, também dependem da distribuição angular do campo de luz radiante. Estas propriedades determinam o que chamamos de radiância, irradiância e reflectância de superfície.

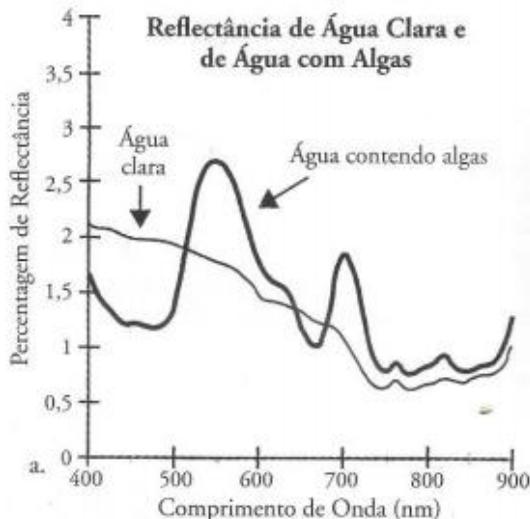
Morel & Prieur (1977) apud Alcântara et. al (2013) e apud Rêgo (2017), classificam os corpos hídricos superficiais em dois tipos: o Caso I e o Caso II. Segundo os autores, as águas do Caso I são aquelas mais profundas e de oceano aberto, sendo que suas características ópticas são influenciadas principalmente pela concentração de fitoplâncton. Já as águas do Caso II, são aquelas mais rasas, representando águas costeiras, estuarianas, de rios, lagos ou reservatórios. Neste caso, as propriedades ópticas da água são também influenciadas pelo fitoplâncton, mas também há influência de outros COAs, como por exemplo, a matéria orgânica dissolvida e sedimentos em suspensão.

3.4 Estimativa da concentração de clorofila utilizando Sensoriamento Remoto

De acordo com Kondratyev et al. (2003, apud Ventura, 2013), a análise da qualidade da água por meio de sensoriamento remoto está relacionado com a análise de substâncias que afetam a coloração e transparência da água, como por exemplo, matéria orgânica em suspensão, matéria orgânica dissolvida ou pigmentos de algas. Por este motivo, a radiação eletromagnética que emerge da água pode ajudar na estimativa de concentração destes componentes. Koponen et al. (2001, apud Londe, 2008) diz que a análise da concentração de clorofila-a pode representar bem o nível de produtividade total de um corpo hídrico e por consequência, corresponde a carga indesejada de nutrientes e às condições do ecossistema aquático, sendo assim um bom indicador da qualidade da água.

Jensen (2010) apresenta uma análise espectral da água clara e da água contendo algas na região da luz visível na Figura 7, onde é possível observar as diferenças do espectro de reflectância nos dois casos. Três situações recebem destaque na curva da água contendo algas: a absorção da luz pela clorofila-a na região da luz azul (entre 400 e 500nm); o pico de reflectância da clorofila-a na luz verde (entre 500 e 600nm) já esperado; e a absorção da luz vermelha pela clorofila-a próximo ao comprimento 675nm.

Figura 7 Análise espectral da água clara e da água contendo algas



Os modelos utilizados para estimar parâmetros de qualidade da água a partir de imagens de satélite (p.ex. concentração de clorofila-a) são conhecidos como modelos bio-ópticos, e podem ser definidos como modelos que utilizam da teoria da transferência radiativa para derivar as propriedades ópticas dos COAs presentes na coluna d'água (MISHRA et al., 2017).

Vilela (2010) e Demarco (2018) analisaram a concentração de clorofila-a através de imagens de satélite. Nos dois trabalhos, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5 e Landsat 7 com datas que correspondiam ao mês de análises de clorofila-a feitas a partir de amostras coletadas em campo. Conforme expresso por Jensen (2010) no anteriormente, a banda espectral mais adequada para a análise de clorofila é a banda do verde. Assim, com as imagens já pré-processadas,

os autores analisaram os valores de reflectância na banda verde das imagens, especificamente nos pixels que representavam os pontos de coleta em campo, e compararam com os valores obtidos nas coletas in situ. Análises de regressão foram feitas a fim de verificar a relação entre as variáveis e o melhor ajuste de equação para a estimativa da clorofila-a. Vilela (2010) aplicou a função polinomial na análise de outra imagem com data em que não haviam dados de coletas de campo disponíveis, e os resultados obtidos de concentração de clorofila foram satisfatórios. Demarco (2018) diz que a correlação entre os dados medidos em campo e seus dados obtidos por sensoriamento remoto foi mediana.

Martini et al. (2006), em um estudo na Lagoa da Conceição (SC), correlacionaram dados medidos em campo com dados de reflectância adquiridos pelo sensor *Thematic Mapper* (TM) do Landsat 5. A imagem foi georreferenciada, realizada correção atmosférica e transformados seus níveis de cinza em dados de reflectância relativa. Os dados de clorofila a medidos em cinco pontos amostrais no campo foram correlacionados de maneira empírica com os dados de sensoriamento remoto através de técnicas de regressão múltipla. O melhor resultado ($R^2 = 0,96$) deu-se pela relação entre valores de reflectância obtidos nas bandas 1 e 2 do sensor Landsat 5 (banda azul e verde, respectivamente). Quanto feito uma regressão entre os valores medidos em campo e os valores obtidos de reflectância, a equação encontrada foi aplicada em outras áreas da Lagoa da Conceição e segundo os autores, os resultados foram satisfatórios.

Brezonik et al. (2005) comentam que equações de regressão são comumente utilizadas para prever a qualidade da água através de dados coletados pelos satélites da missão Landsat. Em seu trabalho realizado em 15 lagos da região centro-leste de Minnesota nos Estados Unidos, foram testadas diversas correlações entre os dados de clorofila medidos em campo e a reflectância das bandas do sensor. Os melhores ajustes foram para as bandas do verde ($R^2 = 0,76$) e do vermelho ($R^2 = 0,73$), mas as equações não ajustaram bem os valores de clorofila menores que 5mg/m^3 . Também foram utilizadas razões entre bandas e correlacionados com valores de $\ln([cl-a])$, sendo que a melhor relação deu-se entre a banda do azul e a banda do vermelho ($R^2 = 0,88$).

Os autores citados utilizaram de modelos empíricos e semi-empíricos para chegarem às suas conclusões. Ambos modelos baseiam-se em dados de análises in situ de componentes opticamente ativos e dados obtidos através de técnicas de sensoriamento remoto, criando relações estatísticas entre esses. O modelo empírico utiliza de uma variedade de combinações de valores de reflectância em diferentes

comprimentos de onda, buscando aquele que trará melhor correlação com os dados de análises em campo, não necessariamente seguindo algum princípio físico. Já os modelos semi-empíricos, são fundamentados em características espectrais específicas de cada componente opticamente ativo para selecionar as bandas de sua análise (MISHRA et. al., 2017). Como exemplo de modelo semi-empírico, podemos citar o caso de Demarco (2018) e Vilella (2010), que utilizaram o pico de reflectância que a clorofila apresenta na banda verde para realizar suas análises.

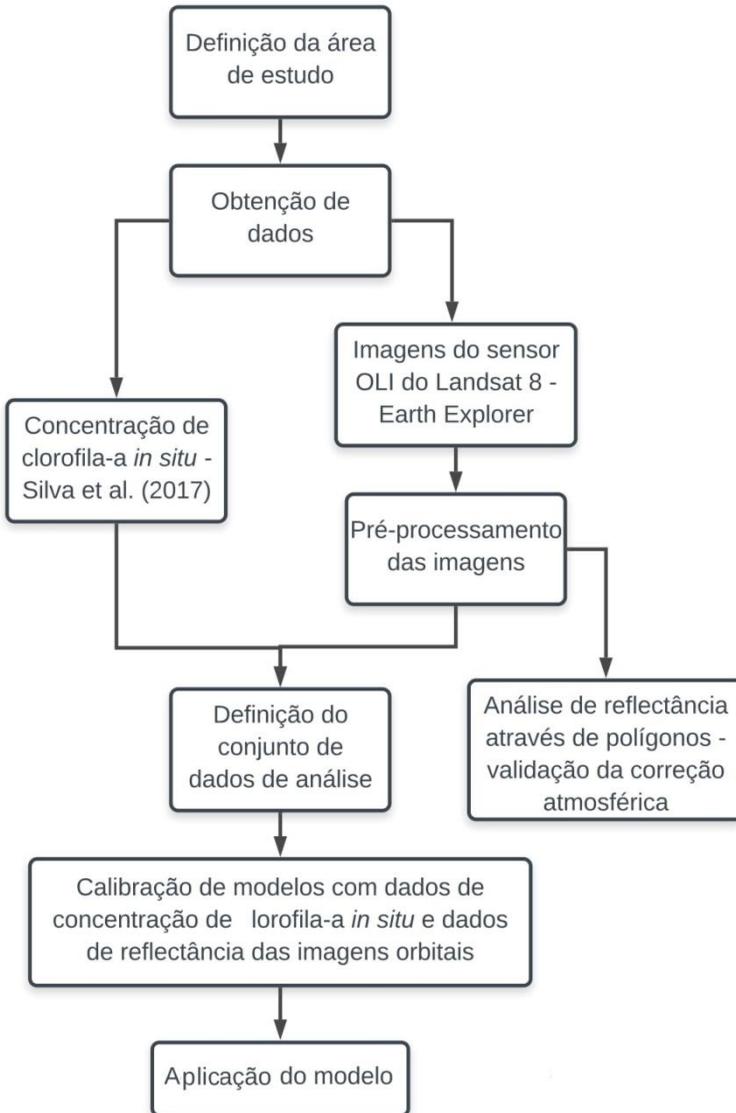
A desvantagem destes modelos, conforme Carvalho et. al. (2013) citam, é que águas estuarinas e águas interiores podem apresentar grande variedade de componentes opticamente ativos, como clorofila, matéria orgânica dissolvida ou em suspensão, entre outros. Estes componentes variam de forma independente entre si, o que pode causar uma resposta espectral bastante complexa, em que certos elementos podem interferir na resposta espectral da clorofila, dificultando o ajuste dos modelos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Fluxograma

