

Avaliação da ocorrência do fitoplâncton na Lagoa do Peri,
através de técnicas aplicadas de Sensoriamento Remoto

Bárbara Demarco

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

Bárbara Demarco

**AVALIAÇÃO DA OCORRÊNCIA DO FITOPLÂNCTON NA
LAGOA DO PERI, ATRAVÉS DE TÉCNICAS APLICADAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO.**

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

Orientador: Prof. Dra. Patrícia Kazue Uda

Coorientador: Prof. Dr. Davide Franco

Florianópolis

2018

Catologação na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina.

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

Avaliação da ocorrência das cianobactérias na Lagoa do Peri,
através da aplicação de técnicas de Sensoriamento Remoto.

BÁRBARA DEMARCO

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

Prof. Patrícia Kazue Uda, Dra.
(Orientador)

Prof. Davide Franco, Dr.
(Coorientador)

Prof. Nadia Bernardi Bonumá, Dra
(Membro da Banca)

Victor Eduardo Cury Silva, M.Sc
(Membro da Banca)

FLORIANÓPOLIS (SC)
JANEIRO 2018

AGRADECIMENTOS

Neste espaço escrevo mais que um ritual, nestas linhas, expresso um sentimento profundo de gratidão, de quem evoluiu muito ao longo não só da elaboração deste trabalho, mas de toda a graduação.

Agradeço imensamente ao meu amado namorado e amigo Mauricio pelo seu apoio e companheirismo, que foram cruciais em todo o período em que me envolvi com essa pesquisa. Também agradeço à minha Mãe que muitas vezes deixou seus sonhos de lado para que eu pudesse viver o meu, acreditando no meu potencial.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, pela infraestrutura e equipe disponibilizada durante todos os anos de graduação.

À minha orientadora, professora Patrícia, que me apresentou o mundo do sensoriamento remoto sob uma nova óptica, me impulsionou neste desafio e serve de inspiração como profissional. Muito obrigada, pelo seu entusiasmo, dedicação, alegria, calma e confiança.

Aos membros da banca, Dra. Nadia Bernardi Bonumá e M. Sc Vitor Eduardo Cury Silva, pela disponibilidade e pelas contribuições na melhoria deste trabalho.

À toda equipe LAHIMAR que me acolheu de braços abertos durante o período de elaboração deste estudo e contribuiu de alguma maneira para este trabalho, seja através de ensinamentos compartilhados ou de boas conversas na hora do café.

Aos meus amigos de dentro e fora graduação, obrigada pela compreensão nas horas em que não pude estar presente e pelo apoio nos momentos certos, sem vocês eu não teria chegado até aqui.

A todos os meus amores.

Nada de esplêndido jamais foi realizado, exceto por aqueles que ousaram acreditar que algo dentro deles era superior às circunstâncias.

(Bruce Barton)

RESUMO

A Lagoa do Peri, constitui o maior corpo de água doce da Ilha de Santa Catarina, além de configurar-se como área de preservação ambiental, ela também integra o sistema de abastecimento da cidade de Florianópolis de forma representativa para as populações do leste e sul da cidade. Em virtude da sua importância, vários estudos têm sido conduzidos no local, os quais revelaram a presença de cianobactérias produtoras de toxinas do grupo das saxitoxinas, o que pode comprometer seus usos múltiplos, apresentar risco à saúde humana e biota aquática. Desta forma, para compreender a dinâmica de desenvolvimento do fitoplâncton, com menor custo e com melhor resolução espacial e temporal, atualmente surgem técnicas geoespaciais, as quais complementam as metodologias tradicionais de monitoramento da qualidade da água. Para este estudo, utilizou-se a presença do pigmento clorofila a como enfoque de suas análises, uma vez que pesquisas relacionadas a seu comportamento espectral têm propiciado o desenvolvimento discriminação da comunidade fitoplantônica. Assim, com o propósito de analisar a ocorrência de organismos fitoplantônicos por meio da inferência do pigmento clorofila a foram adquiridos dados de concentração do parâmetro, através dos levantamentos de campo realizados pelos projetos da UFSC e dados multifonte: imagens multiespectrais do sensor Landsat TM, para os quais foram construídas suas curvas de refletância espectral. A aplicação de técnicas de análise espectral através das curvas de refletância para os diferentes pontos de monitoramento, em diferentes datas, propiciou a avaliação cruzada com dados de concentração da clorofila a. Os resultados da aplicação de técnicas de sensoriamento para avaliar a ocorrência da comunidade fitoplantônica mostraram-se promissores, na análise das curvas espectrais evidenciando possíveis alterações na comunidade fitoplantônica na Lagoa do Peri. As curvas espectrais das feições características, vegetação, lagoa, oceano e área urbana, para cada uma das imagens analisadas, apresentaram-se satisfatórias, de acordo com a comparação com o comportamento das curvas teóricas, da literatura analisada. Já o método de correlação entre os dados de concentração da Clorofila a e da refletância na banda do verde aplicado apresentou um ajuste de r^2 0,685 para os pontos analisados, o que é uma correlação média dos parâmetros.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto da Água, Fitoplâncton, Clorofila a, Refletância.

ABSTRACT

The Lagoa do Peri, is the largest body of fresh water on the island of Santa Catarina, in addition to configuring as environmental preservation area, she also integrates the supply system of the city of Florianópolis in order representative for the people of East and South of the city. By virtue of your importance, several studies have been conducted on the site, which revealed the presence of toxin-producing cyanobacteria group of saxitoxinas, which can compromise their multiple uses, present a risk to human health and aquatic biota. In this way, to understand the dynamics of development of phytoplankton, with lower cost and with better spatial and temporal resolution currently arise geospatial techniques, which complement the traditional methodologies of water quality monitoring. For this study, we used the presence of the pigment chlorophyll a as focus of their analysis, since your spectral behavior-related research have propitiated the development community fitoplantônica discrimination. So, with the purpose to analyze the occurrence of fitoplantônicos bodies by means of inference of the pigment chlorophyll a concentration data were acquired, through field surveys carried out by projects at UFSC and multifonte data: images Basic TM multispectral sensor, for which were built their spectral reflectance curves. The application of spectral analysis techniques through the reflectance curves for the different monitoring points, at different dates, provided cross-evaluation with data of chlorophyll a concentration. The results of the application of sensing techniques to assess the occurrence of fitoplantônica community have proved promising, in the analysis of the spectral curves showing possible changes in fitoplantônica community in Lagoa do Peri. The spectral curves of characteristic features, vegetation, pond, Ocean and urban area, for each of the images analyzed, present-if satisfactory, according to the comparison with the behavior of the theoretical curves of the literature examined.

Already the method of correlation between chlorophyll concentration data and the reflectance in the Green band applied presented a r^2 0.685 adjustment to the points analysed, which is an average correlation of parameters.

KEYWORDS: Remote Sensing of Water, Pytoplankton, Chlorophyll a, Reflectance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Regiões do Espectro Eletromagnético	42
Figura 2: Espectro de irradiância solar.....	43
Figura 3: Comportamento espectral da água.....	45
Figura 4: Análise espectral da água.....	47
Figura 5: Localização da Lagoa do Peri.....	55
Figura 6: Localização dos Pontos de Monitoramento – UFSC	58
Figura 7: Fluxograma de atividade	62
Figura 8: Amostragem dos polígonos representativos para análise espectral.....	69
Figura 9 : Curvas teóricas da relação refletância e comportamento espectral da vegetação.....	70
Figura 10 : Curvas teóricas da relação refletância e comportamento espectral da água	71
Figura 11 : Curvas teóricas da relação refletância e comportamento espectral da área urbana.	72
Figura 12: Evolução das concentrações da Clorofila a.	78
Figura 13: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 da área amostral lagoa.	80
Figura 14: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 da área amostral vegetação.	80
Figura 15: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 da área correspondente ao oceano.	81
Figura 16: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 dos polígonos representativos da área urbana.....	81
Figura 17: Resposta Espectral na Lagoa do Peri.....	84
Figura 18: Curvas Espectrais de 23/11/2000, cada um dos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina.	85
Figura 19: Curvas Espectrais de 04/12/2004, cada um dos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina.	86
Figura 20: Curvas Espectrais de 23/08/2007, cada um dos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina.	86
Figura 21: Curvas espectrais da imagem 07/03/2004 para os pontos de monitoramento UFSC	87
Figura 22: Curvas espectrais da imagem 02/09/2005 para os pontos de monitoramento	88
Figura 23: Evolução das concentrações de Clorofila a.	88
Figura 24: Curva da refletância para Imagem 1/2/2009.....	89
Figura 25: Curva da refletância para Imagem 18/4/2010.....	90
Figura 26: Curva da refletância para Imagem 28/11/2010.....	90

Figura 27: Curva de dispersão da clorofila a e refletância na Banda 2.92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Imagens selecionadas para o estudo.....	60
Tabela 2:Valores de refletância e concentração de Clorofila a.....	91

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo da classificação das águas territoriais pela CONAMA nº 357/2005.	33
Quadro 2 - Coordenadas e localização dos Pontos de Monitoramento - UFSC	57
Quadro 3: Modelos de aerossol.....	65
Quadro 4: Modelos atmosféricos com base nas latitudes e sazonalidade.	67
Quadro 5: Resultados das amostragens para variável Clorofila a.	77
Quadro 6: Refletância média dos polígonos da Lagoa do Peri, para as 46 imagens, em suas respectivas bandas espectrais de avaliação.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CASAN– Companhia Catarinense das Águas e Saneamento

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

ENVI – *Environment for Visualizing Images*

FLAASH – *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*

MODTRAN4 – *Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm-4*

MLS – *Mid-Latitude Summer*

MLW – *Mid-Latitude Winter*

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*

SAS – *Sub-Arctic Summer*

SAW – *Sub-Arctic Winter*

T – *Tropical*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USGS – *United States Geological Service*

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
2	OBJETIVOS	30
2.1	Objetivo Geral.....	30
2.2	Objetivos Específicos	30
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3.1	Qualidade da água.....	32
3.2	Fitoplâncton: Cianobactérias e Cianotoxinas.....	34
3.3	Fatores que desencadeiam o desenvolvimento das cianobactérias e fitoplâncton.....	37
3.3.1	Aporte de nutrientes e o processo de eutrofização de corpos lênticos	37
3.3.2	Incidência da radiação solar e temperatura	39
3.3.3	Fatores relacionados ao corpo d'água e ambiente.....	40
3.4	Sensoriamento Remoto	40
3.5	Comportamento Espectral da Água	44
3.5.1	Processamento Digital das Imagens Multiespectrais	48
3.5.2	Uso do sensoriamento remoto na detecção do fitoplâncton	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1	Caracterização da área de estudo	54
4.2	Materiais	56
4.3	Métodos	62
4.3.1	Processamento Digital das Imagens Multiespectrais	64
4.3.2	Análise dos Dados de Refletância	68
4.3.3	Análise da resposta espectral na Lagoa do Peri	72
4.3.4	Análise de relação dos dados espectrais com a Clorofila a	74
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
5.1	Análises da qualidade da água para o parâmetro Clorofila a	76
5.1.1	Análise dos Dados de Refletância.....	79
5.1.2	Análise da resposta espectral na Lagoa do Peri	82
5.1.3	Análise de relação dos dados espectrais com a Clorofila a	88
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

**APÊNDICE I - DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO
FLAASH EXTRAÍDOS DO METADADOS LANSAT 5TM(*) E
INFERIDOS PELA AUTORA (**). 100**

**APÊNDICE II – QUADRO DOS DADOS DE %
REFLETÂNCIA DOS OBJETOS ESPECTRAIS AMOSTRAIS
(LAGOA, VEGETAÇÃO, OCEANO E URBANO) PARA AS
BANDAS 1,2,3E 4, UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DAS
INFORMAÇÕES OBTIDOS DAS ANÁLISES ESPECTRAIS
PARA CADA UMA DAS IMAGENS EM ESTUDO. 102**

**APÊNDICE III – CURVAS ESPECTRAIS DOS PONTOS DE
MONITORAMENTO UFSC, PARA AS 46 IMAGENS
AVALIADAS. 105**

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos mananciais de abastecimento de água doce, principalmente em regiões urbanizadas, está condicionado à múltiplas variáveis, as quais frequentemente conflitam entre si. Este estresse hídrico, é atribuído as divergentes questões entre a crescente demanda, comprometimento da qualidade destes recursos, as deficiências encontradas na legislação nacional e a posturas ainda conservadoras assumidas no que diz respeito às práticas de saneamento. Garantir o uso dos recursos hídricos da forma mais eficiente, e o abastecimento público com qualidade e volumes suficientes, é um grande desafio, em busca desta realidade cabe aos gestores o investimento em ações de cunho integrativo, atuando com o olhar sob as três principais vertentes que regem esta problemática: localização de mananciais aptos para captação, preservação dos recursos e aumento da demanda de consumo.

Dentro deste contexto e a fim de proporcionar o atendimento as demandas da população pertencente ao município de Florianópolis/SC, em meados do ano 2000 a Lagoa do Peri passou a estruturar um importante componente do sistema prestador do serviço de abastecimento de água local, o qual é dividido em três regiões de abastecimento: Sistema Costa Norte, Sistema Costa Leste-Sul e Sistema Cubatão – Pilões.

Dados do Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico do Município de Florianópolis/SC, trazem que a vazão máxima de captação de água na Lagoa do Peri é 200L/s e sua estação de tratamento de água conta com capacidade de 300L/s. Sendo assim, este sistema se constitui como um importante manancial de abastecimento para a população da porção Costa Leste – Sul no município de Florianópolis.

A Lagoa do Peri, objeto de avaliação neste projeto, constitui o maior corpo de água doce da Ilha de Santa Catarina, ela se localiza dentro de uma área de proteção ambiental, o Parque Municipal da Lagoa do Peri. Trata-se de um lago costeiro o qual se formou devido ao isolamento do mar, através da formação de depósitos de sedimentos marinhos (CASTILHOS, 1997).

Por se tratar de uma área de preservação, em 1994 e 1995, iniciaram estudos na Lagoa do Peri, os quais apontaram pela primeira vez a presença na comunidade fitoplanctônica local, em especial da espécie de cianobactérias conhecida como *Cylindrospermopsis raciborskii* que se apresentam em dominância na lagoa. (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju (Komárková, Laudares-Silva e Senna, 1999).

A presença destes organismos em lagos e reservatórios de água é preocupante tanto pelas alterações na cadeia trófica do ambiente, como pelas alterações operacionais causadas à sistemas de tratamento de água. As principais alterações nos processos de tratamento são em função da variação do pH que estes organismos causam na água, diminuindo as eficiências nas etapas de coagulação e floculação no caso dos sistemas de tratamento e abastecimento de água (CORAL, 2012)

Pesquisas relacionadas a estes organismos, sua ocorrência, desenvolvimento, proliferação, bem como seus mecanismos de atuação no organismo humano, tornam-se de grande relevância quando se considera a incidência de casos de intoxicação e morte registrados em todo o mundo, inclusive no Brasil. Em 1996, na cidade de Caruaru, em Pernambuco, registrou-se o primeiro caso de alta gravidade comprovado pela ação de hepatotóxicos, o que foi seguido da morte em mais de 50 pacientes renais crônicos, após terem sido submetidos a sessões de hemodiálise com a água advinda do local contaminado. Este incidente contribuiu para que as cianotoxinas fossem incluídas no padrão de potabilidade da legislação brasileira.

A fim de regulamentar e proporcionar o controle dos índices relacionados à potabilidade e qualidade da água para consumo, a Portaria 2.914/MS/2011 determina os procedimentos e medidas relacionados à qualidade da água para abastecimento e define os padrões requeridos para tal atividade. A deferida portaria estabelece que a amostragem e análise da água destinada para o consumo humano deve ser realizada com frequência mínima trimestral, nas Estações de Tratamento da Água e o valor máximo permitido (VMP) para a densidade de cianobactérias é de 20.000 células/ml, e para as saxitocinas o VPM é de 3,0 µg/L equivalente de STX/L. Neste contexto, outra importante normativa é a Resolução CO-NAMA nº 357/2005 a qual disserta sobre a classificação das águas naturais e também apresenta os padrões de qualidade para estas águas de acordo com sua determinada classe.

Tendo em vista a grande importância da Lagoa do Peri como manancial de captação para município de Florianópolis, uma vez que é utilizado para abastecimento da uma considerável parcela da população florianopolitana, e, considerando -se ainda, a presença de uma vasta comunidade fitoplanctônica, e em particular, de diferentes espécies de cianobactérias na água no local, a avaliação da composição, bem como, da ocorrência e densidade da comunidade fitoplanctônica da lagoa deve ser rotina dentro deste sistema, respeitando os padrões estabelecidos pela legislação vigente, de modo a orientar tomadas de decisão com respeito à

qualidade de água e a garantir o abastecimento em volume necessário e com a qualidade requerida.