Para melhor elucidar as fases deste estudo, a Figura 8 traz um fluxograma da elaboração deste trabalho. Cada fase será melhor detalhada nos tópicos que seguem

Figura 8 Fluxograma de atividade



Primeiramente, foi caracterizada a área de estudo como forma de se conhecer melhor as particularidades do ambiente de análise. A partir disto, foi feita uma busca de dados de concentração de clorofila-a e

imagens de satélite com datas próximas às datas de coleta em campo. Com estes dados, foi possível realizar testes e definir quais conjuntos de dados amostrais poderiam ser trabalhados.

Antes de iniciar as análises, foram feitos alguns ajustes nas imagens, como a aplicação do fator de correção da reflectância. Também foi criada um shape delimitando os limites da lagoa, para que as operações entre bandas que seriam realizadas nas calibrações dos modelos não fossem aplicadas à imagem inteira, somente na área de interesse da Lagoa da Conceição.

Com as imagens de satélite pré-definidas, foram criados polígonos representativos das feições que representavam vegetação, oceano, área urbana e lagoa para comparar as reflectâncias com a bibliografia. Isto foi feito como forma de validação da correção atmosférica aplicada pelo site de origem das imagens.

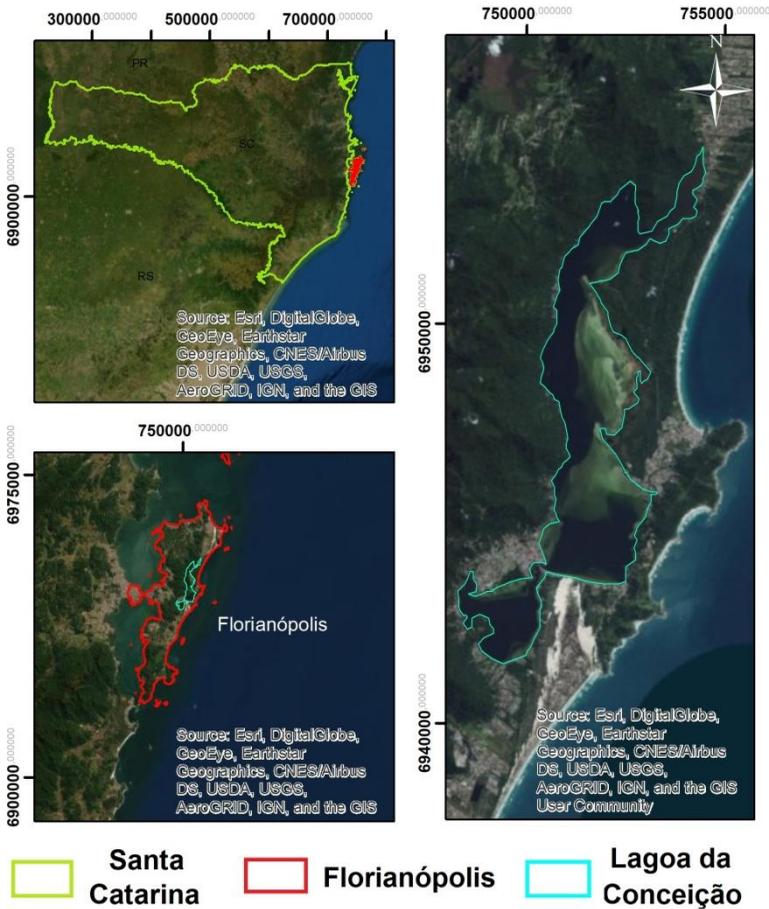
Após isto, iniciaram-se os ajustes de modelos obtidos em literatura e análise de quais obtiveram o melhor desempenho na área de estudo. O modelo com melhor performance segundo os critérios pré-definidos, foram aplicados às imagens de análise, gerando mapas de concentração de clorofila-a para toda a área de lagoa.

4.2 Área de estudo

A Lagoa da Conceição está localizada na ilha de Santa Catarina, a poucos quilômetros do centro de Florianópolis. Ela é disposta no sentido Norte-Sul, com largura variando de 200 até 2500 metros e área total de 19,2 km². Porto Filho (1993) apud Silva et al. (2017) diz que metade da área da Lagoa da Conceição possui profundidade menor que 2 metros.

Apesar do nome, a Lagoa da Conceição é na verdade a maior laguna de Florianópolis, possuindo a ligação com o mar situada no Canal da Barra, que tem aproximadamente 2,8 km de extensão e largura variável entre 20 e 40 metros. O corpo lagunar da lagoa em si é limitado a oeste por morros, com altitudes entre 400 e 500 metros, e a leste por restingas e por um morro rochoso com altitude de 200 metros. Já ao Sul do espelho d'água, encontra-se a maior área de dunas do estado de Santa Catarina (SILVA, 2013). Abaixo segue um mapa de localização da área.

Figura 9 Localização da área de estudo

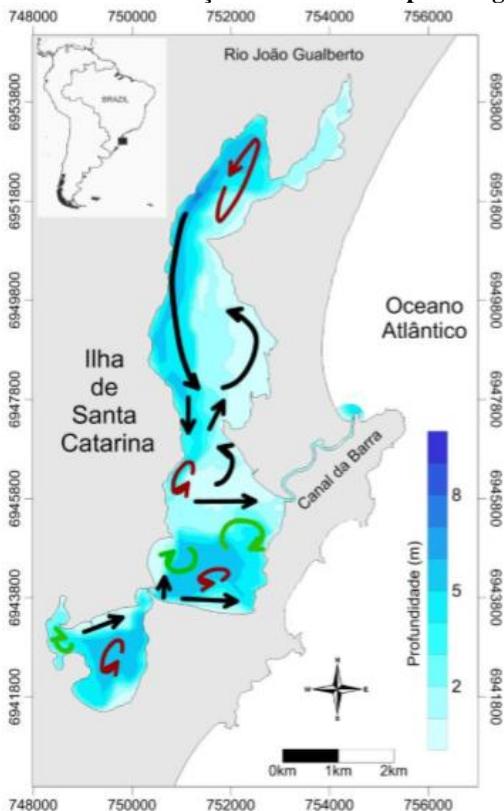


Os recursos hídricos de água doce que alimentam a Lagoa possuem três origens: contribuição das precipitações pluviométricas (águas das chuvas), dos riachos situados a oeste da Lagoa, e das vazões dos rios Vermelho e João Gualberto. Segundo Odreski (2012), os dois rios citados destacam-se por representarem 20% de toda zona de contribuição hidrológica não alagada da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. Esta configuração faz com que o escoamento do corpo hídrico seja no sentido Norte-Centro e Sul-Centro, para então seguir

para o Canal da Barra em direção ao oceano, como demonstrado pelas setas pretas na Figura 10.

A hidrodinâmica da Lagoa da Conceição é explicada por Silva et al. (2017a) também através da Figura 10. Os autores citam Gómez (2008) e Silva (2013) quando dizem que há no corpo hídrico o que chama-se de giros ciclônicos e anticiclônicos. Os giros ciclônicos (setas em verde) atuam mais ao sul em pequenas profundidades, ressurgindo à superfície nutrientes dissolvidos que estavam no fundo da lagoa. Ao contrário, os giros anticiclônicos (setas em vermelho) atuam em grandes profundidades, e levam ao fundo da lagoa os nutrientes e materiais particulados que estavam presentes na superfície.

Figura 10 Padrão de circulação residual do corpo da lagoa



Fonte: Silva et al. (2017)

Contudo, o local é um dos pontos turísticos mais conhecidos da cidade, e reúne múltiplas atividades de distintas naturezas, agradando tanto quem gosta da vida noturna quanto quem gosta de aproveitar suas belezas naturais na luz do dia. Além de turistas, a Lagoa da Conceição também atrai os olhos de pessoas que desejam morar no local ou nas proximidades. Segundo o IBGE (2010), a Lagoa e a Barra da Lagoa contam com pouco mais de 10 mil moradores, e como Campanario (2007) apud Silva et al. (2017a) indica, a população urbana do local cresceu mais de 90% no período de 2001 a 2015. Apesar disto, a população atendida por esgotamento sanitário é de apenas 15% (MPB Engenharia, 2008, apud SILVA et al., 2017).