Neste viés, este trabalho busca através da avaliação da ocorrência dos organismos fitoplantônicos na Lagoa do Peri, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, estabelecer a acurácia do uso das técnicas aplicadas de sensoriamento remoto para modelos bio-ópticos na Lagoa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a ocorrência do fitoplâncton na Lagoa do Peri, por meio de métodos aplicados de sensoriamento remoto e dados ambientais.

2.2 Objetivos Específicos

- Calibração do modelo bio-óptico para o pigmento clorofila a.
- Validação do modelo bio-óptico para clorofila a.
- Análise da ocorrência da comunidade fitoplantônica na Lagoa do Peri, através das técnicas de análise espectral.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Qualidade da água

A partir do ponto de vista dos usos múltiplos dos recursos hídricos, Von Sperling (2005), apresenta a definição da qualidade da água como sendo a resultante dos fenômenos naturais e antrópicos, como função das condições naturais e do uso e ocupação do solo para uma determinada bacia.

Para Azevedo Neto (1987) a qualidade da água pode ser definida através de suas características físicas (cor, turbidez, sabor, odor, temperatura, etc), químicas (dureza, salinidade, oxigênio dissolvido, cloretos, nitratos, etc) e biológicas (algas, bactérias, protozoários, etc), sendo determinadas por meio de exames e análises específicos.

Complementarmente, Callijuri e Cunha *et al* (2013), trabalham a ideia de que a qualidade de uma água natural é definida por um conjunto de características físicas, químicas, biológicas e radiológicas. Características estas, que são adquiridas e se modificam ao longo dos ciclos hidrológicos e bioquímicos na natureza. Esta mudança cíclica das variáveis que compõem a dinâmica de um sistema hídrico, faz com que desde as primeiras civilizações as técnicas de captação e de tratamento de água sejam adaptadas e evoluam em busca de garantir sua distribuição e, assim, o abastecimento para as populações humanas.

Lopes (2014), traz a perspectiva de que o abastecimento de água com qualidade e em quantidade suficiente para atender a demanda atual é um grande desafio para sociedade moderna, uma vez que o crescimento populacional juntamente com as crescentes taxas de consumo de água e a contaminação dos recursos hídricos, revelam a apreensão de que estes recursos se tornem cada vez mais escassos, caso não sejam tomadas providências quanto às práticas exploratórias utilizadas. Desta forma, o monitoramento da qualidade da água está associado a todas as inter-relações que ocorrem no ambiente e ele requer um planejamento que leve em consideração todas as potencialidades à nível de bacia hidrográfica.

Para Callijuri e Cunha *et al* (2013), um instrumento importante na preservação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas e dos mananciais de captação de água, é o estabelecimento de classificação e diretrizes ambientais que atuem no enquadramento dos corpos d'água superficiais, bem como, na fixação de condições e padrões em função da qualidade que se deseja manter ou alcançar.

Assim, para que se tenha a abordagem apropriada ao controle da qualidade das águas para abastecimento, foram criados instrumentos legais que atuam em sua regulação.

No Brasil, atualmente, cabe ressaltar como referências no controle dos parâmetros de qualidade das águas de abastecimento, a Portaria MS 2.914/2011, e a Resolução CONAMA nº 357/2005 que disserta sobre a classificação das águas do território brasileiro e dá diretrizes para seu enquadramento, bem como, para os padrões de lançamento de efluentes em cursos d'água. O Quadro 1, apresenta um resumo da classificação das águas conforme seus usos pré-determinados.

Quadro 1: Resumo da classificação das águas territoriais pela CONAMA nº 357/2005.

ÁGUA DOCE	USOS DETERMINADOS
CLASSE ESPECIAL	ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação e proteção ambiental.
CLASSE I	ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, conforme o disposto na Resolução CONAMA nº 274/2000; à irrigação de plantas e hortaliças; à proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas.
CLASSE II	ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, conforme o disposto na Resolução CONAMA nº 274/2000; à irrigação de plantas e hortaliças; à pesca e aquicultura.
CLASSE III	ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; à irrigação de culturas arbóreas; à pesca amadora; à dessedentação animal;
CLASSE IV	à recreação em contato secundário. à navegação; à harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado, CONAMA, 2005.

Para Shubo (2003), a manutenção da água como recurso, deve ser feita sob uma ótica multidimensional, mantendo a abordagem dos diversos aspectos que influenciam no seu uso e preservação. O autor retrata o enfoque na redução do consumo de água como sendo a principal das ações voltadas para a sua preservação, para ele, o uso eficiente da água em conjunto com a implantação de metas de otimização para o abastecimento urbano, trazem como principal consequência a diminuição da necessidade de captação nos mananciais e a diminuição dos volumes de águas residuárias geradas.

Outro aspecto importante que influencia na qualidade da água para abastecimento é o crescimento e a proliferação de algas no corpo hídrico. Este acontecimento na maioria das vezes é atribuído ao processo de eutrofização que ocorre em lagos, lagoas, reservatórios e rios, podendo conferir toxicidade à água e causar alterações significativas nos sistemas de tratamento e abastecimento.

Conforme Coral (2012 apud BABLON et al., 1991), elevadas densidades de cianobactérias em mananciais ocasionam uma série de alterações no corpo d'água, além de apresentarem toxicidade e limitar seu uso recreacional, resultam em perturbações nos ecossistemas aquáticos e provocam problemas operacionais para o tratamento da água de abastecimento. As principais alterações nos processos de tratamento são em função da variação do pH que estes organismos causam na água, diminuindo as eficiências nas etapas de coagulação e floculação no caso dos sistemas de tratamento e abastecimento de água.

3.2 Fitoplâncton: Cianobactérias e Cianotoxinas

De acordo com (SÁ et al., 2010), as cianobactérias são caracterizadas como organismos procariotos, fazem parte da comunidade fitoplânctônica e contribuem ativamente para o fluxo de energia nos ecossistemas aquáticos. Sua presença em corpos d'água é atribuída principalmente ao aporte de nutrientes em demasia, altas temperaturas e boa disponibilidade de luz. O aumento de sua densidade nos corpos hídricos é frequentemente atribuído ao processo de eutrofização sofrido nos ambientes aquáticos.

A presença destes organismos em lagos e reservatórios de água é preocupante tanto pelas alterações na cadeia trófica do ambiente, como pelas alterações operacionais causadas à sistemas de tratamento de água. (CORAL, 2012)

Alves (2005), apresenta como as principais consequências da eutrofização de corpos hídricos as seguintes alterações: mudanças na qualidade da água, provocada pelo aumento da biomassa e da produção primária, alteração na diversidade de espécies no ecossistema, diminuição da concentração de OD na coluna d'água, diminuição na transparência da água, mortalidade de peixes, acúmulo de fósforo no sedimento, possível produção de odores desagradáveis devido a decomposição da matéria orgânica, mudanças no pH e florações de cianobactérias.

Segundo Torgan e Mathiessen *et al* (1989, 1999 apud ALVES, 2005), florações algais caracterizam-se como o resultado das interações de fatores físicos, químicos e bióticos, as quais causam a explosão do desenvolvimento e crescimento das espécies de microrganismos produzindo visíveis colorações nos corpos de água naturais.

Neste sentido, ALVES (2005), declara que, normalmente as florações de algas tornam-se nítidas devido à mudança na coloração que conferem à água. Esta mudança nos tons pode ser de cristalina para esverdeada, verde azulada ou ainda avermelhada, dependendo dos níveis de concentração e da espécie relacionada ao fenômeno.

Estes *blooms* (florações) de cianobactérias presentes nos reservatórios de água destinada à produção de água para consumo humano podem causar inúmeros problemas, dentre eles, o mais preocupante o fato de que uma porção significativa destes organismos produzem uma ou mais toxinas (CAMPINAS *et al.*, 2002 apud MOSER 2011).

Coral (2012), apresenta em seu texto que as alterações provocadas pela intensa proliferação das cianobactérias afeta a dinâmica do corpo hídrico e de todo o ambiente, bem como, as elevadas densidades destes organismos causam problemas operacionais nas estações de tratamento de água, como a diminuição dos níveis de pH na água que interferem diretamente nas etapas de floculação e coagulação, suas variações de densidades podem dificultar a sedimentação dos flocos, o que resulta em maiores cargas para os filtros. Outra possível consequência devido à existência destes organismos em elevadas concentrações, em ambientes onde há a captação e tratamento de água é o aumento nas doses de coagulantes utilizados durante o tratamento, fato este, que provoca o aumento do lodo gerado e pode conferir sabor e odor na água.

Sobretudo aos problemas na operação de estações de tratamento de água, as cianobactérias apresentam em sua configuração celular a produção de toxinas (cianotoxinas), que é a uma das grandes preocupações com relação à sua presença em mananciais de abastecimento, pois as cianoto-

xinas são moléculas muito solúveis em água e não são passíveis de remoção pelos métodos de tratamento convencionais, tornando-se um desafio ainda maior (BARTRAM et al., 1999).

Cianotoxinas são um grupo de diferentes toxinas que são biossintetizadas por algumas espécies e cepas de cianobactérias, apresentam grande heterogeneidade química e propriedades toxicológicas. De modo geral, são encontradas dentro das células viáveis de cianobactérias, sendo que, apenas uma pequena parcela do armazenado é liberada para o meio líquido (AZEVEDO e BRANDÃO, 2003).

A principal classificação das cianotoxinas é baseada em sua ação farmacológica, ou seja, nos tecidos ou órgãos-alvo destes agentes. Segundo esta classificação, as cianotoxinas são divididas em: hepatotoxinas, neurotoxinas e dermatotoxinas (citotoxinas) (FUNASA, 2003).

Pesquisas relacionadas à Lagoa do Peri, que é um manancial de água para a cidade de Florianópolis/SC, indicam que as cianobactérias são um grupo de grande representatividade no local. Estes organismos se apresentam em altas densidades de células por mililitro e são dotadas da capacidade de produção de cianotoxinas. Segundo Laudares -Silva e Senna, (1999), alguns estudos realizados na lagoa apontam a predominância da espécie conhecida como *Cylindrospermopsis raciborskii*.

O êxito do desenvolvimento da *C. raciborskii* em regiões de clima tropical atribui-se à sua grande capacidade de se adaptar aos ambientes, uma vez que este organismo possui boa habilidade de flutuação, boa capacidade de realizar a fixação de nitrogênio atmosférico e de estocar do fosfato. O fato que gera preocupação devido à presença destes organismos nos lagos e reservatórios acontece pela detecção da ocorrência de diversos tipos de saxitoxinas. As saxitoxinas são substâncias potencialmente tóxicas que atuam diretamente no sistema nervoso quando infectam o organismo humano.

De acordo com Sens et al. (2005), as análises para detecção da concentração de saxitoxina e neosaxitoxina na Lagoa do Peri, em um período de dominância da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* podem atingir um total de 5,4 µg/L de equivalentes de saxitoxina.

Neste contexto, Aparicio (2007), apresenta o sensoriamento remoto como um método que ganhou espaço no monitoramento e em pesquisas que buscam estudar a qualidade das águas de sistemas aquáticos continentais. Segundo a autora, nos dias atuais cada vez mais é utilizado o sensoriamento remoto para estes fins. Um dos fatores que contribuem para esta crescente, é a geração de imagens, as quais tornam possíveis a realização de análises de maneira espacial e o estudo de corpos d'água de

variados tamanhos, o que produz bons indicadores de monitoramento e controle dos corpos d'água.

3.3 Fatores que desencadeiam o desenvolvimento das cianobactérias e fitoplâncton

O desenvolvimento das florações de cianobactérias em corpos d'água está associada a um conjunto de fatores que são capazes de desencadear sua formação no local. Dentre estes fatores, cabe ressaltar a influência de elevadas concentrações de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, altas temperaturas e incidência da radiação solar. (De SÁ et, al., 2010)

De acordo com Esteves (1998), o crescimento das comunidades fitoplantônicas é um processo complexo, que sofre a influência de diferentes fatores, sejam eles, bióticos ou abióticos. Para o autor, os fatores abióticos que possuem maior e representatividade sobre a produtividade do fitoplâncton são a radiação subaquática, a temperatura e a concentração dos nutrientes. Sobre os fatores bióticos, ele destaca como mais importantes, a taxa de reprodução dos organismos fitoplantônicos, herbivoria e as possíveis influências antrópicas sobre o meio.

Nas próximas seções seguem apresentados os principais fatores que desencadeiam e exercem influência na presença e proliferação das cianobactérias nos sistemas aquáticos costeiros.

3.3.1 Aporte de nutrientes e o processo de eutrofização de corpos lênticos

Kennish e Paerl (2010, apud TONETTA, 2012) conceituam lagos costeiros como ambientes aquáticos lênticos que se distribuem ao longo da costa, podendo receber influência direta ou indireta do ambiente marinho. São ambientes que apresentam uma grande biodiversidade, representando grande importância ecológica e comercial, pois são mananciais muito explorados, seja para lazer ou abastecimento da população.

O processo de eutrofização é reconhecido como um problema de alta relevância em se tratando da qualidade das águas. Além do fósforo e do nitrogênio, outros fatores como a dinâmica dos fluxos, velocidade da água, temperatura, turbidez, profundidade e variação dos níveis podem influenciar para a eutrofização de um corpo hídrico (LAMPARELLI, 2004).

Para (ESTEVES, 1998) o processo de eutrofização é definido como sendo o aumento das concentrações de nutrientes, que acontecem devido

ao incremento principalmente de fósforo e nitrogênio dentro da dinâmica dos ecossistemas aquáticos, os quais levam intensificação de seus processos produtivos. Devido a este processo, o ecossistema aquático passa da condição de oligotrófico e mesotrófico para eutrófico.

O metabolismo de um ambiente aquático é regulado pela atividade de todos os organismos que o compõe, especialmente por organismos fitoplantônicos, perifíton, bactérias autotróficas e heterotróficas, zooplâncton, macrófitas, entre outros, que são os responsáveis pelos processos de produção primária, ciclagem de nutrientes e decomposição da matéria orgânica Ducklow, (2008 apud TONETTA, 2012).

Para Tonetta (2012), a compreensão dos fatores que regulam a dinâmica da comunidade fitoplantônica e as taxas de produção primária em uma lagoa costeira subtropical permitem a realização de previsões sobre seu comportamento e a resposta desses ambientes às mudanças ambientais.

A produção primária de um ecossistema aquático é medida pela quantidade de matéria orgânica obtida através da fotossíntese ou quimiossíntese, somada às perdas em função dos processos de morte, herbivoria e parasitismo. Para estimar a produção primária em ambientes aquáticos, é utilizada a medida do consumo de oxigênio através dos cálculos das taxas de respiração e fotossíntese (ESTEVES, 1998).

Esteves (1998), apresenta alguns fatores principais que influenciam na produção primária em ambientes aquáticos, como: radiação solar (taxa de fotossíntese e profundidade da zona eufótica); temperatura (fisiologia dos organismos e distribuição de nutrientes na zona eufótica – diferenças de densidade); e disponibilidade de nutrientes.

De acordo com Hennemann (2010), o crescimento das comunidades fitoplantônicas podem indicar processos de eutrofização, pois o desenvolvimento destes organismos está diretamente relacionado com a concentração de nutrientes no meio. Da mesma forma, estes organismos são de grande importância nos processos de transferência de energia aos demais níveis da cadeia trófica.

Experimentos de manipulação da concentração de nutrientes e de estimativa da produção primária em lagoas são fundamentais para o conhecimento dos efeitos do processo de eutrofização sobre o funcionamento desses ambientes (HENNEMANN, 2010).

O processo de eutrofização faz com que aumente a probabilidade da ocorrência e proliferação de organismos fitoplantônicos, em especial as cianobactérias, as quais, dependendo da espécie, possuem características de toxicidade sob estresse, podendo causar alterações no ecossistema

aquático e na qualidade das águas utilizadas para abastecimento da população.

3.3.2 Incidência da radiação solar e temperatura

A radiação solar é a principal fonte de energia para os sistemas aquáticos, sendo assim, constitui um dos principais fatores que influenciam na fisiologia, crescimento e reprodução dos organismos aquáticos (TUNDISI E TUNDISI, 2008).

Segundo Esteves (1998), a radiação solar age diretamente sobre a taxa de fotossíntese dos organismos e contribui diretamente para a formação de três regiões distintas na coluna d'água: a região com excesso de radiação ou inibição fotossintética, de saturação de radiação e limitação de radiação.

Outro aspecto limitante para a eficiência no uso da radiação solar em sistemas aquáticos, é abordado por Kirk (1994). Segundo o autor, grande parte da luz incidente em sistemas aquáticos é atenuada pelo meio aquático. A profundidade na qual ocorrem as taxas máximas de fotossíntese varia com a transparência de água, que é regulada pela concentração de matéria orgânica dissolvida e do material particulado, ou seja, pela turbidez.

Por outro lado, altos índices de intensidade luminosa nem sempre são considerados fatores positivos para o desenvolvimento das comunidades fitoplantônicas. Wetzel (2001), aborda o fato de que altas taxas de intensidade de luz podem ser prejudiciais para muitas algas e causar a redução das taxas de fotossíntese, uma vez, que estes organismos normalmente trabalham dentro de uma “faixa ótima” para realização do processo de fotossíntese de maneira eficiente e altas taxas de incidência luminosa podem ultrapassar a saturação fisiológica do fitoplâncton.

Relacionado diretamente à radiação solar está o parâmetro temperatura do corpo d'água. A temperatura do meio atua sob duas formas distintas na produtividade da comunidade fitoplantônica, diretamente nos aspectos fisiológicos dos organismos e indiretamente, quando atua por exemplo na distribuição dos nutrientes, através da formação de camadas com diferentes densidades (ESTEVES, 1998).

Valores mais elevados de temperatura, acarretam no aumento nas taxas de produção da fotossíntese, uma vez que a fotossíntese é controlada por reações enzimáticas, e estas, sofrem grande influência da temperatura na sua cinética de reação (ESTEVES, 1998).

De acordo com Wetzel (2011), devido à sua característica de termofilia, as cianobactérias apresentam crescimento em altas temperaturas,

normalmente próxima à 25°C, podendo chegar a temperaturas superiores a 45°C, embora existam casos de exceções para desenvolvimento em baixas temperaturas.

3.3.3 Fatores relacionados ao corpo d'água e ambiente

Wetzel (2011), apresenta como fatores que também influenciam na dinâmica de desenvolvimento da comunidade fitoplanctônica a capacidade da água de movimentar e transportar materiais suspensos, ou seja, o grau de turbulência da água, que é fator de regulação da periodicidade e produção do fitoplâncton.

Segundo Cicerelli (2013), o fitoplâncton também possui movimento próprio, este potencial de flutuação depende da densidade dos organismos fitoplanctônicos (ligeiramente maior que o da água), do tamanho e da forma dos organismos que pode ser cilíndrica, esférica ou discoide, da presença de vesículas de gás, do acúmulo de hidrocarbonetos, da capacidade de regulação iônica e da utilização de flagelos em sua mobilidade.

Além disso, recentemente, pesquisas apontam o aumento da comunidade fitoplanctônica, principalmente, das cianobactérias, relacionado às mudanças climáticas. As variações no clima provocam alterações na dinâmica dos sistemas limnológicos, em suas variáveis físicas, químicas e biológicas o que influenciam no desenvolvimento dos organismos. (CICERELLI, 2013)

Tundisi et al. (2010), consideram em suas pesquisas que o impacto das chuvas sobre o desenvolvimento das cianobactérias pode levar ao aumento da descarga de nutrientes pela drenagem ou pelo revolvimento do fundo no lago. O acréscimo significativo de nutrientes auxilia no crescimento do fitoplâncton.

Segundo Cicerelli (2013), medidas de controle para os *blooms* de cianobactérias ainda são técnicas pouco conhecidas, uma vez que seu desenvolvimento também se encontra atrelado a fatores como a sedimentação fora da zona eufótica, que pode ser provocada por fungos e pela ação do zooplâncton.

3.4 Sensoriamento Remoto

O uso do sensoriamento remoto com a finalidade de monitoramento ambiental, requer o inicial entendimento de seus princípios básicos de funcionamento e da teoria que relaciona o processo de interação entre

radiação eletromagnética e o objeto sobre o qual ela incide (HELENO, 2009).

Novo (2008), define sensoriamento remoto como sendo o uso de equipamentos para processamento e transmissão de dados, os quais se encontram a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas, com o intuito de analisar e estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície da Terra.

A aquisição das informações sobre os objetos da superfície terrestre segundo as técnicas relacionadas ao sensoriamento remoto acontece por meio de dois sistemas: sistema de aquisição de dados e o sistema de produção de informações. O sistema de aquisição de dados opera segundo o uso dos componentes relacionados à fonte de radiação, sensor, plataforma e estação de processamento de dados. Já o sistema de produção de informações se estabelece através da aquisição das informações de solo para a calibragem dos dados, processamento das imagens e do sistema de geoprocessamento aplicado (NOVO, 2008).

De acordo com Heleno (2009), quando se opera dentro do sistema de aquisição de dados, a base para a coleta dos dados se dá através da interação energia-matéria. Sendo assim, sua análise e interpretação segue embasada no conhecimento da natureza, propriedades e interação entre estes elementos.

Jensen (2009), aborda em seu texto sobre a adequada compreensão e a correta interpretação dos dados coletados nos sistemas de sensoriamento remoto, aspectos estes, que se relacionam ao conhecimento das interações fundamentais que a energia eletromagnética realiza à medida que ela progride de sua origem até o sistema remoto de detecção. Uma vez, que a energia eletromagnética é a única forma de transferência de energia no vácuo, e, portanto, a responsável pela transferência de energia necessária para o sucesso das técnicas de sensoriamento remoto.

A radiação eletromagnética é o meio pelo qual a informação é transferida do objeto ao sensor. Ao conjunto de ondas eletromagnéticas que compõem um campo de radiação, se dá o nome de espectro. O espectro eletromagnético representa o conjunto de comprimentos de onda conhecidos, que vão desde os raios gama até as ondas de rádio (NOVO, 2008).

Na Figura 1, é possível observar as diferentes regiões do espectro eletromagnético. Esta divisão ocorre devido a três fatores: i) Processos físicos que dão origem à energia; ii) Tipo de interação que acontece entre a radiação e o objeto; e iii) Transparência da atmosfera relacionada à radiação. (NOVO, 2008). As porções situadas dentro do espectro eletromagnético, são baseadas nos comprimentos de onda correspondentes a

uma faixa contínua de valores, e são divididas em bandas ou faixas espectrais onde a radiação eletromagnética se manifesta de forma similar (NOVO, 2008).

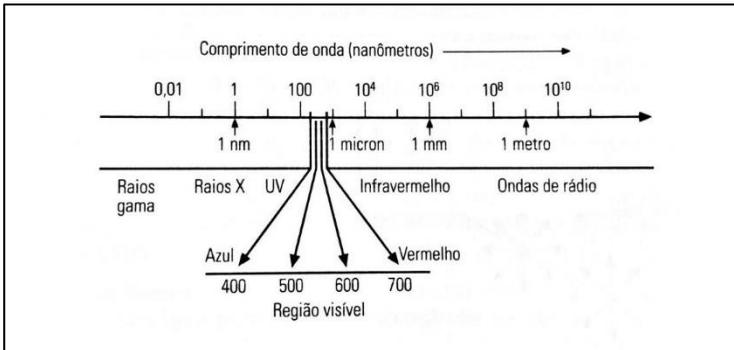


Figura 1: Regiões do Espectro Eletromagnético

Fonte: Novo, (2008).

Para entender melhor a interação entre matéria e energia é conveniente pensar na abordagem apresentada por Novo (2008), a qual explica que todo corpo com temperatura superior acima de 0° K emite radiação eletromagnética e, portanto, pode ser considerado uma fonte de radiação de energia. As ondas eletromagnéticas emitidas pela “fonte” são interceptadas por um corpo, que, de acordo com as propriedades intrínsecas da matéria vai emitir um resultado (radiação) desta interação energia-matéria.

Desta forma, quando há a incidência de certa quantidade de energia eletromagnética sobre qualquer objeto, podem ser descritos três fenômenos que atuam no processo de interação entre o objeto e a energia: a reflexão, a transmissão e a absorção. As frações de radiação que serão absorvidas, transmitidas ou refletidas dependerão das características físico-químicas do objeto (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007).

O Sol é considerada a principal fonte de radiação eletromagnética disponível para o *Sensoriamento Remoto* da superfície terrestre (NOVO, 2008). A radiação solar chega à atmosfera terrestre e então ocorre o processo chamado de absorção seletiva da radiação, ou seja, a absorção da energia especificamente para determinados comprimentos de onda.

A Figura 2, extraída do livro: *Sensoriamento Remoto, princípios e aplicações* (NOVO, 2008), apresenta o espectro de irradiância solar sobre a atmosfera da Terra, é possível perceber que a energia que chega à superfície terrestre não apresenta a mesma intensidade e está sujeita a interação com os elementos que compõe a atmosfera (oxigênio, água, ozônio

e o gás carbônico). Desta relação são formadas as regiões ou bandas de absorção.

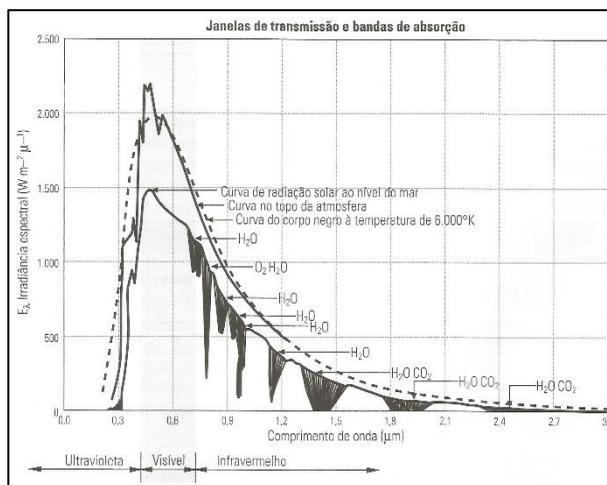


Figura 2: Espectro de irradiação solar
Fonte: Novo, (2008).

A maior quantidade de energia disponível na atmosfera ocorre na faixa do visível, onde a região não é tão afetada pelos elementos constituintes da atmosfera terrestre, estes elementos além de afetar a incidência de radiação através da absorção seletiva, também podem atenuar a radiação que chega a atmosfera da Terra. A maior irradiação solar na superfície terrestre, encontra-se na faixa de 400 a 700 nm, dentro da região do espectro visível (NOVO, 2008).

A diferença de absorção de energia é extremamente importante para a configuração dos sistemas de sensores da superfície terrestre.

Heleno (2009), define os diversos tipos de sensores em uso no sensoriamento remoto, como: fotográficos, eletro-ópticos, radares, radiômetros, orbitais; que se diferenciam de acordo com a fonte de energia (passiva ou ativa), a região do espectro (região óptica e microondas) e o comportamento espectral (imageadores ou não).

A principal diferença entre os sensores fotográficos e os eletro-ópticos, reside no fato, de que sensores eletro-ópticos são capazes de produzir um sinal elétrico, que pode ser gravado e transmitido a outras estações, ou seja, possuem a capacidade de transformar a radiação eletromagnética em sinais elétricos e assim, registrar infinitas imagens. Já os sensores fotográficos, foram concebidos com o intuito de realizar o reconhecimento

de locais de difícil acesso e para o uso em aplicações cartográficas, são dotados de um detector fotoquímico (não reutilizável) que não os possibilita captar uma infinidade de imagens (HELENO, 2009).

Os sensores ópticos orbitais, são os sensores utilizados nos satélites, eles são considerados sensores que detectam o comportamento espectral, ou seja, a transformação sofrida pela radiação. Sendo assim, são classificados como sensores de imageamento eletro-óptico. Estes sensores trabalham em uma ampla faixa do espectro eletromagnético e adquirem dados em forma de sinais eletromagnéticos, o que permite a transmissão à distância. (HELENO, 2009).

Novo (2008), define os sensores multiespectrais como uma evolução na concepção de sensores, uma vez que sua capacidade de obtenção de múltiplas imagens de uma mesma cena, possibilita informações com maior precisão.

O sistema de produção de informações abrange as técnicas e ferramentas utilizadas no pré-processamento dos dados e na extração das informações. As principais técnicas utilizadas neste sentido são: classificação digital, modelos empíricos e modelos ópticos (HELENO, 2009).

Para extrair os dados e informações dos sistemas de sensores é necessário o conhecimento sobre o comportamento espectral dos objetos na superfície terrestre e também dos diversos fatores que interferem em seu comportamento (NOVO, 2008).

Assim, nas próximas sessões serão abordados os principais conceitos acerca do comportamento espectral das superfícies, as possíveis interferências a serem sofridas e pré-processamento das imagens multiespectrais.

3.5 Comportamento Espectral da Água

Segundo Novo (2008), se houvesse a possibilidade da medição dos valores de refletância para um objeto em faixas espectrais ao longo de toda a sua região de reflexão no espectro, então, seria possível se obter a “assinatura espectral” deste determinado objeto. Esta “assinatura espectral”, corresponde a resposta espectral de um determinado objeto à quantidade de radiação que incide sobre ele em uma dada circunstância.

Normalmente, as análises do comportamento espectral dos alvos são realizadas através do uso de métodos experimentais que combinam análises de laboratório e de campo, onde a grandeza utilizada para expressar este comportamento é a refletância (NOVO, 2008).

A refletância é uma propriedade atribuída a um determinado objeto de refletir a radiação eletromagnética incidente sobre ele, sendo expressa

em fatores de refletância (ρ). Desta forma, o fluxo de radiação refletida por um determinado objeto ou superfície, além de suas características espectrais, as quais são definidas por suas propriedades físico químicas da matéria, também apresenta características geométricas definidas a partir da incidência ou reflexão da radiação superfície (PONZONI E SHIMABUKURU, 2007).

Os fatores que controlam o comportamento espectral dos objetos podem variar de acordo com a região do espectro e com o tipo de alvo analisado. De forma didática, estes fatores podem ser classificados em grandes grupos: fatores macroscópicos, ligados ao estado da superfície alvo e os fatores externos ao alvo, como a natureza da fonte de iluminação, localização do objeto alvo, posição da fonte e fatores microscópicos os quais estão ligados à natureza e composição da superfície (NOVO, 2008).

Os diferentes estados físicos sob os quais a água se apresenta na natureza influenciam diretamente no seu comportamento espectral. A diferença entre comportamento espectral das fases líquida, neve e nuvens, pode ser observada na Figura 3 abaixo (NOVO, 2008).

Novo (2008), apresenta os elementos da Figura 3, de acordo com suas propriedades de absorção e refletância da água. Segundo a autora, a água no seu estado líquido apresenta uma baixa refletância, absorvendo toda a radiação que se encontra acima de $0,7 \mu\text{m}$. Sob a forma de nuvens a água possui uma altíssima refletância, com suas bandas de absorção muito amplas entre $1,0 \mu\text{m}$, $1,3 \mu\text{m}$ e $2,0 \mu\text{m}$. Já na forma de neve a água apresenta altíssimos valores correspondentes à refletância, variando em $0,7 \mu\text{m}$, $1,2 \mu\text{m}$ e $1,4 \mu\text{m}$.

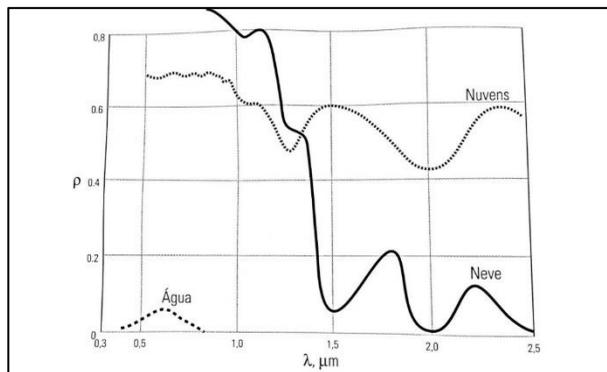


Figura 3: Comportamento espectral da água.
Fonte: Novo, (2008).

Outro aspecto relevante sobre o comportamento espectral da água, é a resposta da interação entre a energia eletromagnética e o corpo d'água, que ocorre entre o elemento água e os demais elementos opticamente ativos presentes em sua superfície, seja na sua forma dissolvida ou particulada. Portanto, a resposta inerente a esta interação depende das características destes elementos, como seus coeficientes de dispersão ou absorção, quantidade e qualidade da energia radiantes e/ou incidente sobre o corpo d'água (HELENO, 2009).

Segundo Novo (2008), a água pura possui baixa refletância, mesmo na região visível do espectro, este fato acontece devido ao pequeno coeficiente de espalhamento e elevada transmitância da água pura (livre de constituintes em suspensão ou dissolvidos). Em seu texto a autora traz os constituintes que afetam o comportamento espectral da água divididos em três grupos: 1) Organismos vivos (fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton), 2) Partículas em suspensão (orgânicas e inorgânicas) e 3) Substâncias orgânicas dissolvidas.