O corpo lagunar também está situado em uma zona de transição entre ambientes marinhos e fluviais, terrestres e aquáticos; e por este motivo, é uma zona muito sensível às influências que o homem pode causar (KRUG e NOERNBERG, 2005, apud GODOY, 2009). Rodrigues (1990) retratou que a ocupação humana e exploração dos recursos naturais pelas atividades pesqueiras, agro-pecuárias e turísticas trouxe conseqüências à Lagoa da Conceição, que desde então vem sendo vítima dos constantes lançamentos de cargas poluentes principalmente de origem sanitária. E como resultado de seu estudo feito, Silva et al. (2017a) apontam que há uma forte influência antrópica na qualidade da água na Lagoa da Conceição, o que levou a classificação do ambiente como eutrófico no ano de 2015.

4.3 Obtenção de dados *in situ* - Análises de concentração de clorofila-a

Inicialmente, foi disponibilizado pelo doutorando Victor Eduardo Cury Silva, do Laboratório de Hidráulica Marítma (LAHIMAR) da UFSC, um banco de dados de concentração de clorofila na Lagoa da Conceição. O banco de dados faz parte do trabalho realizado por Silva et al. (2017- a e b) ao longo dos anos de 2001, 2003, 2005, 2007 e 2015. O arquivo disponibilizado continha cerca de 32 análises em cada ano, com sua respectiva data, profundidade da amostra, coordenada do ponto e valor de concentração de clorofila obtido.

Conforme Silva et. al. (2017b) apontam, as amostras foram coletadas em diferentes profundidades, sendo armazenadas em caixa térmica até serem filtradas em laboratório com microfibras de vidro 47mm GF-5. Após isto, as amostras foram congeladas até o momento de análise, a qual foi feita através do método de fluorimetria.

Destes dados, foram selecionadas as análises do ano de 2015 do banco de dados do doutorando Victor, por se tratarem de análises em

mais de uma data no ano e com uma boa amplitude nos valores de concentração de clorofila, o que possibilita uma melhor calibração e validação de modelos. Além do mais, são dados mais recentes e que viabilizam a utilização de imagens de um sensor que ainda está ativo, como o OLI (*Operational Land Imager*) do satélite Landsat-8. Os dados de análise de concentração de clorofila utilizados para o presente trabalho são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3 Dados de análise de concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição em 2015

Data	Profundidade	Latitude	Longitude	Identificação	[cl-a] - mg/m ³
19/08/2015	Superfície	-27,6146	-48,4781	P1	5,72
19/08/2015	Superfície	-27,6153	-48,4703	P2	5,34
19/08/2015	Superfície	-27,6011	-48,4578	P3	3,40
19/08/2015	Superfície	-27,5426	-48,4594	P4	4,32
19/08/2015	Superfície	-27,5313	-48,4513	P5	5,94
19/08/2015	Superfície	-27,5955	-48,4487	P6	5,82
27/08/2015	Superfície	-27,6146	-48,4781	P1	4,00
27/08/2015	Superfície	-27,6153	-48,4703	P2	3,74
27/08/2015	Superfície	-27,6011	-48,4578	P3	2,72
27/08/2015	Superfície	-27,5426	-48,4594	P4	3,02
27/08/2015	Superfície	-27,5955	-48,4487	P5	4,07
27/08/2015	Superfície	-27,5313	-48,4513	P6	2,97
28/09/2015	Superfície	-27,6105	-48,4650	P7	2,52
28/09/2015	Superfície	-27,6017	-48,4589	P8	2,31
28/09/2015	Superfície	-27,6153	-48,4786	P9	6,57
28/09/2015	Superfície	-27,6017	-48,4459	P10	3,43

Apesar de saber que analisar os dados de verão seria mais promissor, os dados fornecidos por Silva et al. (2017) não continham amostras dos meses desta estação. Sendo assim, os ajustes serão realizados para os meses que constam na Tabela 3.

4.4 Obtenção de dados orbitais - Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens de satélite disponibilizadas sob demanda, através do site Earth Explorer

(<https://earthexplorer.usgs.gov/>). O site disponibiliza toda a Coleção 1 do Landsat, que é uma estrutura que fornece ao usuário produtos que atendem a critérios de qualidade geométrica e radiométrica. Dentro da coleção, há as imagens de Nível 2, que dentre outras vantagens, já apresentam as medidas de radiação solar recebida que é refletida da superfície da Terra para o sensor, chamada de Reflectância de Superfície. Segundo o próprio site menciona, a reflectância de superfície atende melhor aos critérios de comparações entre múltiplas imagens sobre a mesma região, pois leva em conta todos efeitos atmosféricos da data de aquisição da imagem. O site da USGS informa que as correções atmosféricas aplicadas nas imagens de Nível 2 da Coleção 1 do satélite Landsat 8 são geradas através do Código de Refletância de Superfície Landsat (LaSRC).

As imagens possuem resolução temporal de 16 dias e resolução radiométrica de 12 bits. Outras características são mostradas na tabela abaixo:

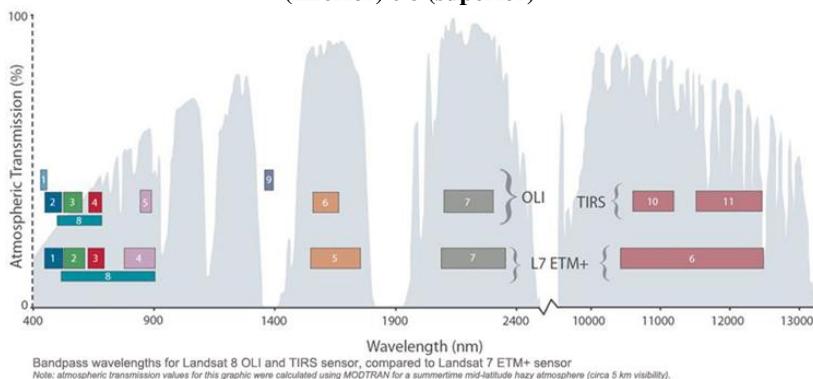
Tabela 4 Principais características dos sensor OLI a bordo do Landsat 8

Bandas espectrais	Resolução espectral	Resolução espacial
(B1) Costal	0.433 - 0.453 μm	30 m
(B2) Azul	0.450 - 0.515 μm	30 m
(B3) Verde	0.525 - 0.600 μm	30 m
(B4) Vermelho	0.630 - 0.680 μm	30 m
(B5) Infravermelho próximo	0.845 - 0.885 μm	30 m
(B6) Infravermelho médio	1.560 - 1.660 μm	30 m
(B7) Infravermelho médio	2.100 - 2.300 μm	30 m
(B8) Pancromático	0.500 - 0.680 μm	15 m
(B9) Cirrus	1.360 - 1.390 μm	30 m

Fonte: Adaptado de EMBRAPA (2019)

A ilustração abaixo mostra os comprimentos de onda do Landsat 5 e 7 (posição inferior) em comparação às do Landsat 8 (posição superior). Na imagem é possível ver a correspondência entre as bandas espectrais dos satélites.

Figura 11 Comparação entre as bandas espectrais dos satélites Landsat 5, 7 (inferior) e 8 (superior)



Fonte: Site Engesat <<http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/landsat-8/>>. Acesso em 4 de julho de 2019.

As imagens foram solicitadas no site utilizando os seguintes critérios: mínima cobertura de nuvens na cena em estudo (Lagoa da Conceição) e com datas mais próximas possível das análises de clorofila realizadas em campo. As imagens selecionadas de acordo com estes critérios foram as das seguintes datas: 28/07/2015, 29/08/2015, 14/09/2015 e 23/09/2015. Até o ano de 2016, não foi encontrada outra imagem que não possuísse cobertura de nuvens na área da Lagoa da Conceição.

4.5 Pré-processamento de imagens

Antes de realizar qualquer análise nas bandas espectrais da imagem do Landsat 8, foi aplicado o fator de escala em todas as bandas. O fator de escala fornecido pelo Guia de Produto do Landsat 8 (USGS, 2018) é de 0,0001 para todas as bandas, e o mesmo é aplicado afim de que fiquem padronizados os valores de reflectância de superfície, sem valores discrepantes. Como é um parâmetro que relaciona a radiância e a irradiância da superfície, não possui unidades e deve apresentar valores entre 0 e 1. O fator de escala foi aplicado a cada banda das imagens selecionadas previamente através da ferramenta *Raster Calculator* do ArcGis.

Como forma de facilitar o processamento no ArcGis, foi feito também uma máscara de água por meio da técnica de fatiamento de histograma. Primeiramente, foi observado os valores de reflectância da

Lagoa da Conceição na banda 5 (infravermelho próximo) através da ferramenta *Identify* do ArcGis. A banda 5 apresenta alto contraste entre solo e corpos d'água, o que justifica sua utilização pois facilita este mapeamento. Desta forma, foi possível constatar que as feições da lagoa possuíam reflectância máxima de 0,01, enquanto as outras feições da imagem, possuíam reflectância maiores que 0,01.

Por meio do comando *Reclassify* do ArcGis, os dados de reflectância foram reclassificados, fazendo com que valores menores que 0,01 fossem mascarados com cor diferente de outras feições que apresentassem reflectância maior que 0,01. Esta máscara separou de forma prática os pixels que pertenciam à lagoa dos pixels que pertenciam a outras feições. A máscara foi transformada em polígono dos limites da lagoa através da ferramenta de conversão *Raster to Polygon*. Esta ação auxiliou na rapidez do processamento das ferramentas no ArcGis para calibrar e aplicar os modelos, uma vez que a área de análise tornou-se menor do que quando utiliza-se a imagem inteira no processamento.

4.6 Análise de dados de reflectância

Como a correção atmosférica das imagens já é realizada pela USGS, fornecedora das imagens, foi conduzida uma análise dos espectros de reflectância de alvos representativos como forma de validação desta correção. Para isto, este trabalho baseou-se em Demarco (2018), que criou polígonos representativos de cada alvo (vegetação, áreas urbanas, lagoa e oceano) para que fossem obtidos valores médios de reflectância de cada banda de interesse das imagens. Em seu trabalho, Demarco (2018) analisou as bandas do visível (azul, verde e vermelho) e do infravermelho próximo, as quais foram analisadas neste trabalho também. Os dados de reflectância de cada alvo em cada banda de interesse da imagem foram transportados para o *Microsoft Excel* afim de criar gráficos para análise de comportamento espectral de cada alvo. Para validação, estes gráficos foram comparados aos comportamentos registrados em bibliografia consagrada.

4.7 Definição de dados amostrais para calibração de modelos

Apesar da maioria das literaturas deste trabalho selecionarem seus dados de análise utilizando o critério de proximidade de datas de análise *in situ* e dados espectrais, nem sempre isto é o suficiente. De um

dia para o outro, a lagoa pode ter recebido um aporte de água da chuva maior que o normal, o que pode mudar a percepção através de imagens de satélite dos componentes opticamente ativos. Por este motivo, buscou-se calibrar um modelo simples com todos os dados de coleta *in situ* e todas as imagens selecionadas para análise, como uma forma de definição de um conjunto de dados que melhor relacionasse os dados espectrais com os dados de análise *in situ*.

O modelo escolhido para calibração foi o de Gitelson et. al. (1993), o qual foi desenvolvido a partir de uma base de dados de variadas concentrações de clorofila-a de lagos da Europa. Primeiramente, o modelo dedica-se a encontrar em qual comprimento de onda do espectro a variação da concentração de clorofila-a influenciava mais na reflectância. Desta análise, foi verificado através de uma normalização que a razão entre a banda do infravermelho próximo com a banda do vermelho possuía uma boa correlação com os valores de concentração de clorofila-a. Por possuir uma boa correlação e pela simplicidade apresentada nas variáveis, o modelo de Gitelson et al. (1993) pareceu bastante satisfatório para testar o melhor conjunto de dados para a análise deste trabalho.

Após a definição do modelo, foram extraídos todos os valores de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho próximo (bandas 4 e 5) de todas as imagens selecionadas para a análise, nos pontos definidos de coleta *in situ*. Estes valores foram postos em uma tabela no *Microsoft Excel*, de forma a serem feitas regressões lineares entre os valores de concentração de clorofila-a (valores de Y) e os valores de reflectância obtidos pelo ArcGIS (valores de X).

Em cada regressão, foi analisado o R^2 ajustado da equação, que representa a porcentagem de variação dos valores que Y que são explicadas pelo modelo, ajustado para o número de variáveis do modelo em relação ao número de observações. O conjunto de dados que apresentaram valores de R^2 ajustado maior que 0,7 foram selecionados para o ajuste de outros modelos mais complexos.

4.8 Ajuste dos modelos bio-ópticos

Após a etapa de processamento, verificação da correção atmosférica e seleção de dados amostrais, foram selecionados alguns modelos para a estimativa da concentração de clorofila já existentes na literatura para serem avaliados na Lagoa da Conceição. A Tabela 4

apresenta modelos existentes na literatura que foram testados neste trabalho.

Tabela 5 Modelos para estimativa da concentração de clorofila

Referência	Modelo	Intervalo espectral
Giardino et al. (2001)	$[chl - a] \propto (11,18 \times TM1) - (18,96 \times TM3) - 3,28$	TM1 = 0,45 a 0,52 μm TM3 = 0,63 a 0,69 μm
Brezonik et al. (2005)	$\ln[chl - a] \propto 6,71 + (0,0537 \times TM1) - (1,559 \times \left(\frac{TM1}{TM3}\right))$	TM1 = 0,45 a 0,52 μm TM3 = 0,63 a 0,69 μm
Martini et al. (2006)	$[chl - a] \propto (735,98 \times TM1) - (425,88 \times TM2) - 60,20$	TM1 = 0,45 a 0,52 μm TM2 = 0,52 a 0,60 μm
Gitelson et al. (2008) - Modelo 2 bandas	$[chl - a] \propto \left(\frac{TM1}{TM2}\right)$	TM1 = 0,45 a 0,52 μm TM2 = 0,52 a 0,60 μm
Mishra e Mishra (2012) - NDCI	$[chl - a] \propto \frac{R_{sr}(708) - R_{sr}(665)}{R_{sr}(708) + R_{sr}(665)}$	Intervalo utilizado no espectrofotômetro, 708 corresponde ao infravermelho próximo e 665 corresponde ao vermelho.

Os modelos acima foram selecionados a partir de uma ampla pesquisa sobre o tema, buscando além de um bom resultado, uma simplicidade na escolha das variáveis. Por conta do baixo número de coletas *in situ* no ano de 2015, este trabalho não teria um bom ajuste com equações que envolvessem mais de duas variáveis.

Lembrando que todos os modelos acima não foram criados especificamente para as bandas do sensor OLI do Landsat 8, então foram selecionadas as bandas posicionadas mais próximas dos comprimentos de ondas utilizados em cada um dos modelos.

Os modelos selecionados foram então ajustados a partir dos conjuntos de dados amostrais definidos no item anterior.

Como pode-se observar, cada modelo possui um coeficiente diferente multiplicando o valor da reflectância de bandas definidas. Estes coeficientes não estão ajustados ao local de estudo deste trabalho, então foi realizado uma regressão linear entre os valores de clorofila analisados em campo e os valores de reflectância das bandas de

interesse extraídos através do ArcGis. Esta regressão, realizada através do *Microsoft Excel*, além de apresentar os coeficientes de cada equação dos modelos, também deu os valores de R^2 ajustado e P-Valor. Estes dois parâmetros são importantes pois definem a representatividade e a correlação entre as variáveis X e Y, sendo que quanto mais próximo de 1 é o R^2 ajustado, mais representativa é a regressão; e quanto mais próximo de 0 é o P-valor, mais significativa a correlação entre X e Y. Foi definido um intervalo de confiança para o P-valor de 95%, portanto foram considerados todos os valores de P-valor abaixo de 0,05.

Destas alternativas de modelos de estimativa de clorofila foi escolhido o melhor resultado através de parâmetros amplamente utilizados na literatura para tal fim, como o maior valor de coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) e P-valor menor que 0,05.

4.9 Aplicação do modelo com melhor desempenho

O modelo que obteve o melhor resultado na etapa de calibração foi aplicado nos conjuntos de imagens através do *software* ArcGIS, a fim de se avaliar o comportamento espacial da concentração de clorofila na Lagoa da Conceição. Os mapas gerados serão apresentados nos item de Resultados, assim como a análise para cada modelo calibrado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho serão apresentados conforme a sequência definida no fluxograma apresentado no item 4.1. Com isto, as discussões terão uma sequência lógica a fim de chegar ao objetivo de estimar a concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição através de modelos bio-ópticos calibrados através de técnicas de sensoriamento remoto.

5.1 Análise de dados de reflectância

Através do *software* ArcGIS, foi possível a extração de dados de reflectância dos polígonos representativos das feições de lagoa, vegetação, oceano e área urbana em todas as imagens analisadas neste trabalho. Transportando estes dados para o *Microsoft Excel* foi criado o Apêndice A.

Com os dados apresentados no Apêndice A, foram plotados gráficos de comprimento de onda por reflectância de cada feição em cada imagem analisada. Estes gráficos são exibidos abaixo e elucidam o comportamento espectral dos alvos, permitindo a comparação com a bibliografia consagrada.

O Gráfico 1 mostra que os polígonos representativos da Lagoa da Conceição possuem baixa reflectância, e como já esperado, o pico na banda do verde (B3) fica perceptível nas 4 imagens analisadas. Observa-se que a imagem 4 apresentou maiores valores de reflectância que as outras imagens.