Um dos desafios encontrados dentro do uso das técnicas de sensoriamento remoto é, exatamente, quando nas águas naturais são observadas a presença de componentes opticamente ativos, uma vez que derivar (extrair) informações quantitativas, é muito mais difícil do que para a água pura (JENSEN, 2010)

O efeito da presença de fitoplâncton na água pode ser indicada pela concentração de clorofila a, pigmento mais comum nos diferentes gêneros de organismos vivos presentes na coluna d'água (NOVO, 2008).

De acordo com Jensen (2010), todo fitoplâncton presente nos corpos d'água contém o pigmento fotossinteticamente ativo clorofila a, que serve como indicador da componente orgânica de águas naturais opticamente complexas. Em seu texto, o autor explora o fato que os diferentes tipos de fitoplâncton possuem diferentes concentrações de clorofila a, o que produz diferentes cores para os sensores remotos. Esta característica, torna possível, ao se registrar a cor de uma área do corpo d'água através de uma imagem, se realizar a estimativa da quantidade e do tipo geral do fitoplâncton na área estudada, o que fornece a informação sobre a condição ambiental e química do local.

Jensen (2010), apresenta a análise da resposta espectral da água quando introduzida na água pura, a clorofila a, este elemento provoca a alteração das características de refletância espectral da água, isto é, mudanças em sua cor. Ao analisar as características das curvas de refletância espectral da água clara (pura) e da mesma água contendo algas compostas primariamente por clorofila a, na Figura 4, o autor, chega às seguintes conclusões: o comportamento espectral da água clara resulta numa maior

refletância entre os comprimentos de onda 400 e 500 nm, e uma diminuição da reflexão em comprimentos de onda maiores (710 nm). Já para a amostra de água contendo algas, é perceptível que no comprimento de onda entre 400 e 500 nm ocorre um pico de absorção da luz azul pela clorofila a, e o mesmo acontece no comprimento de onda 675 nm. Enquanto que o máximo de refletância é atingido em 550 nm, na região do verde visível, e outro pico de refletância é observado entre 690 e 700 nm, região do infravermelho próximo, sendo este pico provocado pelo efeito do espalhamento das algas na água, a altura deste pico acima da linha do mínimo de absorção retrata a quantidade de clorofila a da amostra.

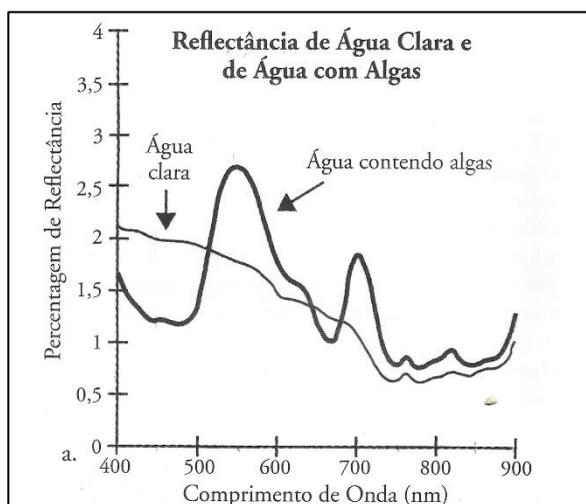


Figura 4: Análise espectral da água.

Fonte: Jensen, (2010).

Em suma, quando a concentração de clorofila a aumenta na coluna d'água, há uma diminuição da energia refletida nos comprimentos de onda relativos ao azul e vermelho e um aumento na refletância do comprimento de onda verde (JESSEN, 2010).

Novo (2008), salienta que um dos pontos relevantes nos estudos do comportamento espectral de águas com elevada biomassa de fitoplâncton, é que, água com altas concentrações de fitoplâncton, locais onde ocorrem as florações à superfície, possuem um comportamento espectral semelhante ao da vegetação terrestre, isto é, com seu máximo de refletância no verde, e no infravermelho mais distante das bandas de absorção da água pura.

Sendo a fotossíntese um processo de armazenamento de energia que ocorre nas folhas e em outras partes da planta na presença de radiação, este meio da geração de alimento é fator determinante em como uma planta ou dossel aparecem radiometricamente em imagens de sensoriamento remoto (JENSEN, 2010).

3.5.1 Processamento Digital das Imagens Multiespectrais

Toda a energia eletromagnética, incidente na atmosfera terrestre, é parcialmente absorvida, refletida e/ou espalhada pela superfície. O fenômeno do espalhamento ou dispersão da energia eletromagnética é definido como sua re-irradiação em todas as direções, e é causado pelas partículas que compõem a atmosfera da Terra. Sendo assim, o sinal registrado pelo sensor para cada *pixel* não corresponde à correta radiância do objeto ou área, uma vez que seu sinal é atenuado pela absorção ou sofre desvio pelo espalhamento na atmosfera (IBGE, 2000).

Jensen (2010), aborda os aspectos relacionados a esta sensibilidade de detecção dos sensores como sendo a propriedade de resolução radiométrica das imagens de satélite. O autor define a resolução radiométrica como a capacidade sensível que um detector de sensoriamento remoto possui, frente a diferenças na potência do sinal, à medida que registra o fluxo radiante refletido, emitido ou retrospalhado pelo terreno. É esta, a propriedade, que determina o número dos níveis que são discriminados com clareza pelo sensor e consequentemente a quantidade de energia recebida. Normalmente, os valores atribuídos aos *pixels* nas imagens de satélite expressam a quantidade de energia radiante recebida pelo sensor em valores, sem a realização da calibração, estes valores são chamados: números digitais- NDs. (EASTMAN, 2006).

Segundo Novo (2008), cada banda espectral e cada sensor possuem um padrão próprio de identificação dos valores de radiância, os quais são medidos na escala de sua resolução radiométrica (8 bits, 16 bits, 34 bits, etc). Mesmo as imagens de um mesmo sensor, em diferentes bandas, nem sempre irão apresentar compatibilidade entre seus números digitais (NDs). Assim, um valor de ND em duas imagens, com diferentes bandas espectrais não estará na mesma escala de cinza, isto resulta em uma incompatibilidade e na impossibilidade da comparação entre diferentes NDs de diferentes sensores e/ou entre as bandas espectrais de um mesmo sensor (PONZONI & SHIMABOKURO, 2007).

Para resolver esta questão, é realizada a conversão dos NDs para valores físicos de radiância ou refletância do objeto estudado. Realizar este processo requer o conhecimento das características do sensor e das

condições ambientais nas quais foram geradas as imagens. Uma vez de posse destes dados, a conversão pode ser realizada por meio de algoritmos específicos de processamento digital de imagens.

Este processo de conversão dos números digitais para valores físicos de radiância é muito utilizado para a comparação entre dados de diferentes bandas espectrais de um mesmo sensor ou de sensores diferentes, constituindo assim, um parâmetro mais apropriado na avaliação das propriedades espectrais de objetos em função da intensidade de energia radiada pela fonte.

Para realizar a conversão dos valores dos números digitais (NDs) para Fator de Refletância Bidirecional Aparente-FRB, Markhan e Barker (1996), trazem um método onde inicialmente é realizada a conversão para valores de Radiância e posteriormente para FRB. Para isto, os modelos matemáticos existentes utilizam diferentes parâmetros, os quais são associados a cada sensor para realizar esta conversão de dados, para determinação da radiância, utiliza-se a da seguinte equação 3.1 abaixo.

$$L_{\gamma} = \left(\frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{calmax} + Q_{calmin}) + L_{min} \quad (3.1)$$

Onde,

L_{γ} : Radiância espectral na abertura do sensor : em watts/(metro quadrado * ster * μm)

Q_{cal} : Valor quantizado calibrado de um pixel em nível de cinza, trata-se do valor de nível de cinza para cada pixel individual;

L_{min} : Radiância espectral que é dimensionada para Q_{calmin} em watts/(metro quadrado, μm);

L_{max} : Radiância espectral que é dimensionada para Q_{calmax} em watts/(metro quadrado, μm);

Q_{calmin} : Valor mínimo quantizado calibrado de um pixel em nível de cinza;

Q_{calmax} : Valor máximo quantizado calibrado de um pixel em nível de cinza igual a 255.

L_{min} e L_{max} são os valores de radiância correspondentes aos valores mínimo e máximo de nível de cinza, e são apresentados no arquivo de metadados para cada imagem. O menor valor de nível de cinza (Q_{calmin}) é igual a 1, e o valor máximo de nível de cinza (Q_{calmax}) é igual a 255.

Para se obter os valores de refletâncias nas imagens analisadas, utiliza-se a equação para refletância, a qual segue abaixo.

$$\rho_{\rho} = \left(\frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta_s} \right) \quad (3.2)$$

ρ_{ρ} : Refletância;

L_{λ} : Radiância espectral na abertura do sensor;

d : Distância entre a Terra e o Sol em unidades astronômicas;

ESUN: Irradiância solar;

θ_s : Ângulo zenital solar;

Apesar da conversão de ND para FRB aparente, ainda não é possível a caracterização espectral de um objeto existente na superfície terrestre, devido aos efeitos da atmosfera sobre o sensor, estes feitos interferem nos valores de FRB aparente. Para que tal caracterização seja possível, é necessária a eliminação ou minimização dos efeitos da atmosfera sobre os valores de FRB aparente através de métodos específicos de tratamento de dados.

Novo (2008), afirma, que os efeitos de interferência da atmosfera sobre as imagens de sensoriamento remoto estão principalmente relacionados a redução do contraste entre os objetos de uma dada cena, a redução da possibilidade de detecção de pequenos objetos dentro de uma cena, ou de diferenciação entre objetos que por ventura apresentem baixas variações na intensidade de sinal.

Com a conversão de números digitais (ND) para valores de parâmetros físicos, como refletância, se objetiva a caracterização espectral do objeto de estudo em imagens de sensores. Isto é válido, uma vez que ND não são comparáveis entre bandas e/ou diferentes imagens, mesmo para um mesmo sensor (Pozoni & Shimabukuro, 2007). Para que se obtenha o sucesso almejado no processo de conversão de ND em valores de refletância, e no processo de análise de imagens de satélite faz-se necessário, então, a correção atmosférica da imagem, objetivando eliminar quaisquer interferências oriundas das variações na sensibilidade do sensor ao longo do tempo de imageamento (Pozoni & Shimabukuro, 2007).

3.5.2 Uso do sensoriamento remoto na detecção do fitoplâncton

Devido a composição da comunidade fitoplanctônica possuir uma grande diversidade de fotoautotróficos, tanto procariontes, quanto eucari-

ontes, como as algas e as cianobactérias. Um dos mecanismos de diferenciação destes seres é a presença ou ausência de pigmentos, tais como: clorofilas, carotenóides e biliproteínas, os quais se associam ao processo de fotossíntese realizado por estes organismos (Raven *et al.*, 2007 apud Heleno, 2009).

Para Pozoni & Shimabukuro, (2007), estes pigmentos são responsáveis pela absorção de luz, e cada um deles apresenta um espectro de absorção com picos de absorção determinados e comprimentos de onda específicos.

Heleno (2009), apresenta em seu texto outras características fotométricas relevantes no estudo deste grupo de organismos. A autora, explica que, além da absorção específica dos pigmentos, eles apresentam outras características fotométricas específicas, tais como a fluorescência e a refletância que definem os diferentes grupos entre si. Estas diferenças em sua composição de pigmentos, tanto qualitativamente e quantitativamente, fazem com que suas características fotométricas também sejam distintas. Desta forma, a autora explora, que devido as distintas características fotométricas na comunidade fitoplanctônica é que existe a possibilidade da realização dos trabalhos de avaliação e monitoramento através de técnicas de sensoriamento remoto, uma vez que a energia eletromagnética interage com os pigmentos resultando em radiações específicas de acordo com as espécies que compõem esta comunidade.

As variações da resposta eletromagnética de um objeto, são medidas principalmente pela variável refletância, e seu resultado padrão é chamado de assinatura espectral (Heleno, 2009). Gitelson *et al.*, (1999), explica que para os diferentes grupos de organismos pertencentes à comunidade fitoplanctônica, observam-se assinaturas espectrais associadas ao comportamento espectral do pigmento clorofila *a*, as quais correspondem: a baixa refletância na faixa de 440nm (azul) e 670nm (vermelho), a qual é atribuída a ocorrência da absorção pela clorofila *a*, picos de refletância na faixa de 570nm (verde) e de 700nm (infravermelho próximo) que são explicados devido aos processos de dispersão na superfície das células e à característica da fluorescência da clorofila *a*. Já para as cianobactérias o que observa é uma baixa refletância a 620nm devido à absorção pelo pigmento fotossintético acessório ficocianina-C, característico nestes organismos.

Tanto a presença, quanto a composição de um pigmento em específico, são fatores de grande importância no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton. Porém, sua resposta espectral depende da influência de outros fatores como: a distribuição na coluna d'água, morfologia e fisiologia celular, densidade de células, como os pigmentos estão

organizados na célula ou colônia e tamanho e estrutura do fitoplâncton (Londe, 2008).

Além disso, segundo Heleno (2009), diferentemente do que ocorre em águas oceânicas abertas, onde a variação da resposta óptica da água é quase exclusivamente dependente da biomassa fitoplanctônica, para ambientes aquáticos continentais e costeiros, outras fontes de matéria em suspensão particulada orgânica e inorgânica, além da matéria orgânica dissolvida, também afetam sua resposta óptica. Sendo assim, diferenciar qual sinal captado pelo sensor corresponde somente ao pigmento clorofila *a* para estimar a biomassa fitoplanctônica torna-se um processo mais complexo.

Neste contexto, Gitelson *et al.* (1993) propuseram modelos bio-ópticos para estudos da concentração da clorofila *a*, do material particulado em suspensão, e matéria orgânica dissolvida nos sistemas aquáticos. Sua proposta tem como base um grande banco de dados da Europa, onde para cada um dos compostos analisados (clorofila *a*, o material particulado em suspensão e matéria orgânica dissolvida) foi encontrada sua correlação mais forte dentro do espectro: 680 - 710 nm para o fitoplâncton (clorofila *a*), 560 - 590 nm para matéria em suspensão e 450 - 480 nm para matéria orgânica dissolvida. Desta análise também foi possível obter por normatização o valor de refletância (refletância ativa - R_a) e (refletância referência - R_r) distinguindo através do método qual das refletâncias foi mais influenciada pela variação do composto analisado. Para clorofila *a* foi verificado que a refletância normalizada ideal seria a razão entre a R_a a 700 nm e a R_r a 675 nm. Esta relação é denominada razão NIR/RED (Near Infra-Red / Red), devido à posição no espectro de tais dados encontrarem-se na porção do infravermelho próximo (700 nm) e no vermelho (675 nm). Para as cianobactérias em específico, a razão NIR/RED também é utilizada; entretanto, a refletância em RED é obtida a 620 nm por sua relação com a absorção pela ficocianina (Gitelson *et al.*, 1999).

O modelo da razão NIR/RED é muito utilizado na estimativa do fitoplâncton em vários estudos, mesmo quando o melhor comprimento de onda para as refletâncias ativa e de referência foram um pouco diferentes dos encontrados por Gitelson *et al.* (1993). Heleno (2009), aborda o uso do modelo NIR/RED para a estimativa da concentração de pigmentos fotossintéticos é aplicável somente quando o sensor apresenta uma resolução espectral suficientemente boa para distinguir entre as faixas espectrais consideradas, como espectro radiômetros de campo.

De acordo com Feng *et al.*, (2005) as técnicas utilizadas nas estimativas dos constituintes dos ecossistemas aquáticos evoluíram de algoritmos empíricos (baseados em dados), para métodos de análise baseados em modelos. Os algoritmos analíticos (baseados em modelos) trabalham com relações bem estabelecidas entre propriedades ópticas aparentes (como radiância e refletância) e propriedades ópticas inerentes (absorção e espalhamento).

Desta forma, e a partir da revisão na bibliografia consagrada, é possível se afirmar que a aplicação de métodos que avaliem o índice de vegetação para determinação dos organismos fitoplantônicos em ambientes aquáticos costeiros tornam-se importantes ferramentas na avaliação dos índices da concentração do fitoplâncton em ambientes aquáticos pois são capazes de elucidar os resultados das concentrações deste pigmento no ambiente analisado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

Situada no estado de Santa Catarina, a Lagoa do Peri corresponde ao maior corpo de água doce Ilha de Santa Catarina. (Lapolli *et al.*, 1990). De acordo com (Castilhos, 1997) trata-se de um lago costeiro que se formou devido ao isolamento do mar, pela formação de depósitos de sedimentos. É um local de preservação ambiental, pertencendo ao Parque Municipal da Lagoa do Peri. No parque está localizada a Estação de Tratamento de Água Lagoa do Peri, que abastece a porção Costa Leste/Sul da Ilha de Florianópolis, projeto este pertencente à Companhia de Águas e Saneamento de Santa Catarina (CASAN), conforme apresenta a Figura 5.