O Gráfico 2 correspondente aos polígonos de vegetação também está condizente com o que se vê na literatura apresentada na Figura 5. Há um pequeno pico na banda do verde (B3) mas o que fica mais evidente é alta reflectância na banda do infravermelho próximo (B5).

As bandas do visível (B2, B3 e B4) são as que apresentaram maiores reflectância nos polígonos representativos do oceano, seguidos de uma baixa reflectância na banda do infravermelho próximo (B5), cumprindo o resultado conjecturado.

E por último, o Gráfico 4 apresenta as curvas espectrais dos polígonos representativos da área urbana. Observa-se que quanto maior o comprimento de onda, maior é a reflectância deste alvo.

Conforme a literatura apresentada no item de Materiais e Métodos, todos os alvos das imagens apresentaram curva espectral dentro das faixas esperadas, validando assim a correção atmosférica aplicada pelo Earth Explorer.

Gráfico 1 Curvas espectrais dos polígonos representativos da Lagoa da Conceição

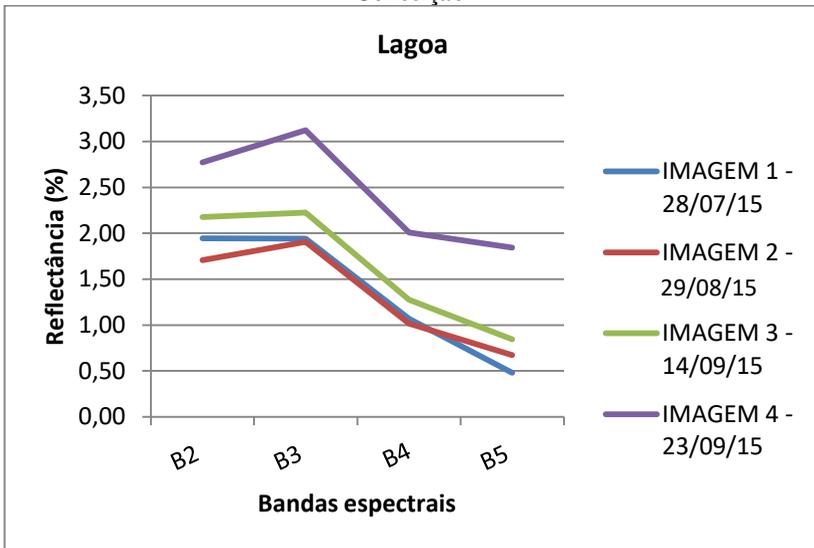


Gráfico 2 Curvas espectrais dos polígonos representativos da vegetação

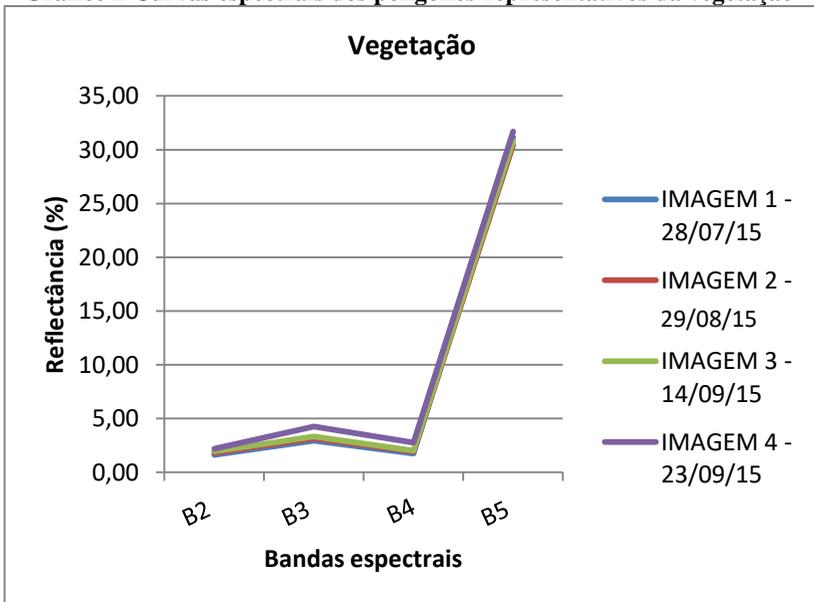


Gráfico 3 Curvas espectrais dos polígonos representativos do oceano

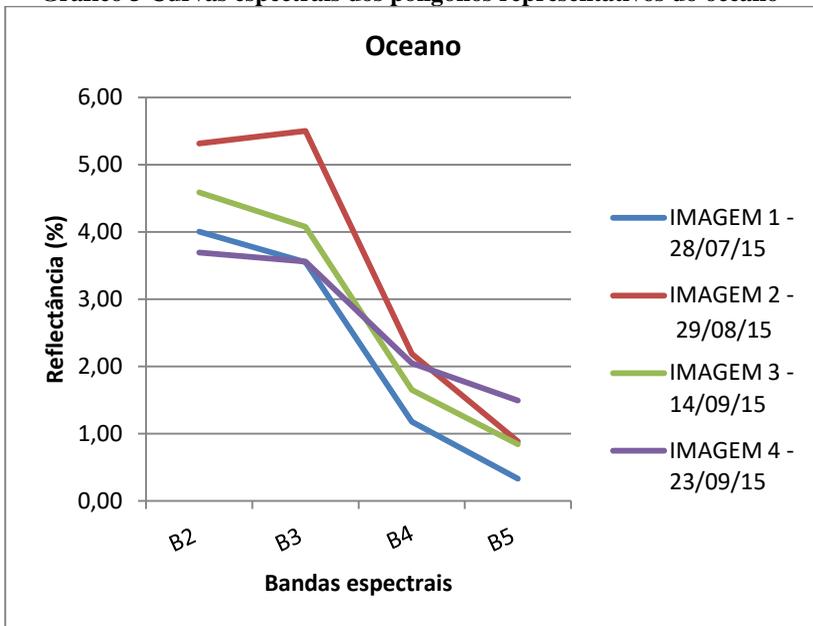
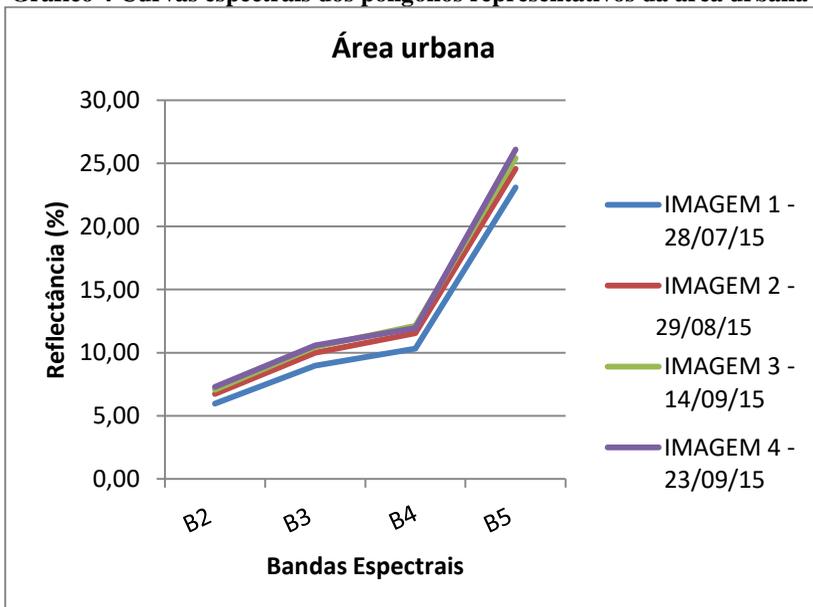


Gráfico 4 Curvas espectrais dos polígonos representativos da área urbana



5.2 Análise e definição dos dados amostrais

Para saber quais imagens representam melhor o comportamento da concentração da clorofila-a nas datas de coletas *in situ*, foi criado a tabela do Apêndice B. A tabela apresenta os valores de reflectância dos pontos geográficos de coletas em campo em todas as bandas de interesse e em todas as imagens analisadas.

O modelo NIR/RED de Gitelson (1993) foi ajustado em cada imagem analisada em 4 situações: utilizando todos os pontos de coleta *in situ*, utilizando apenas as coletas do dia 19/08/2015, utilizando apenas as coletas do dia 27/08/2015 e por último utilizando apenas as coletas do dia 29/09/2015. Também foram utilizados valores transformados para logaritmo natural de concentração de clorofila-a, já que a variação dos valores de \ln de concentração de clorofila-a é menor que a variação dos próprios valores medidos de concentração.

Em cada caso, foi feita uma regressão linear e analisado os valores de R^2 ajustado de cada imagem. O resultado é observado na Tabela 6 e na Tabela 7:

Tabela 6 R^2 ajustado para a calibração do modelo NIR/RED com valores de concentração de clorofila-a

[cl-a]				
Modelo NIR/RED	IM1 - 28/07	IM2 - 29/08	IM3 - 14/09	IM4 - 23/09
Todos os pontos	0,78	0,72	0,80	0,81
Pontos 19/08	0,69	0,65	0,72	0,73
Pontos 27/08	0,62	0,57	0,67	0,67
Pontos 29/09	0,38	0,29	0,31	0,34

Tabela 7 R^2 ajustado para a calibração do modelo NIR/RED com valores de \ln de concentração de clorofila-a

\ln [cl-a]				
Modelo NIR/RED	IM1 - 28/07	IM2 - 29/08	IM3 - 14/09	IM4 - 23/09
Todos os pontos	0,82	0,55	0,84	0,85
Pontos 19/08	0,71	0,67	0,74	0,75
Pontos 27/08	0,63	0,58	0,68	0,68
Pontos 29/09	0,43	0,36	0,38	0,40

Como já era esperado, os valores de \ln de concentração de clorofila-a possuem um ajuste melhor para as regressões do que os

valores de concentração de clorofila-a. Um dos motivos disto é que há uma maior semelhança de variação de valores amostrais. Enquanto a reflectância varia menos que dois pontos percentuais, os valores de concentração de clorofila-a variam um pouco mais de 4 pontos, enquanto que os de ln de clorofila-a possuem variação de pouco mais de um ponto. Pela variação ser menor com os valores de ln, é esperado que estes ajustem-se melhor em regressões lineares com os valores de reflectância. Desta forma, serão utilizados os valores de ln de concentração de clorofila-a para realizar a calibração dos modelos.

É possível observar nas tabelas acima que os dados de coleta in situ do dia 29/09/2015 não tiveram um ajuste considerável ($> 0,4$) com nenhuma imagem. Isto pode ser explicado pelo fato de que neste dia foram realizados apenas 4 coletas em pontos distintos, tornando os dados amostrais muito limitados para a calibração de qualquer modelo com uma variável. Por esta razão, os dados de coletas em campo do dia 29/09/2015 não serão utilizados na análise deste trabalho.

Nota-se também que as imagens que melhor representam os dados amostrais em campo foram as imagens 1 de data 28/07/2015 e imagem 3 de data 14/09/15, com os pontos dos dias 19/08 e 27/08, respectivamente. Desta forma, seguindo a literatura citada no item 3.4 do presente trabalho, foram selecionadas as imagens com data mais próxima das coletas em campo. Os dados amostrais que foram selecionados para ajuste dos demais modelos são apresentados na Tabela 8 e 9:

Tabela 8 Dados amostrais da ajuste de modelos

Dados amostrais definidos:	IM1_28/07	Pontos 19/08
	IM3_14/09	Pontos 27/08

Tabela 9 Dados amostrais detalhados para o ajuste de modelos

CONJUNTO DEDADOS PARA AJUSTE DE MODELOS								
Data	Pontos	[cl_a]	ln [cl-a]	Ref. B2	Ref. B3	Ref. B4	Ref. B5	Imagens
1908	Ponto 1	5,720	1,744	0,020	0,020	0,012	0,005	IMAGEM 1 28/07/2015
1908	Ponto 2	5,340	1,675	0,021	0,021	0,012	0,005	
1908	Ponto 3	3,400	1,224	0,021	0,021	0,012	0,004	
1908	Ponto 4	4,320	1,463	0,017	0,016	0,010	0,007	
1908	Ponto 5	5,940	1,782	0,017	0,016	0,008	0,005	
1908	Ponto 6	5,820	1,761	0,021	0,021	0,012	0,005	
2708	Ponto 7	4,004	1,387	0,021	0,022	0,013	0,008	IMAGEM 3 14/09/2015
2708	Ponto 8	3,738	1,319	0,022	0,023	0,013	0,007	
2708	Ponto 9	2,720	1,001	0,025	0,026	0,015	0,011	
2708	Ponto 10	3,024	1,107	0,021	0,022	0,014	0,013	
2708	Ponto 11	2,970	1,089	0,023	0,023	0,016	0,013	
2708	Ponto 12	4,074	1,405	0,023	0,024	0,013	0,009	

5.3 Ajuste de modelos bio-ópticos para estimativa da concentração de clorofila-a

Com os dados amostrais definidos e com os modelos apresentados no item 4.8 dos Materiais e Métodos do presente trabalho, iniciou-se o ajuste. Inicialmente, todos os modelos apresentados na Tabela 4 foram ajustados conforme os dados amostrais definidos no item anterior.

Todas as equações geradas através da regressão linear aplicada no *Microsoft Excel* possuem o formato que segue da Equação 4. O coeficientes a é fornecido pela regressão linear aplicada através da ferramenta Análise de Dados, assim como os valores de P-valor e R^2 ajustado.

$$\ln[cl - a] = a \times \text{Reflectância} \quad (4)$$

De uma forma geral, observou-se que os modelos que envolvem mais de uma variável podem até apresentar valores de R^2 ajustado bons (maiores que 0,7). No entanto, ao acrescentar mais variáveis à regressão, os valores de P-valor aumentam, tornando a mesma não significativa, conforme o nível de confiança desejado de 95%. Isto se dá pelo baixo número de pontos de coleta *in situ*, que acaba limitando os ajustes de variáveis para os modelos. Além disto, observa-se que a variação dos valores dos coeficientes são muito mais altas em modelos de duas

variáveis do que em modelos de uma variável só. Por este motivo, não serão mostrados os ajustes realizados pelos modelos de Giardino et al. (2001), Brezonik et al. (2005) e Martini et al. (2006).

Quanto aos modelos de apenas uma variável, ambas regressões apresentaram resultados bastante satisfatórios, com R^2 ajustado maior que 0,75. Dentre os modelos ajustados, o que mais se destacou foi o de Gitelson et al. (2008). A equação gerada é apresentada abaixo, e como pode ser visto na Tabela 10, o modelo apresentou um bom desempenho. O R^2 ajustado de 0,88 com todos os dados amostrais e o P-valor mostram o quanto a equação gerada é significativa. O coeficiente médio ficou próximo de 1, e sua variação de mínimo e máximo é de 0,33.

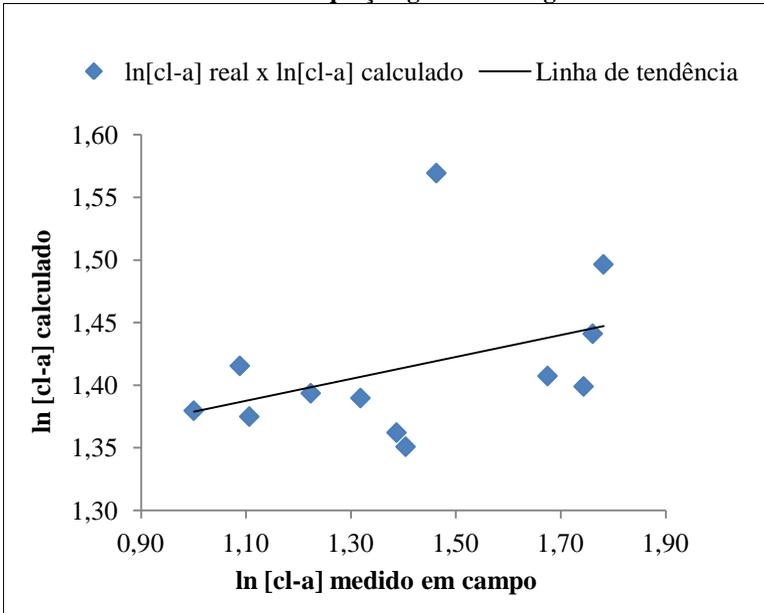
$$\ln[cl - a] = 1,43 \times (Reflect. \frac{B2}{B3}) \quad (5)$$

Tabela 10 Ajuste do modelo de Gitelson et al. (2008) para Lagoa da Conceição

Modelo Gitelson et al. (2008) - B2/B3				
Coefficientes			P-valor	R² ajustado
Médio	Mínimo	Máximo		
1,43	1,27	1,60	1,01E-09	0,88

O Gráfico 5 mostra a comparação entre os valores medidos em campo do logaritmo natural da concentração de clorofila-a e os valores calculados através da Equação 5 gerada pela regressão do Microsot Excel. Alguns valores apresentaram-se discrepantes, porém de uma forma geral, a maior parte dos valores ficou próxima da linha de tendência gerada.