A preocupação com a qualidade de suas águas é constante na Lagoa do Peri, uma vez que se trata do maior reservatório natural de água doce do município de Florianópolis, atende até 113.000 habitantes nas altas temporadas de verão (CASAN, 2016).

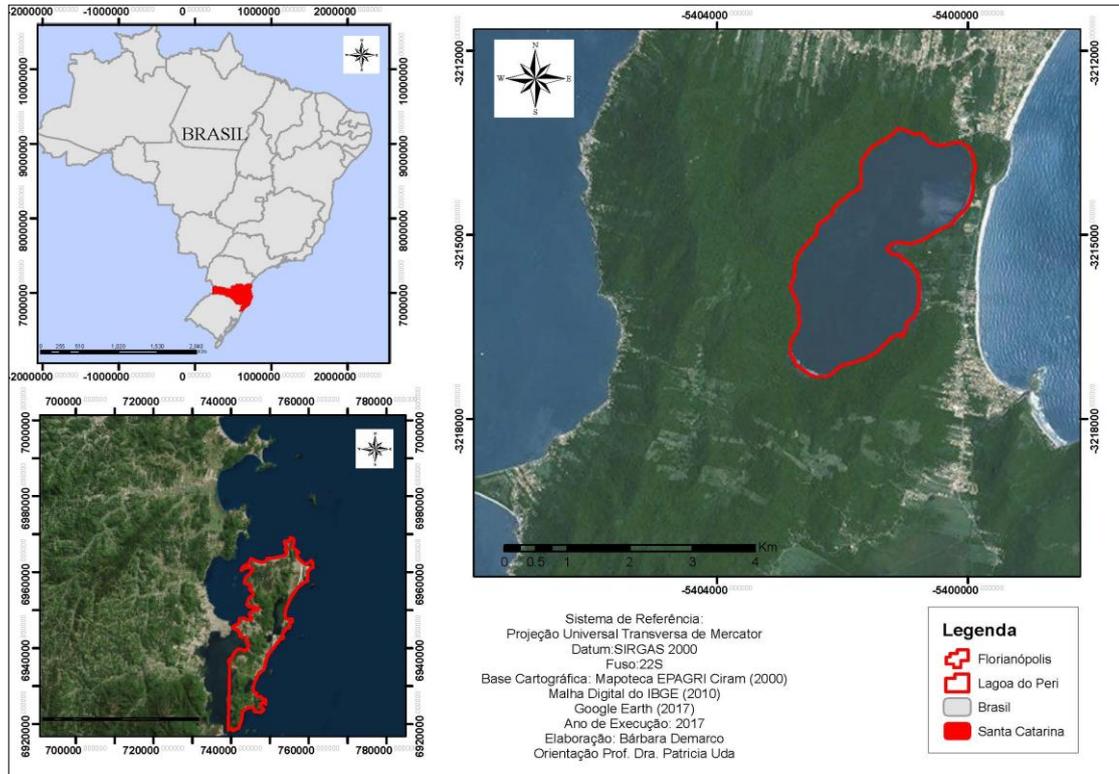


Figura 5:Localização da Lagoa do Peri

A lagoa do Peri é um lago costeiro subtropical, de água doce, que apresenta homogeneidade espacial para clorofila *a* e nutrientes. O local possui elevadas densidades de cianobactérias, principalmente *Cylindrospermopsis raciborskii*, e também apresenta característica oligotrófica para a concentração de nutrientes (Komárková et al., 1999; Laudares-Silva, 1999; Grellmann, 2006; Hennemann e Petrucio, 2011, apud TONETTA, 2012)

Lagoas costeiras são separadas do oceano por uma barreira ou conectados a este por um ou mais canais assim, lagoas costeiras podem vir a apresentar diferenciação em seus níveis de salinidade (ESTEVES et al., 2008).

Estes sistemas lênticos possuem ricos ecossistemas, que abrigam uma considerável diversidade em sua composição. Fazendo parte da lista dos ecossistemas mais produtivos do planeta, como apresentam um amplo conjunto de recursos, estas lagoas são consideradas ambientes de grande importância ecológica e econômica (ESTEVES et al., 2008).

Por se localizarem em regiões que possuem como característica realizar a interface entre os sistemas mar/continente, as lagoas costeiras não costumam apresentar grandes profundidades e sofrem as influências das alterações climáticas com regularidade. Outra característica relevante é que as lagoas costeiras possuem sua hidrodinâmica intensamente relacionada com sua topografia de fundo, sofrendo com a interferência dos ventos em sua configuração e na distribuição de sedimento.

Na Lagoa do Peri pode se observar um grande número de organismos fitoplantônicos, principalmente relacionados à espécie cianobactérias, mas este fato não a classifica como eutrofizada. “A presença de cianobactérias tóxicas em mananciais de abastecimento de água tem sido destacada como um perigo em potencial para a qualidade da água destinada ao abastecimento humano” (CORAL, 2012).

A presença destes organismos na Lagoa do Peri, objeto de estudo deste trabalho, não evidencia o processo de eutrofização no ambiente, mas se apresenta como fator de alerta devido ao aumento da espécie *Cylindrospermopsis raciborskii* em expressivas densidades, a qual, possui potencial de toxicidade.

4.2 Materiais

A aquisição dos dados da Qualidade da Água no local foi realizada junto à Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, mais precisamente

junto ao Laboratório de Limnologia – Limnologia da universidade, estes estudos na Lagoa do Peri, tem o intuito de entender a dinâmica do ambiente local e promover a preservação do manancial. Os dados disponibilizados para este trabalho contam com coletas de amostras desde o ano de 2007 até o ano 2016, o monitoramento é realizado para cinco pontos distintos ao longo do entorno da lagoa, sendo que o também possui coleta em 3 diferentes profundidades, as quais são realizadas no P01 – Ponto Central da Lagoa, para os pontos 2, 3 e 4 respectivamente.

O Quadro 2, apresenta suas coordenadas e localização dos pontos de amostragem. Abaixo a Figura 6.

Quadro 2 - Coordenadas e localização dos Pontos de Monitoramento - UFSC

Ponto	Coordenada		Localização
	X(m)	Y(m)	
P01	744378	6930245	Ponto Central – sub superfície
P02	743189	6929715	Ponto Central - profundidade do desaparecimento do Secchi
P03	743193	6928513	Ponto Central - limite zona fótica
P04	745512	6930746	Ponto Central - zona afótica
P05	745401.84	6933397	Cachoeira Grande
P06	744378	6930245	Ribeirão Grande
P07	743189	6929715	Praia
P08	743193	6928513	Norte da Lagoa

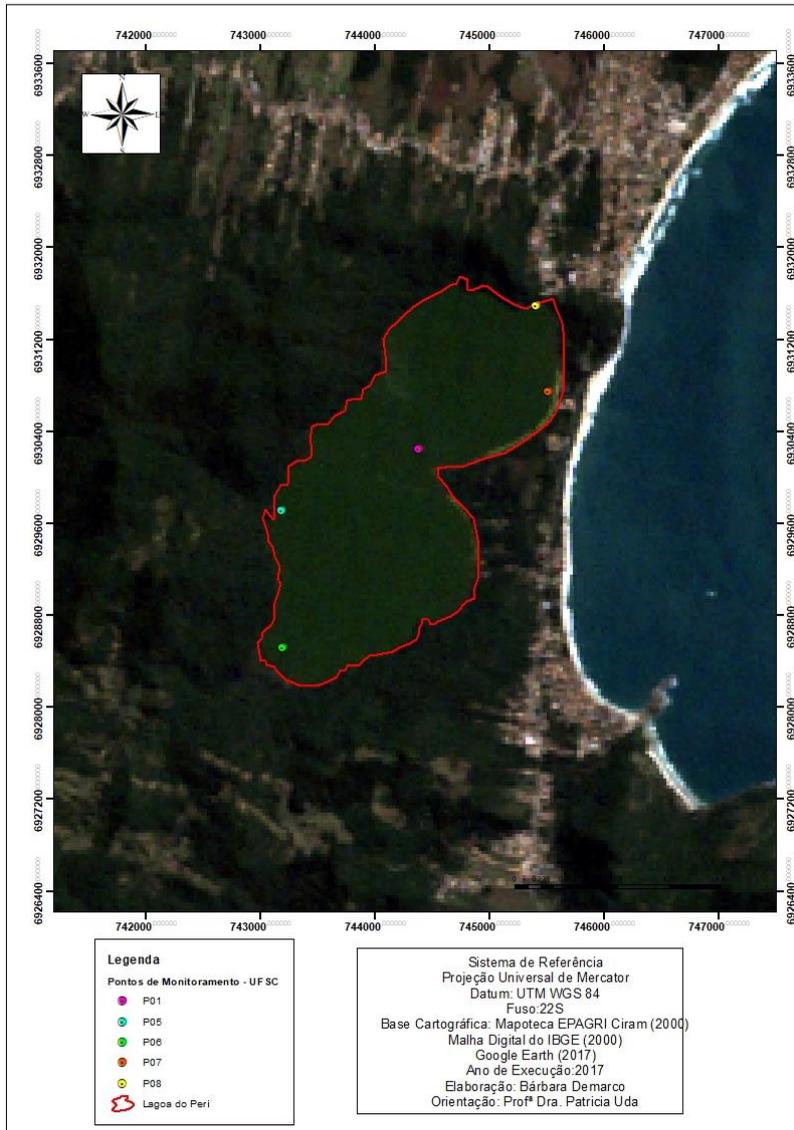


Figura 6: Localização dos Pontos de Monitoramento – UFSC

Inicialmente, para este estudo, buscava-se correlacionar os dados da qualidade da água oriundos dos monitoramentos da CASAN na Lagoa do Peri, desde o de 1996 até 2010, abrangendo períodos anteriores ao estabelecimento da captação no local, a fim de melhor avaliar a ocorrência e o desenvolvimento da comunidade fitoplantônica. Porém devido a qualidade dos dados disponibilizados, que para alguns períodos de amostragem se mostraram inconsistentes para este tipo de análise, optou-se por utilizar somente os dados da Universidade Federal de Santa Catarina, durante o período de 2007 a 2010.

No processamento e análise dos dados digitais foram utilizados os programas computacionais *ERDAS Imagine versão 2014*, *Envi 5.3*, *ArcGis 10.1* e *Microsoft Office Excel*.

As imagens analisadas, foram obtidas gratuitamente no site do Serviço Geológico Americano (USGS), <https://www.usgs.gov>. Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizadas imagens do satélite LandSat TM5, as quais encontram-se listadas na Tabela 2, as imagens possuem resolução radiométrica de 8bits (256 níveis de cinza), resolução espectral com três bandas na região do espectro visível (bandas 1, 2 e 3), uma banda cobrindo o infravermelho próximo - IVP (banda 4), duas bandas cobrindo o infravermelho médio – IVM (bandas 5 e 7) e data de passagem do satélite a cada 16 dias.

Foram analisadas 46 imagens, abrangendo 9 anos de dados.

Na pré-seleção das imagens, verificou-se que no ano de 2008, devido as intensas chuvas que atingiram o Estado de Santa Catarina, comprometendo seu uso, não apresentou a qualidade necessária para as análises deste trabalho.

Tabela 1: Imagens selecionadas para o estudo.

Nº Imagem	Data			Resolução Espacial
	Dia	Mês	Ano	
01	30	05	2000	30 m
02	19	08	2000	30 m
03	31	10	2000	30 m
04	23	11	2000	30 m
05	26	01	2001	30 m
06	15	03	2001	30 m
07	03	11	2001	30 m
08	19	11	2001	30 m
09	28	12	2001	30 m
10	29	01	2002	30 m
11	23	02	2002	30 m
12	11	03	2002	30 m
13	24	07	2002	30 m
14	12	08	2003	30 m
15	09	11	2003	30 m
16	20	02	2004	30 m
17	07	03	2004	30 m
18	17	04	2004	30 m
19	06	07	2004	30 m
20	30	08	2004	30 m
21	15	09	2004	30 m
22	26	10	2004	30 m
23	04	12	2004	30 m
24	19	03	2005	30 m
25	27	05	2005	30 m
26	02	09	2005	30 m
27	20	10	2005	30 m
28	21	11	2005	30 m
29	14	04	2006	30 m
30	16	05	2006	30 m
31	19	07	2006	30 m
32	29	08	2006	30 m
33	11	8	2006	30 m
34	05	09	2006	30 m

35	12	05	2007	30 m
36	29	06	2007	30 m
37	06	07	2007	30 m
38	23	08	2007	30 m
39	01	02	2009	30 m
40	24	05	2009	30 m
41	12	08	2009	30 m
42	12	01	2010	30 m
43	18	04	2010	30 m
44	27	05	2010	30 m
45	12	09	2010	30 m
46	28	11	2010	30 m

4.3 Métodos

Para melhor estruturar as fases que compreendem o estudo e visando garantir os instrumentos, técnicas e processos necessários para elaboração do trabalho de conclusão de curso, na Figura 7, segue exposto o fluxograma metodológico de atividades, o qual formula a produção de conteúdo e enfatiza a abordagem adotada para o trabalho em questão.



Figura 7: Fluxograma de atividade

O início da pesquisa se deu com a seleção da área de estudo. O enfoque na Lagoa do Peri, para o desenvolvimento das metodologias propostas por este trabalho, teve como principal motivação a relação de desenvolvimento de organismos fitoplantônicos em manancial de abastecimento público.

Considerando a distribuição espacial desigual das algas nas colunas d'água, fator este, que está intrinsecamente ligado aos fatores ecológicos (temperatura, propriedades dos organismos fitoplântonicos, luz, distribuição dos nutrientes), correntes de ventos e fatores hidrodinâmicos, o uso das ferramentas apresentadas no sensoriamento remoto, permite a maior acurácia dos elementos de monitoramento da qualidade das águas.

Uma vez selecionada a área de estudo, foi desenvolvida uma investigação sobre o perfil temporal da atividade fitoplantônica na Lagoa do Peri, a fim de descobrir a dinâmica de desenvolvimento destes organismos e qual período de enfoque para as futuras análises de proliferação. Para tal, foram realizadas pesquisas em bibliografia consagrada sobre a região.

Em paralelo a esta pesquisa, realizou-se a aquisição das imagens a serem utilizadas no estudo temporal do desenvolvimento e proliferação das cianobactérias na Lagoa do Peri.

Para as imagens multiespectrais analisadas, foi realizado um ajuste geométrico e a calibração radiométrica das imagens, que será abordada com maior detalhamento no próximo subtópico desta sessão.

No desenvolvimento do estudo foram utilizados 3 métodos diferentes, para aferir sobre a ocorrência dos organismos fitoplantônicos na área de estudo, são eles:

- Análise dos dados de refletância: O qual teve como objetivo avaliar os procedimentos de extração dos dados espectrais realizados sobre as imagens selecionadas.
- Análise da resposta espectral da Lagoa do Peri: Objetivou realizar a análise comparativa da curva espectral da Lagoa do Peri e seus dados de refletância média, com dados da curva espectral da água teórica, obtida da bibliografia consagrada.
- Correlação dos dados de Clorofila a com as curvas espectrais: Neste método buscou-se analisar a correlação dos dados da concentração de Clorofila, obtidos através das amostras in loco, dos pontos de monitoramento dos projetos da UFSC com as curvas espectrais construídas para as imagens selecionadas. Avaliando as correspondentes as

faixas espectrais representativas para o parâmetro clorofila a.

4.3.1 Processamento Digital das Imagens Multiespectrais

De acordo com Ponzoni e Shmabukuro (2010), as técnicas de processamento digital tem como principal objetivo a preparação das imagens, para que assim, elas possam ser utilizadas. Estas técnicas incluem o uso de algoritmos específicos que buscam atuar na correção das imperfeições geométricas e radiométricas das imagens.

Sendo assim, para as imagens analisadas neste trabalho, após seu *download* no site da USGS, em uma primeira etapa, foram executados os empilhamentos das bandas espectrais das imagens, através do comando *Layer Stack* do *software* ERDAS IMAGINE 2014, seguido de sua reprojeção e recorte. Em seguida, foram realizados os processos de calibração radiométrica e correção atmosférica.

4.3.1.1 Calibração Radiométrica e Correção Atmosférica das Imagens Multiespectrais

As interferências nas imagens de satélite, causadas devido ao espalhamento das ondas eletromagnéticas na atmosfera, principalmente as ondas do espectro visível, bem como, provocadas pela absorção de gases da atmosfera, configuram um dos desafios para o trabalho com as Técnicas de Sensoriamento Remoto.

Neste contexto, é necessária a aplicação de técnicas de processamento digital que busquem melhorar a qualidade das informações das imagens e, assim, proporcionar uma interpretação dos dados mais criteriosa, tanto das bandas, quanto dos *pixels*. Uma das ferramentas que possibilita a melhora na qualidade das imagens de satélite é o processo de correção atmosférica.

Neste trabalho, a realização da correção atmosférica foi realizada através do modelo FLASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), um módulo relacionado ao *Software* Envi 5.3.

Esta ferramenta possui duas bases em um modelo de transferência radiativa do tipo MODTRAN4 (*Moderate Resolution Atmospheric Transmission*). Seu algoritmo executa a correção para o efeito de adjacência (mistura de *pixel* devido ao espalhamento de superfície) e calcula a visibilidade média da cena (aerossol/névoa) (ENVI, 2003).

O módulo FLAASH, trabalha na faixa espectral entre 0,4 μ m e 2,5 μ m e os processamentos são feitos *pixel a pixel*. O modelo opera através de uma imagem de radiância do sensor e, a partir dela, obtém a refletância

de superfície, derivando os parâmetros atmosféricos como albedo, altitude da superfície, coluna de vapor e água, profundidade óptica de aerossóis e nuvens, temperatura da superfície e da atmosfera.

O funcionamento do módulo FLAASH se inicia pela aplicação da equação 4.1, a qual apresenta uma relação intensidade de luz registrada em cada número digital (DN) e a radiância no sensor, esta calibração é realizada para cada banda espectral, e por fim, para a refletância aparente, para que assim sejam possíveis os processos de correção dos efeitos da atmosfera.

$$L = \left(\frac{A_p}{1 - \rho_e \alpha_s} \right) + \left(\frac{B \rho_e}{1 - \rho_e \alpha_s} \right) + L_\alpha \quad (4.1)$$

Na equação 2, apresentada acima L_γ representa a radiância espectral em um pixel; ρ é a refletância da superfície em um pixel; ρ_e trata da média da refletância em um *pixel* e a região vizinha à ele, α_s se refere ao albedo da terra; L_α é a radiância do espalhamento e por fim, A e B representam os coeficientes de calibração do modelo, os quais dependem de características específicas das condições atmosféricas e geométricas da imagem.

Para que se seja realizado o cálculo dos valores referentes aos coeficientes A e B, é necessária a inserção das informações contidas nos metadados das imagens e dos dados relativos aos parâmetros atmosféricos (modelo de aerossol, modelo atmosférico, visibilidade da cena, ângulo solar, média da elevação da superfície).

A seleção do modelo de aerossol foi feita de acordo com as três opções apresentadas para calibração do módulo, no Quadro 3, segue apresentada a descrição destes parâmetros de entrada para o modelo.

Quadro 3: Modelos de aerossol

Tipo do aerossol	Descrição
Rural	Utilizado para áreas não muito urbanizadas ou com poucas fontes industriais.
Urbano	Usual para áreas com alta densidade urbana e industrial.
Marítimo	
Troposférico	Aplicado para condições de atmosfera com visibilidade maior que 40 km.

Fonte: Adaptado ENVI, 2009.

As condições da coluna de vapor de água também influencia muito na calibração e obtenção dos valores tanto dos coeficientes A e B, quanto dos parâmetros S e L_{α} . A quantificação da coluna de vapor d'água foi possível a partir da escolha do modelo atmosférico a ser aplicado nas cenas, esta seleção foi baseada no Quadro 4, a qual apresenta os modelos atmosféricos de calibração.

Quadro 4: Modelos atmosféricos com base nas latitudes e sazonalidade.

Latitude	Jan	Mar	Mai	Jul	Set	Nov
70°	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60°	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50°	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40°	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30°	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20°	T	T	T	T	T	T
10°	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T
-10°	T	T	T	T	T	T
-20°	T	T	T	MLS	MLS	T
-30°	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS
-40°	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS
-50°	SAS	SAS	SAS	MLW	MLW	SAS
-60°	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-70°	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW

Fonte: Adaptado ENVI, 2009.

Onde;

SAW: *Sub- Artic Winter*

MLW: *Mid- Latitude Winter*

T: *Tropical*

MLS: *Mid- Latitude Summer*

SAS: *Sub-Artic Summer*

Uma vez estabelecida a coluna de água para cada uma das cenas analisadas, seguindo suas latitudes, temperatura da superfície e sazonalidade na obtenção da imagem, foi então possível se aplicar a equação 4.2 para refletância da superfície do sensor.

$$L_c = \left[\frac{(A + B)\rho_e}{1 - \rho_e\alpha_s} \right] \quad (4.2)$$

No Apêndice I segue o quadro de dados de entrada para o FLAASH extraídos do metadados Lansat 5TM, e os dados inferidos pela autora para cada uma das 46 imagens analisadas.

4.3.2 Análise dos Dados de Refletância

Após realizado o processamento de calibração radiométrica e correção atmosférica das imagens, iniciou-se a análise dos dados de refletância espectral da superfície.

Para avaliação dos procedimentos de extração de dados realizados nas 46 imagens em estudo, foi aplicado o método de análise dos dados de refletância, onde no *software ArcGis 10.1* foram criados polígonos representativos de diferentes feições representativas para diferentes gêneros da superfície no entorno da Lagoa.

As feições representativas correspondem a: Lagoa do Peri, oceano, vegetação e áreas urbanas circunvizinhas ao local de estudo, uma vez estabelecidas estas áreas amostrais é possível se realizar a comparação com as curvas espectrais teóricas de mesmo gênero, e assim aferir sobre a qualidade dos dados extraídos durante o processamento digital das imagens.

Na Figura 8, seguem apresentados os polígonos selecionados para imagem datada em 12/08/09.

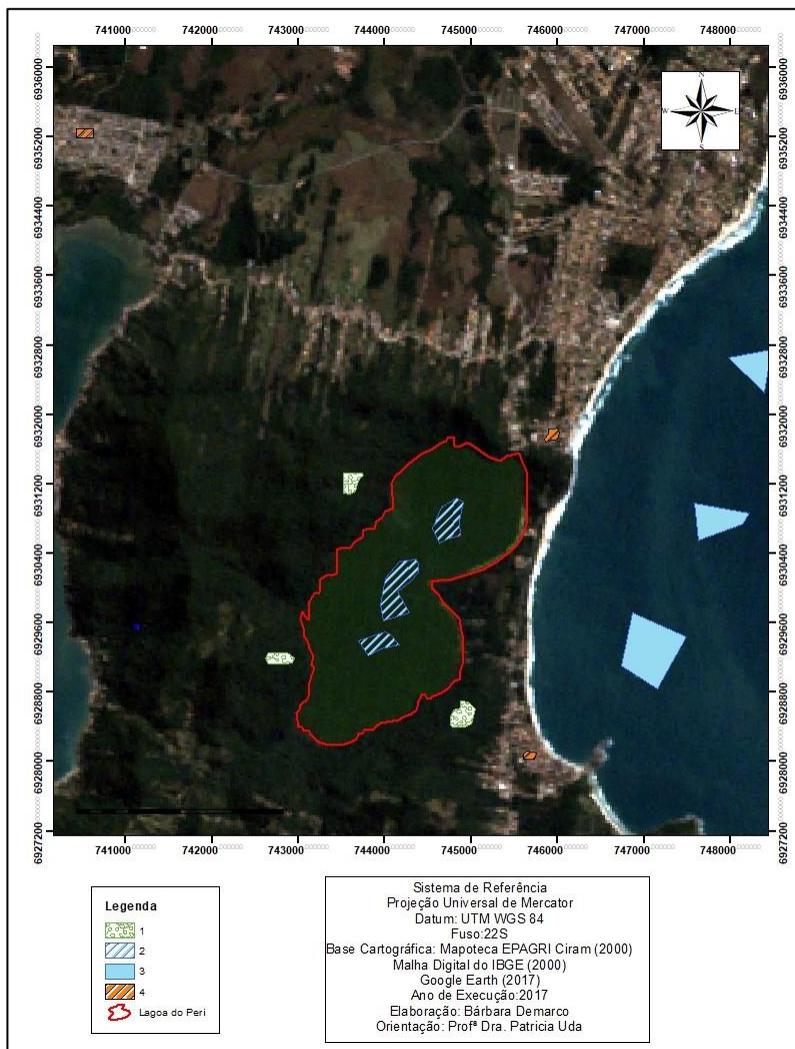


Figura 8: Amostragem dos polígonos representativos para análise espectral.

Para as bandas 1, 2, 3 e 4 (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) de cada uma das 46 imagens selecionadas, foram extraídos os valores de refletância média para as coberturas Lagoa do Peri, oceano, vegetação e áreas urbanas, representados pelos polígonos delimitados. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Zonal Statistic Surface* na função *Statistics as Table*, do software *ArcGis 10.1*.

A próxima etapa do trabalho foi realizada com a utilização do *Software Microsoft Excel 2016*, através da comparação dos dados de refletância extraídos para cada cobertura do solo em cada uma das imagens analisadas no período, com as informações teóricas sobre as curvas de resposta espectral dos objetos amostrados.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os gráficos teóricos das curvas de refletância para a divisão acima citada, os quais serviram de base para esta análise dos resultados.

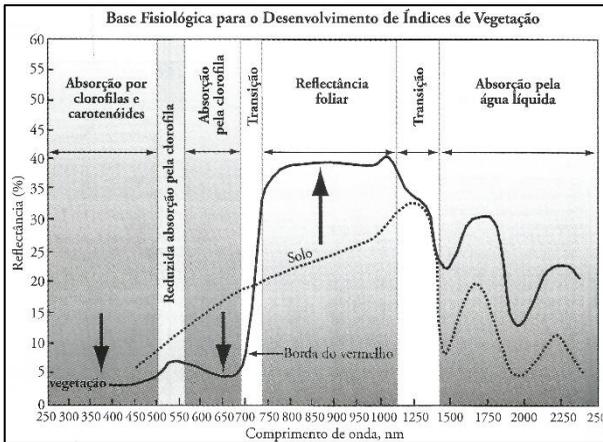


Figura 9 :Curvas teóricas da relação refletância e comportamento espectral da vegetação.

Fonte: Jensen, (2010).

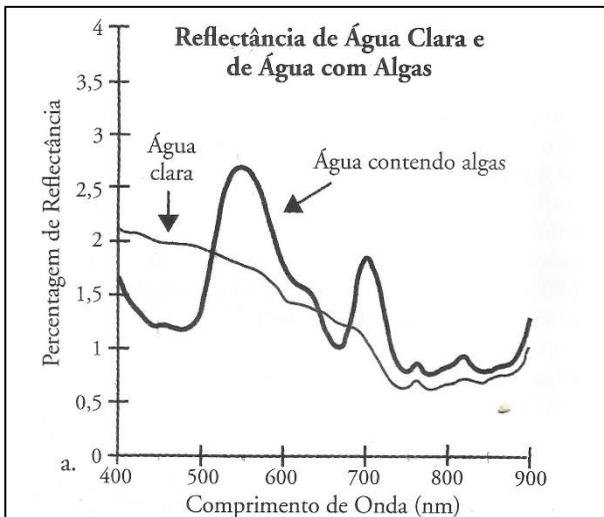


Figura 10 : Curvas teóricas da relação refletância e comportamento espectral da água.

Fonte: Jensen, (2010).

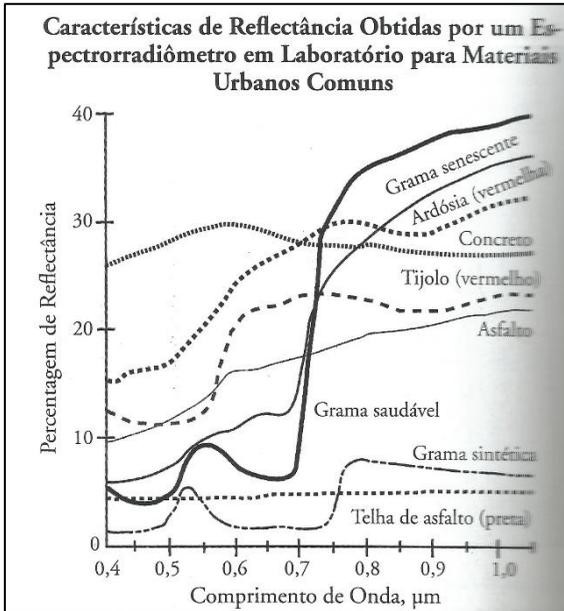


Figura 11 : Curvas teóricas da relação refletância e comportamento espectral da área urbana.
Fonte: Jensen, (2010).

4.3.3 Análise da resposta espectral na Lagoa do Peri

Analisar a resposta espectral de objetos, principalmente de corpos d'água é uma complexa atividade, a qual requer o conhecimento de uma gama de variáveis e conceitos acerca do assunto estudado.

Investigações de sensoriamento remoto em corpos d'água, requerem, o entendimento inicial das condicionantes de afetam a luz incidente, uma vez, que a luz incidente na água pura possui um comportamento de absorção e/ou espalhamento na coluna d'água diferente do comportamento da radiação para coluna d'água não pura, a qual contém materiais orgânicos e inorgânicos (JENSEN, 2010).

Conforme já mencionado, na região visível do espectro a água pura (sem constituintes suspensos ou dissolvidos) apresenta a característica de baixas refletâncias (NOVO, 2008). O efeito da presença de organismos fitoplantônicos na água faz com que se elevem os valores da refletância para todos os comprimentos de onda, e, principalmente, na região do infravermelho próximo (Banda 4). A autora apresenta um outro aspecto interessante para águas que apresentam elevadas concentrações de fitoplâncton, onde seu comportamento espectral passa a apresentar características

semelhantes à vegetação, com máximos valores na região do verde (Banda 2).

Para determinação do desenvolvimento da comunidade fitoplantônica são comumente utilizadas técnicas que através da relação da porcentagem de refletância do objeto avaliado, com os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, são capazes de determinar o seu comportamento espectral.

Desta forma, a clorofila *a*, por estar presente em todos os organismos fotossintetizantes é considerada um dos pigmentos principais responsáveis pela fotossíntese e têm sido muito utilizadas nas estimativas da biomassa do fitoplâncton (CICERELLI, 2013).

Neste trabalho, buscando observar a relação existente entre as informações de refletância espectral com a ocorrência de cianobactérias, realizou-se uma análise criteriosa das informações de refletância obtidas a partir das 46 imagens multiespectrais do sensor Landsat TM5.

Desta ação, obtiveram-se as curvas de refletância para cada uma das imagens selecionadas, primeiro a partir de uma amostragem por meio de polígonos na região de interesse e, posteriormente, para cada um dos pontos de monitoramento de qualidade da água pertencentes a UFSC.

As bandas selecionadas para coleta de informações espectrais abrangem a região espectral em que a água e seus componentes interagem com a energia eletromagnética, ou seja, de 400 a 800 nm (KIRK, 1994).

Na análise espectral da Lagoa do Peri, objeto desta pesquisa, das sete bandas disponíveis na composição das imagens Landsat TM, foi utilizada a banda 4, a qual é sensível à presença de células fitoplantônicas, além das bandas 1, 2 e 3, as quais apresentam regiões espectrais relacionadas à resposta espectral da clorofila *a*.

Para as curvas de refletância geradas, foram observadas as feições relacionadas à presença de componentes opticamente ativos, embasados na Curva de Refletância da Água com Algas, apresentada na Figura 4: Análise Espectral da Água. Além dessas observações diretas sobre curvas, realizou-se a separação dos dados nos pontos de monitoramento pré-determinados ao longo dos 9 anos que abrangem este estudo (2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2009 e 2010), para que, desta forma, fosse realizada a avaliação da evolução espectral das feições dos componentes opticamente ativos na Lagoa do Peri.

4.3.4 Análise de relação dos dados espectrais com a Clorofila a

No fitoplâncton é possível encontrar organismos de diferentes grupos, tais como as cianobactérias (reino *Monera*), euglenas (reino *Protozoa*), diatomáceas (reino *Chromista*) e clorofíceas (reino *Plantae*). São formados por diversas assembleias de quase todos os grupos taxonômicos, com diferentes necessidades fisiológicas (BUKATA, 2005; CALIJURI et al., 2006).

Todos os organismos fitoplantônicos existentes nos corpos d'água possuem o pigmento fotossinteticamente ativo clorofila a. Para Jensen (2010), o registro da cor de uma área do oceano ou de outro corpo d'água, torna possível a estimativa da atividade do fitoplâncton. Assim, a comparação de imagens obtidas via sensoriamento remoto com as concentrações de clorofila a, podem aferir sobre as condições destes organismos no local.