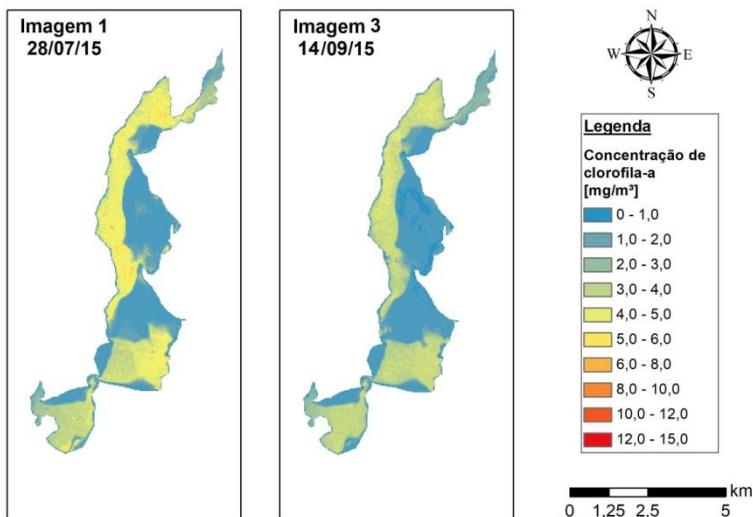
Gráfico 5 Comparação dos valores de $\ln[\text{cl-a}]$ medidos em campo e calculados com a equação gerada na regressão linear



5.4 Aplicação dos modelos

Como já citado anteriormente, o modelo que apresentou o melhor desempenho conforme os critérios escolhidos foi o de Gitelson et al. (2008). Assim sendo, o modelo foi aplicado no conjunto de imagens analisadas deste trabalho através da ferramenta *Raster Calculator* do *software* ArcGIS. No *software*, foi inserida a equação gerada no Microsoft Excel e criados mapas de distribuição da clorofila-a, que são apresentados na Figura 12:

Figura 12 Aplicação do modelo de Gitelson et al. (2008) ajustado para a Lagoa da Conceição



O modelo de Gitelson et al. (2008) apresentou valores de concentração de clorofila-a condizentes com o amostrado em campo. De forma geral, nota-se que as imagens mostraram valores bem similares entre si.

A imagem do dia 28/07/15 apresenta uma variação um pouco maior da concentração de clorofila-a do que a imagem datada de setembro de 2015. A imagem de julho pode ter apresentado concentração de clorofila-a um pouco mais alta que a imagem de setembro por haver maior incidência de chuva nos meses da primavera do que nos meses de inverno. Com maior ocorrência de chuva, o aporte de água é maior na lagoa e as concentrações de clorofila-a ficam mais diluídas. Porém, são precisos maiores estudos sobre a incidência de chuva nestes meses de 2015 para afirmar isso com mais certeza, ainda que os estudos feitos neste trabalho evidenciem essa diferença entre as estações.

Em ambas imagens, verifica-se que algumas bordas da lagoa, que coincidem com as áreas mais rasas da mesma, possuem comportamento bastante característico. As bordas apresentam baixa reflectância, e portanto os valores de concentração de clorofila-a são mais baixos que o resto da lagoa. Isto é causado pela influência do fundo da lagoa na

reflectância das bandas, o que faz com que a cor da água seja mascarada pela cor do sedimento do fundo. Outro fator que interfere muito é que o modelo de Gitelson et al. (2008) não foi criado para profundidades rasas, e por isto pode não ser representativo nestas áreas. Desta forma, o correto é realizar uma análise mais aguçada de profundidades em que o modelo é válido e desconsiderar estas áreas mais rasas.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a aplicação de modelos bio-ópticos semi-empíricos para estimativa da concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição por meio de imagens de satélite. Com base no resultados alcançados, as principais conclusões são descritas abaixo.

Inicialmente, o site Earth Explorer demonstrou ser uma ótima fonte de dados orbitais para trabalhos envolvendo a temática de monitoramento de corpos hídricos. Graças aos seus produtos do Landsat em nível 2, uma parte trabalhosa de correção atmosférica pode ser substituída apenas pela validação da mesma. Os polígonos representativos das feições da Lagoa da Conceição apresentaram resultados de reflectância de superfície condizentes com a literatura, mostrando que os mesmos são de fato confiáveis para análises.

Com o objetivo principal do trabalho, conclui-se que modelos ópticos utilizados com o auxílio de imagens de satélite são bastante promissores para a avaliação da concentração da clorofila-a na Lagoa da Conceição. Apesar dos poucos dados amostrais de campo disponíveis para este trabalho, pode-se testar uma variada gama de modelos consagrados em bibliografia. Além disso, foi possível também apresentar alguns modelos empíricos com bons potenciais de representação da concentração de clorofila-a na Lagoa da Conceição.

Nota-se que quanto menor o número de dados amostrais, menor o ajuste de modelos para regressões lineares com mais de uma variável. Esta inferência levou o foco deste trabalho para a calibração de modelos mais simples. No entanto, conclui-se que mesmo estes modelos podem ser muito representativos, principalmente quando a variável envolve operações entre bandas.

Sendo assim, o principal resultado obtido neste trabalho foi a constatação de que o modelo de Gitelson et al. (2008) possui uma boa performance de ajuste e aplicação em determinadas regiões da Lagoa da Conceição. Ainda é preciso apurar melhor os resultados para áreas mais rasas da lagoa por conta da interferência que os sedimentos de fundo exercem na reflectância da coluna d'água nestas regiões. Porém, de forma geral, o modelo mostrou-se bastante representativo para o restante das áreas.

Infelizmente para este trabalho haviam disponíveis poucos dados de concentração de clorofila-a *in situ* no ano de 2015, o que de certa forma acabou prejudicando os resultados dos ajustes e não possibilitou a validação dos modelos testados. Ainda assim, mesmo com o baixo

número de dados amostrais para ajuste, os modelos apresentaram uma média de mais de 0,7 em seus valores de R^2 ajustado para os dados analisados, o que pode-se considerar um ajuste satisfatório.

Para melhoria destes resultados, um dos fatores que pode ajudar é a utilização de imagens com maior resolução espectral. Além disto, ao invés da reflectância ser retirada apenas do pixel da coordenada da coleta *in situ*, pode-se fazer uma média dos valores deste pixel com os seus vizinhos. Desta forma, erros de interferência de correntes e outros fatores poderão ser minimizados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se também obter imagens com datas o mais próximo possível das coletas *in situ*. O ideal seria realizar as coletas em campo no mesmo dia ou com a menor defasagem de tempo possível em relação a passagem do satélite, atentando para que não sejam feitas coletas em dias nublados.

Além disto, são necessários mais pontos amostrais de campo, para que seja possível a validação de modelos ajustados em outros grupos de dados. Desta forma, também será possível o ajuste de uma gama maior de modelos com maior número de variáveis. A tendência observada é que quanto maior o número de dados amostrais *in situ*, melhores serão os ajustes de modelos.

Por fim, recomenda-se a utilização de outros sensores, por exemplo, o MSI a bordo do satélite Sentine-2A e Sentinel-2B, com melhor resolução espacial (10 m) e maior resolução temporal (possibilidade de 1 imagem a cada 5 dias).

REFERÊNCIAS

1. ALCÂNTARA, E. et. al. Uso de propriedades ópticas aparentes e inerentes para a classificação da massa d'água do reservatório hidrelétrico de Itumbiara (GO). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16, 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE. 2013, p. 5552-5559.
2. ANA. Agência Nacional das Águas. Indicadores de Qualidade - Índice do Estado Trófico (IET). Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>>. Acesso em 28 de março de 2019.
3. BARBOSA, T. C. P. ECOLAGOA – Um breve documento sobre a ecologia da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. Edição do Autor, Florianópolis, Brasil, 86pp. 2003.
4. BARRETO, L.V. et al. Eutrofização em rios brasileiros. Centro Científico Conhecer - Enciclopédia Biosfera, vol. 9, nº16, p. 2165-2179. Goiânia, 2013.
5. BREZONIK, P. et. al. Landsat-based Remote Sensing of Lake Water Quality Characteristics, Including Chlorophyll and Colored Dissolved Organic Matter (CDOM). Revista Lake and Reservoir Management 21 (4): p. 373-382. (2005).
6. BRYN, Leonardo Monteiro. Página Dinâmica de Aprendizado de Sensoriamento Remoto. Parte integrante da Dissertação de Mestrado - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEPARM / Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/engcart/PDASR/>> . Acesso em: 03 de setembro de 2018.
7. CARVALHO, L. A. S. et. al. Ajuste de bandas de modelos empíricos de estimativa de clorofila aplicados à região da planície de inundação do Lago Grande Curuai - PA.). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16, 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE. 2013, p. 8924-8931.
8. CETESB. Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo - Série Relatórios. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Cetesb_QualidadeAguasInteriores_2017_02-06_VF.pdf>. Acesso em: 09 de abril de 2019.

9. CRÓSTA, Álvaro Penteadó. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. 170p. Ed. rev. - Campinas, SP: IG/UNICAMP, 1993.
10. DERMACO, Bárbara. Avaliação da ocorrência do fitoplâncton na Lagoa do Peri, através de técnicas aplicadas de Sensoriamento Remoto. Florianópolis - Santa Catarina. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2018.
11. EMBRAPA. Landsat - Land Remote Sensing Satellite. Embrapa Territorial, 2019. Disponível em: <https://www.cnpem.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html>. Acesso em 01 de junho de 2019.
12. CETESB. Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo - Série Relatórios. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente: CETESB, 2017. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/Cetesb_QualidadeAguasInteriores_2017_02-06_VF.pdf>. Acesso em: 09 de abril de 2019.
13. FLORENZANO, Tereza Gallotti. Iniciação em Sensoriamento Remoto. 3. ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
14. GIARDINO, C. et al. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *Journal: The Science of the Total Environment*, 268, p. 19-29. Elsevier, 2001.
15. GITELSON, A. et al. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring of inland waters quality. In: *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, No.7, p. 1269-1295. 1993.
16. GITELSON, A. A. et al. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 9, p. 3582-3593, set. 2008.
17. GODOY, Fábio Bertini. Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC. Florianópolis - Santa Catarina. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2009.
18. JENSEN, J. R. (1949) Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres / tradução José Carlos Neves Epiphânio et al. São José dos Campos, SP. 2010.
19. LISBOA, L. K. et al. Lagoa da Conceição: uma revisão da disponibilidade de dados ecológicos visando o direcionamento de novas pesquisas no ecossistema. *Revista Biotemas*, 21 (1): p. 139-146. Março de 2008.