Neste estudo se abordou mais especificamente o pigmento clorofila a durante as análises realizadas. Embora a clorofila a se apresenta como um parâmetro mais geral na detecção do fitoplantôn no contexto das técnicas de sensoriamento remoto, a utilização de pigmentos que proporcionem uma melhor observação e distinção das espécies, como é o caso do pigmento ficocianina, o qual se relaciona a espécie cianobactérias, não foi possível para este trabalho, devido não existência de dados de concentração outros pigmentos.

Para relacionar os dados obtidos na construção das curvas espectrais, com as informações disponibilizadas através dos levantamentos de campo realizados pela UFSC, é importante que seja levado em consideração o caráter de extremamente dinâmico dos ambientes aquáticos e que haja coerência temporal entre os dados dos sensores e das amostras.

Assim, no desenvolvimento deste trabalho buscou-se adquirir imagens em datas o mais próximo possível aos levantamentos de campo.

A fim de consubstanciar a análise de correlação dos dados espectrais com as concentrações de clorofila a, foram elaboradas, no *software Microsoft Excel 2016*, as curvas de evolução espectral para os pontos P01, P05, P06, P07 e P08, de acordo com seus resultados de % de refletância nas correspondentes as bandas do espectro eletromagnético.

As informações disponíveis do parâmetro clorofila a, são correspondentes aos anos de 2007 até 2015, para o desenvolvimento deste estudo serão feitas análises para os anos de 2007, 2009 e 2010 corroborando com a temporalidade das imagens multiespectrais selecionadas.

Também através do *software Microsoft Excel 2016*, foram produzidos os gráficos de representação da concentração de clorofila a para as

imagens de maior pico de refletância selecionadas da etapa de análise espectral da Lagoa do Peri.

A avaliação dos dados espectrais com as concentrações de clorofila foi realizada a partir do comportamento dos gráficos produzidos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados são apresentados conforme a sequência do fluxograma de atividades (Figura 8). Desta forma são discutidos os produtos deste estudo, a fim de construir uma base satisfatória na análise da ocorrência dos organismos fitoplantônicos na Lagoa do Peri.

5.1 Análises da qualidade da água para o parâmetro Clorofila a

A partir das informações disponibilizadas dos pontos de monitoramento da UFSC, as quais abrangem o período de 2007 a 2016 com medições mensais, realizou-se a análise do parâmetro clorofila a de acordo com as condições de qualidade da água preconizadas pela Resolução CONAMA nº357/2005.

O Quadro 5, exibe os resultados das coletas realizadas pela UFSC ao longo do período de 2007 a 2010, em seus 4 pontos de monitoramento da qualidade da água, relacionadas com o limite da legislação vigente.

Quadro 5: Resultados das amostragens para variável Clorofila a.

Data de Coleta	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	Reso- lução CO- NAMA n° 357/05
27/3/2007	12,28	7,48	9,61	9,08	6,94	6,41	9,61	30µg/l
23/4/2007	11,75	17,62	18,16	24,56	24,03	23,50	10,68	30µg/l
25/5/2007	16,02	11,75	15,49	14,95	16,02	14,42	12,82	30µg/l
29/6/2007	9,61	-	11,75	9,61	11,75	8,54	-	30µg/l
19/7/2007	9,61	8,54	5,87	6,94	6,41	5,87	6,41	30µg/l
16/8/2007	13,35	11,75	6,41	4,27	11,75	5,34	10,68	30µg/l
12/9/2007	4,27	-	2,14	2,14	8,54	5,34	4,27	30µg/l
26/10/2007	5,34	4,27	5,34	2,14	3,20	3,20	-	30µg/l
23/11/2007	0,001	2,03	0,59	2,24	1,28	0,53	1,92	30µg/l
25/1/2008	5,34	8,01	9,08	8,54	9,08	7,48	9,08	30µg/l
20/02/2008	2,14	7,48	7,48	8,54	5,87	4,27	4,27	30µg/l
12/3/2008	32,04	27,77	28,30	27,77	28,84	23,50	26,17	30µg/l
9/4/2008	18,69	19,22	18,96	17,89	16,82	14,95	15,22	30µg/l
21/5/2008	15,22	14,69	14,95	15,22	12,28	12,55	14,42	30µg/l
11/6/2008	15,75	15,75	16,29	16,02	15,49	16,29	14,95	30µg/l
7/8/2008	12,82	13,88	13,88	14,42	13,88	12,82	12,82	30µg/l
19/8/2008	15,49	16,29	16,55	15,75	16,29	15,49	13,88	30µg/l
11/9/2008	13,62	14,15	15,22	14,69	15,49	14,95	14,95	30µg/l
7/10/2008	14,15	14,42	14,15	8,54	13,35	14,69	17,09	30µg/l
18/11/2008	18,42	18,42	18,42	18,69	20,83	17,36	15,49	30µg/l
9/12/2008	20,83	19,76	21,36	20,29	18,96	19,22	19,49	30µg/l
14/1/2009	23,23	23,50	24,83	22,96	24,03	21,89	23,76	30µg/l
17/2/2009	28,84	28,57	27,77	25,63	32,31	31,51	23,50	30µg/l
17/3//2009	19,22	20,03	19,49	18,96	21,09	21,36	16,29	30µg/l
14/4/2009	24,56	23,76	24,03	23,50	24,30	20,83	21,09	30µg/l
21/5/2009	4,27	4,81	4,81	4,27	4,81	4,54	4,54	30µg/l
9/6/2009	19,49	18,96	16,82	16,02	20,56	19,22	18,16	30µg/l
7/7/2009	16,55	16,55	16,29	15,75	17,36	17,09	15,22	30µg/l
18/8/2009	17,36	17,89	18,69	18,96	18,96	17,89	18,69	30µg/l
9/22/2009	19,22	18,69	18,69	17,89	20,56	17,89	15,22	30µg/l
20/10/2009	13,57	12,79	13,13	15,11	12,91	14,03	12,78	30µg/l
23/11/2009	13,10	14,85	14,92	15,41	14,25	14,17	14,64	30µg/l
12/8/2009	21,40	22,69	21,32	20,36	19,91	19,21	18,99	30µg/l
21/1/2010	23,68	23,46	23,77	24,12	22,64	21,06	19,95	30µg/l
12/2/2010	22,61	23,69	23,07	22,90	21,96	22,18	23,02	30µg/l
25/3/2010	24,23	25,08	25,15	23,74	22,66	23,19	23,58	30µg/l
13/4/2010	19,53	20,69	19,67	19,44	20,14	19,06	18,45	30µg/l
11/5/2010	16,98	16,97	17,05	15,24	15,29	15,49	14,91	30µg/l

8/6/2010	18,47	18,99	17,00	17,03	19,54	19,69	17,85	30µg/l
6/7/2010	14,95	19,22	19,22	18,69	16,55	14,95	22,43	30µg/l
24/8/2010	22,43	19,76	13,88	16,55	17,09	19,76	17,09	30µg/l
14/9/2010	10,68	16,02	17,62	13,88	16,55	18,69	15,49	30µg/l
1/10/2010	17,09	16,02	18,69	23,50	17,62	20,29	19,22	30µg/l
1/11/2010	22,43	22,43	20,29	19,22	14,95	18,16	22,43	30µg/l
1/12/2010	22,43	23,50	21,36	20,29	16,02	23,50	20,29	30µg/l

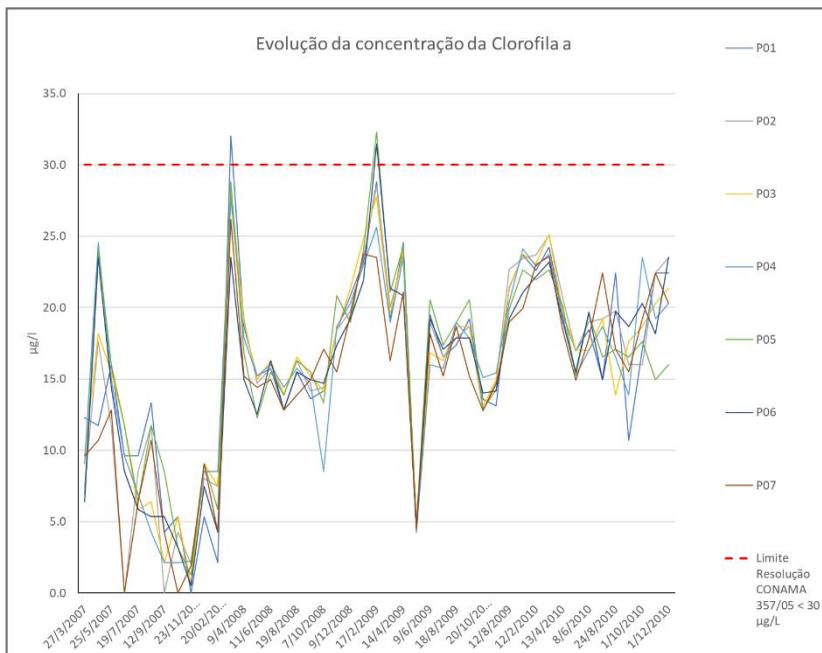


Figura 12: Evolução das concentrações da Clorofila a.

Observando os resultados das amostras coletadas, embora apresentem valores um pouco altos, de modo geral, os resultados das análises estão em conformidade com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 no período avaliado. Nas datas de 12/03/2008 e 17/02/2009, registrou-se valores para concentração de clorofila a, acima de 30 µg/l, permitido legalmente.

5.1.1 Análise dos Dados de Refletância

Das diversas análises comparativas realizadas no *software Microsoft Excel 2016*, foi possível a produção de tabelas de dados, onde, para cada imagem analisou-se a faixa espectral corresponde a cada área dos polígonos (lagoa, vegetação, oceano e urbano) desenhada. Desta forma, foi traçado um perfil do comportamento espectral para cada objeto, uma vez que os dados se apresentaram dentro das faixas correspondentes e sem grandes variações, validaram-se as informações extraídas. As tabelas produzidas seguem no Apêndice II.

De posse das informações espectrais correspondentes à escala temporal de 9 anos, com a qual trabalha este estudo, também foi elaborado um perfil da refletância destes objetos de amostragem, para cada uma das imagens (Figura 14 a 16)

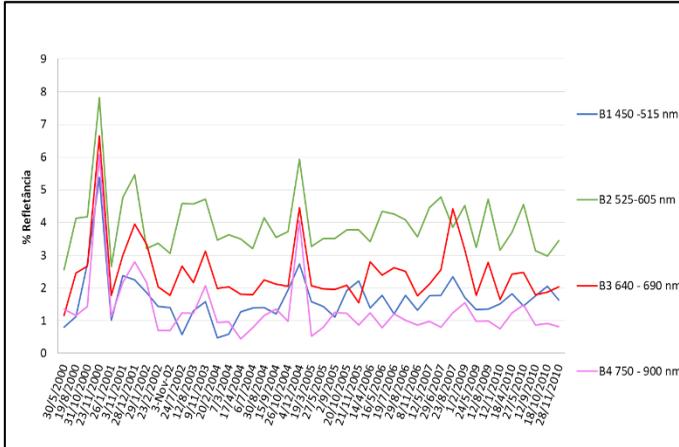


Figura 13: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 da área amostral lagoa.

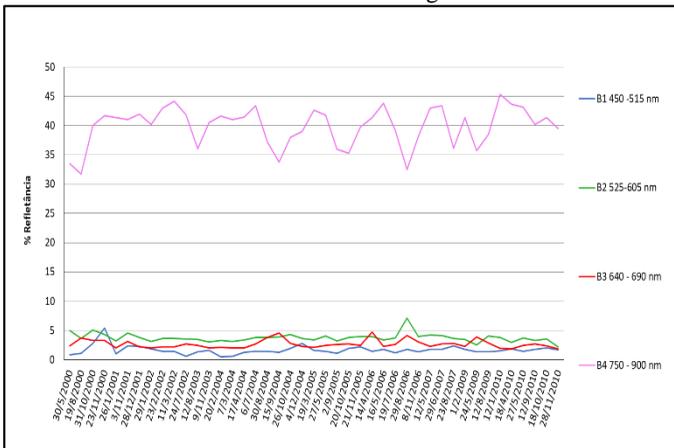


Figura 14: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 da área amostral vegetação.

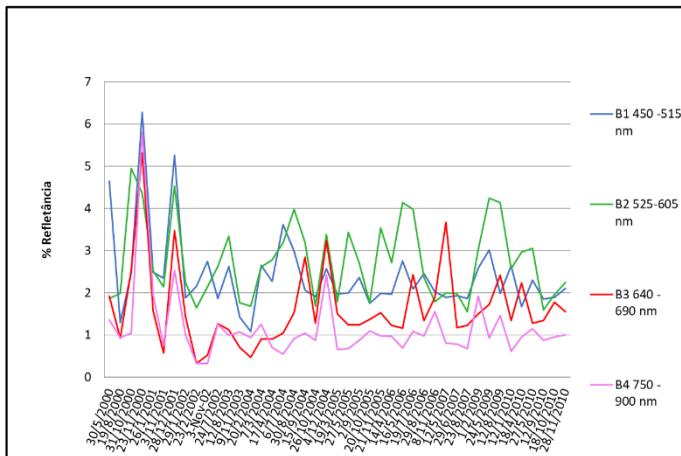


Figura 15: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 da área correspondente ao oceano.

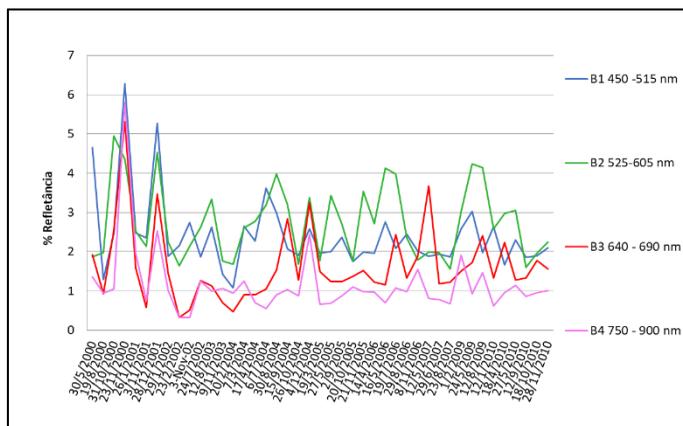


Figura 16: Curvas de refletância para análise das amostras para as bandas 1,2,3 e 4 dos polígonos representativos da área urbana.

Deste procedimento, foi possível a comparação das informações de refletância para cada uma das áreas amostrais com as curvas teóricas, representadas pelas figuras 9, 10 e 11 do item metodologia.

Os resultados apontam para a vegetação, onde a maior refletância foi verificada na banda 4, que representa a região do infravermelho próximo, na região do espectro visível a refletância é menor e há um pico na região do verde. Já para área urbana, quanto maior o comprimento de

onda, maior se mostrou a refletância apresentando comportamento similar do teórico.

Para o polígono da lagoa, em geral, apresentou baixas refletâncias na região do espectro visível, com picos na região verde, observada na banda 2, picos proeminentes na região do infravermelho próximo. Região amostral do oceano observou-se refletâncias mais elevadas na região visível e para região do infravermelho próximo baixos valores de refletância. Desta maneira, confirmou-se que os resultados do processamento digital das imagens geraram resultados dentro das faixas esperadas pela comparação com as curvas teóricas apresentadas no item metodologia.

5.1.2 Análise da resposta espectral na Lagoa do Peri

Utilizando o Gráfico do Comportamento Espectral da Água (Figura 4) como embasamento teórico, foi realizada a análise das curvas espectrais dos polígonos representativos da Lagoa do Peri, de acordo com o apresentado na Figura 8, utilizando os dados extraídos de refletância média para os pixels pertencentes as regiões amostrais.

No Quadro 6, seguem apresentadas as informações extraídas para as 46 imagens multiespectrais selecionadas.

Quadro 6: Refletância média dos polígonos da Lagoa do Peri, para as 46 imagens, em suas respectivas bandas espectrais de avaliação.