20. LONDE, Luciana de Resende. Comportamento espectral de fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado - Ibitinga (SP). 223 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, 2008.
21. MARTINI, L. C. P. et al . Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila_a na Lagoa da Conceição - Florianópolis, SC. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro , v. 11, n. 4, p. 318-324, dez. 2006 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522006000400004&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 11 de abril de 2019.
22. MEDEIROS, Anderson. Introdução ao Sensoriamento Remoto. 68 p. São José dos Campos, 2001.
23. MISHRA, D. R et. al. Bio-optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2017.
24. MISHRA, S.; MISHRA, D. R. A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment, v. 117, p. 394 - 406, 2012.
25. MORAES, Elisabete Caria de. Capítulo I - Fundamentos de Sensoriamento Remoto. 23 p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, 2002.
26. NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
27. ODRESKI, Luis Felipe Rissetti. Influência hidrológica nos processos hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2012.
28. PONZONI, Flávio Jorge; SHIMABUKURO, Yosio Edemir. Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação. 127p. São José dos Campos, SP: Editora Parêntese, 2007.
29. RÊGO, I.S. Variabilidade das propriedades óticas aparentes de águas continentais por meio de sensores hiperespectrais para o monitoramento da qualidade das águas. 104p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília – Distrito Federal, 2017.
30. RODRIGUES, Rosana Maria. Avaliação de impacto do sistema de esgoto sanitário na Lagoa da Conceição. Florianópolis - Santa Catarina. 117 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 1990.
31. RUDORFF, Bernardo F. T. Produtos de Sensoriamento Remoto. Divisão de Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

- (INPE). São José dos Campos, SP. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em 03 de setembro de 2018.
32. SOUZA, Ronald Buss de. Sensoriamento Remoto: conceitos fundamentais e plataformas. Aula do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Divisão de Sensoriamento Remoto, 2010. Disponível em: <http://www3.inpe.br/crs/cretealc/pdf/ronald_ceos.pdf>. Acesso em 03 de setembro de 2018.
 33. SILVA, Júlia Costa. Análise numérica da influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica residual e a qualidade da água da Lagoa da Conceição. Florianópolis - Santa Catarina. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, 2013.
 34. SILVA, V. E. C. et al. Influência antrópica e da hidrodinâmica na qualidade da água e na distribuição de nutrientes e clorofila na Lagoa da Conceição - SC. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 22, Florianópolis - SC. 2017a.
 35. SILVA, V. E. C. et al. Space time evolution of the trophic state of a subtropical lagoon: Lagoa da Conceição, Florianópolis Island of Santa Catarina, Brazil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, Porto Alegre, v. 22, e10, 2017b.
 36. USGS, EROS Data Center. Landsat Collections. Disponível em <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-collection-1?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em 25 de maio de 2019.
 37. USGS, Department of the Interior. Landsat 8: Surface Reflectance Code (LASRC) - Product Guide. Version 1.0. Sioux Falls, South Dakota. December, 2018.
 38. VILELA, Marcos Augusto Macedo Araujo. Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia - UFU. Uberlândia, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14144/1/MetodologiaMonitoramentoQualidade.pdf>>. Acesso em 09 de abril de 2019.
 39. VENTURA, Dhalton Luiz Tosetto. Uso do Sensoriamento Remoto para monitoramento da concentração de clorofila-a em açudes do semiárido. Brasília - Distrito Federal. 53 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) Universidade de Brasília - UnB. Brasília, 2013.

40. YOUNG, N. E. et al. A survive guide to Landsat preprocessing. Ecology, nº98, p. 920-932, 2017.

**APÊNDICE A - Porcentagem de reflectância dos polígonos
representativos da Lagoa da Conceição**

Imagens	Bandas	Lagoa	Vegetação	Oceano	Área Urbana
IMAGEM 1 28/07/15	B2	1,95	1,62	4,00	5,97
	B3	1,94	2,95	3,55	8,98
	B4	1,07	1,73	1,18	10,33
	B5	0,48	31,16	0,33	23,10
IMAGEM 2 28/08/15	B2	1,71	1,80	5,31	6,72
	B3	1,91	3,16	5,50	9,99
	B4	1,02	1,91	2,18	11,55
	B5	0,67	30,43	0,88	24,56
IMAGEM 3 14/09/15	B2	2,18	1,94	4,59	7,06
	B3	2,22	3,33	4,07	10,44
	B4	1,28	2,00	1,65	12,12
	B5	0,85	30,81	0,84	25,40
IMAGEM 4 23/09/15	B2	2,77	2,19	3,69	7,28
	B3	3,12	4,24	3,56	10,58
	B4	2,01	2,75	2,05	11,96
	B5	1,84	31,68	1,49	26,09

APÊNDICE B - Reflectância das bandas de interesse nos pontos geográficos das coletas *in situ*

Data	Identificação	[Cl-a] mg/m ³	IM1_B2	IM1_B3	IM1_B4	IM1_B5	IM2_B2	IM2_B3	IM2_B4	IM2_B5	IM3_B2	IM3_B3	IM3_B4	IM3_B5	IM4_B2	IM4_B3	IM4_B4	IM4_B5
19/08/2015	Ponto 1	5,72	1,99	2,04	1,19	0,52	1,68	2,03	1,07	0,61	2,08	2,19	1,29	0,79	2,89	3,39	2,24	1,98
19/08/2015	Ponto 2	5,34	2,10	2,14	1,17	0,46	1,90	2,17	1,28	0,66	2,19	2,26	1,32	0,71	3,01	3,42	2,35	1,95
19/08/2015	Ponto 3	3,40	2,06	2,12	1,16	0,45	1,56	1,69	0,73	0,44	2,53	2,63	1,51	1,12	2,93	3,16	2,10	1,91
19/08/2015	Ponto 4	4,32	1,74	1,59	0,97	0,75	1,73	1,92	1,20	1,39	2,09	2,18	1,39	1,28	2,61	2,87	1,95	2,42
19/08/2015	Ponto 5	5,94	1,68	1,61	0,82	0,52	2,63	3,00	2,37	2,28	2,27	2,30	1,57	1,26	2,51	2,77	1,70	1,96
19/08/2015	Ponto 6	5,82	2,07	2,06	1,17	0,50	1,61	1,81	0,83	0,42	2,27	2,41	1,29	0,91	2,70	3,03	1,89	1,59
27/08/2015	Ponto 1	4,00	1,99	2,04	1,19	0,52	1,68	2,03	1,07	0,61	2,08	2,19	1,29	0,79	2,89	3,39	2,24	1,98
27/08/2015	Ponto 2	3,74	2,10	2,14	1,17	0,46	1,90	2,17	1,28	0,66	2,19	2,26	1,32	0,71	3,01	3,42	2,35	1,95
27/08/2015	Ponto 3	2,72	2,06	2,12	1,16	0,45	1,56	1,69	0,73	0,44	2,53	2,63	1,51	1,12	2,93	3,16	2,10	1,91
27/08/2015	Ponto 4	3,02	1,74	1,59	0,97	0,75	1,73	1,92	1,20	1,39	2,09	2,18	1,39	1,28	2,61	2,87	1,95	2,42
27/08/2015	Ponto 5	2,97	1,68	1,61	0,82	0,52	2,63	3,00	2,37	2,28	2,27	2,30	1,57	1,26	2,51	2,77	1,70	1,96
27/08/2015	Ponto 6	4,07	2,07	2,06	1,17	0,50	1,61	1,81	0,83	0,42	2,27	2,41	1,29	0,91	2,70	3,03	1,89	1,59
29/09/2015	Ponto 7	2,52	2,06	2,01	1,12	0,58	2,69	2,99	2,21	1,64	2,15	2,27	1,32	0,83	3,16	3,53	2,44	2,15
29/09/2015	Ponto 8	2,31	2,02	2,14	1,15	0,50	1,57	1,65	0,70	0,41	2,50	2,57	1,57	1,13	2,83	3,18	2,07	1,89
29/09/2015	Ponto 9	6,57	1,99	2,28	1,08	0,53	1,71	2,04	1,12	0,56	2,09	2,23	1,32	0,85	2,93	3,45	2,28	2,05
29/09/2015	Ponto 10	3,43	2,12	2,01	1,20	0,47	1,54	1,73	0,75	0,40	2,32	2,31	1,29	0,83	2,70	2,88	1,76	1,53