Data da Imagem	% Refletância			
	B1	B2	B3	B4
30/5/2000	0,80	2,55	1,16	1,35
19/8/2000	1,12	4,13	2,45	1,16
31/10/2000	2,75	4,18	2,67	1,44
23/11/2000	5,39	7,83	6,65	6,09
26/1/2001	1,01	2,66	1,78	1,12
3/11/2001	2,38	4,77	2,99	2,17
28/12/2001	2,24	5,46	3,96	2,80
29/1/2002	1,85	3,21	3,33	2,16
23/2/2002	1,44	3,36	2,03	0,70
3/11/2002	1,40	3,06	1,77	0,70
24/7/2002	0,57	4,58	2,67	1,24
12/8/2003	1,30	4,57	2,17	1,22

9/11/2003	1,58	4,71	3,13	2,07
20/2/2004	0,47	3,47	1,99	0,95
7/3/2004	0,58	3,63	2,03	0,97
17/4/2004	1,27	3,50	1,80	0,45
6/7/2004	1,39	3,21	1,78	0,79
30/8/2004	1,40	4,15	2,25	1,16
15/9/2004	1,21	3,54	2,12	1,36
26/10/2004	1,94	3,73	2,05	0,97
4/12/2004	2,73	5,94	4,46	4,05
19/3/2005	1,58	3,28	2,08	0,52
27/5/2005	1,43	3,52	1,97	0,80
2/9/2005	1,11	3,52	1,96	1,26
20/10/2005	1,92	3,78	2,08	1,23
21/11/2005	2,21	3,78	1,54	0,86
14/4/2006	1,39	3,42	2,80	1,24
16/5/2006	1,78	4,34	2,39	0,78
19/7/2006	1,21	4,26	2,61	1,20
29/8/2006	1,77	4,08	2,50	1,01
8/11/2006	1,32	3,56	1,76	0,86
12/5/2007	1,76	4,45	2,11	0,97
29/6/2007	1,77	4,79	2,56	0,79
23/8/2007	2,34	3,86	4,43	1,25
1/2/2009	1,72	4,53	3,17	1,54
24/5/2009	1,34	3,23	1,77	0,98
12/8/2009	1,36	4,72	2,78	0,99
12/1/2010	1,52	3,16	1,65	0,75
18/4/2010	1,83	3,71	2,43	1,24
27/5/2010	1,45	4,55	2,47	1,49
12/9/2010	1,77	3,14	1,80	0,87
18/10/2010	2,05	2,98	1,88	0,91
28/11/2010	1,63	3,45	2,03	0,82
Refletância Média	1,52	3,73	2,12	1,12

Observando os resultados das médias das refletâncias para as imagens analisadas, é possível aferir que na maior parte das imagens, a refletância média da Lagoa do Peri apresentou-se com valores de 1,52 % para região do azul, 3,73% para região do verde, 2,12% para região do vermelho e 1,12% na região do infravermelho próximo.

A Figura 17, ilustra o comportamento das informações de refletância média extraídas das imagens para os 9 anos analisados.

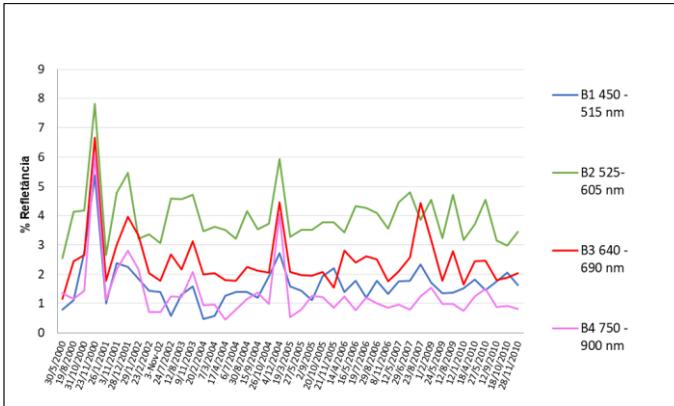


Figura 17: Resposta Espectral na Lagoa do Peri.

Os espectros de refletância gerados para os 9 anos de abrangência do estudo, mostram um possível efeito da presença de organismos fitoplantônicos na Lagoa do Peri. As curvas espectrais de todos os levantamentos mostram que a região espectral com os maiores valores de refletância foi apresentada no verde, entre 525 e 605 nm, em comparação às demais regiões espectrais. Isto pode ser justificado pela relevante presença de cianobactérias, que contém pigmentos de clorofila *a*, alterando a resposta espectral da água, e gerando o pico de refletância na região do verde.

Uma importante observação é o comportamento espectral da Lagoa do Peri nas datas 23/11/2000, 04/12/2004 e 23/08/2007. Nestas datas, ficam evidentes os maiores picos de refletância para banda do verde, atingindo valores próximos de 8%. Assim, foram selecionadas as imagens das referidas datas para comparar a resposta espectral da lagoa nos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, apresentados na Figura 6, anteriormente.

Nas figuras 18, 19 e 20 seguem apresentadas as imagens selecionadas para avaliação de seu comportamento espectral.

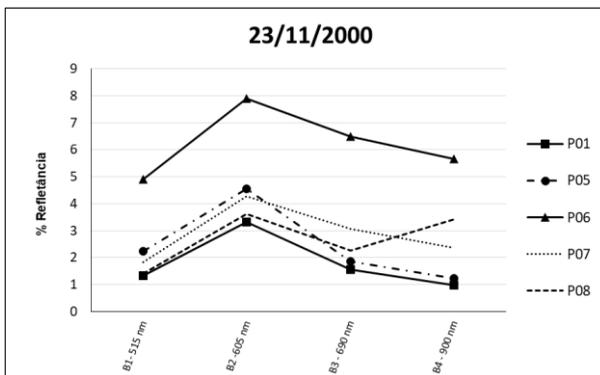


Figura 18: Curvas Espectrais de 23/11/2000, cada um dos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina.

A imagem 23/11/2000, apresenta picos de refletância na banda do verde para todos os pontos monitorados pela UFSC, com valores máximos de 7.91% no ponto P06. O ponto P06 está localizado na porção sul da Lagoa do Peri.

O comportamento da matéria orgânica dissolvida possui um elevado coeficiente de absorção da luz na região do azul (Banda 1), esta capacidade absorvente se reduz na direção dos comprimentos de onda mais longos (NOVO, 2008).

Locais com elevadas concentrações de matéria orgânica dissolvida na água terão a refletância na banda 1 reduzida. A observação do comportamento espectral nesta região para imagem 23/11/2000 denota baixas refletâncias para a região visível

Observa-se também uma alta absorção na banda do vermelho (Banda 3), a qual, de acordo com Jensen (2010), é atribuída a interação da clorofila *a* com a radiação. Em adição, observou-se um pico de refletância proeminente na região do infravermelho próximo (Banda 4).

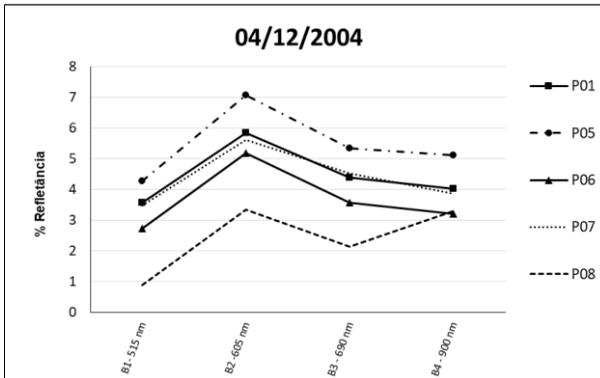


Figura 19: Curvas Espectrais de 04/12/2004, cada um dos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina.

O comportamento das curvas espectrais para os pontos de monitoramento da UFSC na data de 04/12/2004, evidencia um padrão de altos valores de refletância na banda do verde, atingindo valores de 7,07% para o P05, 5,84% no P01, 5,61% no P07 e 5,19% P06. Ela também apresenta comportamento de absorção para todos os pontos na região do azul (Banda 1).



Figura 20: Curvas Espectrais de 23/08/2007, cada um dos pontos de monitoramento da Universidade Federal de Santa Catarina.

Já a imagem do dia 23/08/2007 apresenta valores mais homogêneos para as curvas espectrais construídas nos pontos de monitoramento, porém com comportamentos semelhantes na região do verde, onde todos

os pontos apresentam picos de refletância, com valores máximos de 5,67% no P01, 5,32% no P06, 5,26% no P05, 5,08% no P07 e 5,06% no P08. Apresenta também absorção na região da azul, forte absorção na região da banda 3 e picos ligeiramente proeminentes na região do infravermelho próximo.

Desta forma, é aceitável a percepção de que nas 3 imagens analisadas detalhadamente, para as quais, o critério de escolha foi a grande refletância espectral na avaliação por polígonos amostrais na lagoa, há a possibilidade da ocorrência de organismos fitoplantônicos no local.

Buscando melhor estimar a ocorrência e desenvolvimento dos organismos fitoplantônicos na Lagoa do Peri, foi realizada a avaliação espectral nos pontos para duas imagens onde o comportamento espectral apresentou-se ligeiramente homogêneo, sem evidências de grandes picos de refletância pela amostragem através dos polígonos, são elas: imagem de 07/03/2004 e 02/09/2005.

As figuras 21 e 22 apresentam as curvas espectrais para as imagens acima mencionadas (07/03/2004 e 02/09/2005), respectivamente, para cada um dos pontos de monitoramento da UFSC analisados.

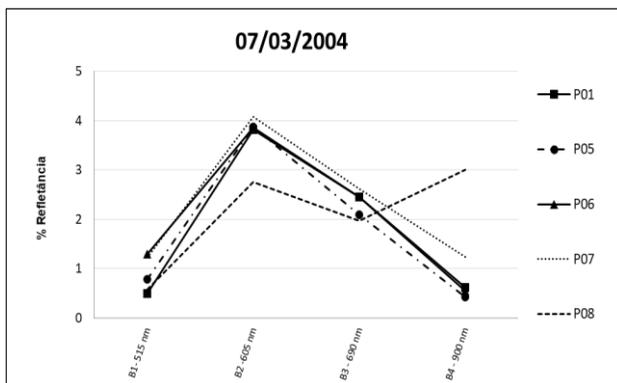


Figura 21: Curvas espectrais da imagem 07/03/2004 para os pontos de monitoramento UFSC

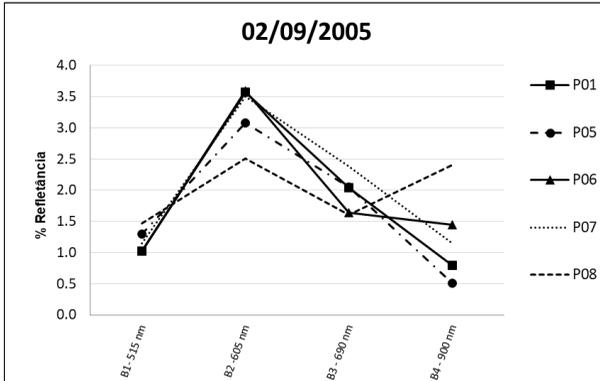


Figura 22: Curvas espectrais da imagem 02/09/2005 para os pontos de monitoramento

Observando as imagens selecionadas verifica-se que mesmo para as datas onde não foram observados picos de refletância tão acentuados com valores acima de 5% de refletância, é possível constatar os maiores resultados de refletância na banda do verde para todos os pontos, evidenciando a presença do pigmento clorofila a e a possível ocorrência de organismos fitoplantônicos no local.

5.1.3 Análise de relação dos dados espectrais com a Clorofila a

Com o intuito de propiciar o entendimento da evolução do comportamento do parâmetro clorofila a ao longo dos anos 2007, 2009 e 2010, foi produzido o gráfico de evolução da concentração desta variável ao longo das amostragens realizadas, conforme a Figura 23.

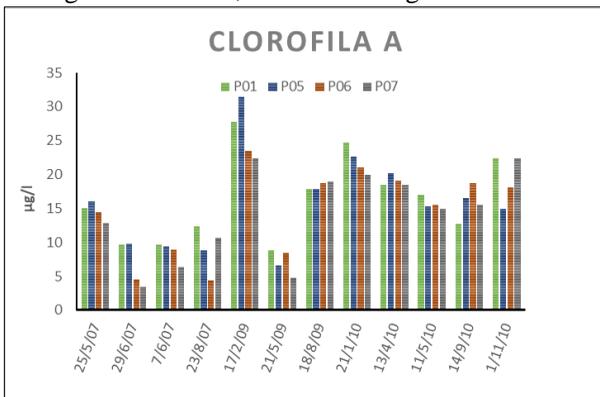


Figura 23: Evolução das concentrações de Clorofila a.

Uma vez que a concentração média da clorofila a no período analisado, para o P01 foi de 16,50 $\mu\text{g/l}$, P05 15,66 $\mu\text{g/l}$, P06 16,82 $\mu\text{g/l}$ e no P07 15,20 $\mu\text{g/l}$, é possível observar que nas datas referentes a 17/02/2009, 21/01/2010, 13/04/2010 e 01/11/2010 ocorrem picos elevados da concentração da clorofila a na lagoa.

Desta forma, para aferir acerca da correlação entre dados de clorofila a e as informações das curvas espectrais extraídas na banda do verde, foram construídos gráficos das curvas de % de refletância para cada um dos pontos, relativos às datas das imagens mais próximas às datas das campanhas onde foram observados os picos de concentração do parâmetro.

Selecionaram-se 3 imagens (1/2/2009, 18/04/2010, 28/11/2010) para cumprir a função comparativa entre os resultados espectrais e as concentrações de clorofila a, onde, para cada um dos pontos de monitoramento P01, P04, P06, P07, são apresentadas no eixo horizontal os intervalos correspondentes as bandas espectrais e no eixo vertical a porcentagem de refletância para cada ponto. Segue na Figura 24, 25, 26 suas curvas produzidas.

Observando as curvas espectrais e os dados de concentração de clorofila a para as imagens de 01/02/2009, 18/04/2010 e 28/11/2010 é notável o comportamento de absorção na região do azul, o pico de refletância na banda do verde, absorção da luz vermelha na banda 3 e um pico proeminente de refletância na região do infravermelho próximo, configurando, segundo Jensen (2010), comportamentos de águas contendo algas.

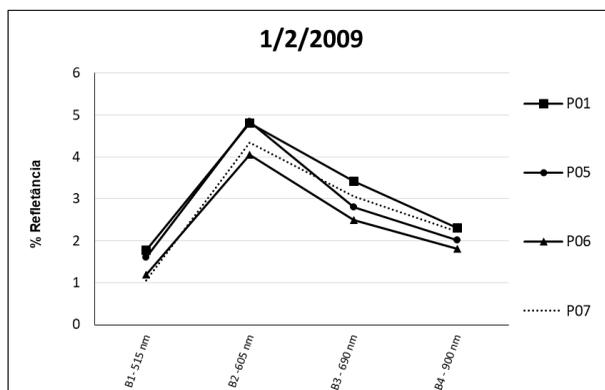


Figura 24: Curva da refletância para Imagem 1/2/2009.

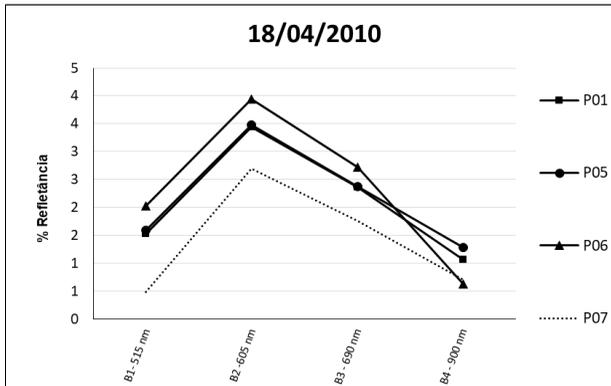


Figura 25: Curva da refletância para Imagem 18/4/2010.

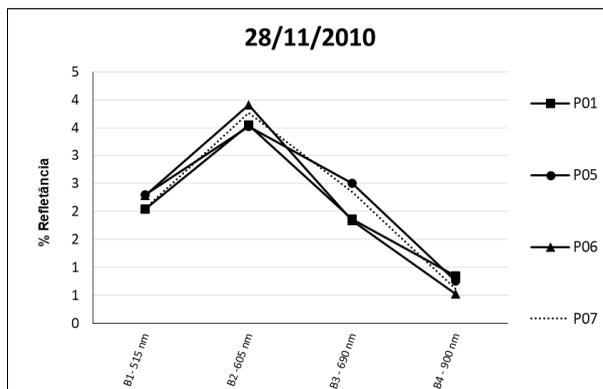


Figura 26: Curva da refletância para Imagem 28/11/2010.

Para as 3 imagens selecionadas como fator comparativo as datas de maiores valores medidos nas concentrações de clorofila a nas amostragens de qualidade da água, buscou-se a relação com os valores de refletância média na Banda 2 (região verde do espectro), uma vez que esta região do espectro permite a boa avaliação do comportamento da clorofila a.

Desta forma, foi construída a Tabela 2, o qual traz os resultados relativos à refletância na banda do verde (Banda 2) e os dados amostrais para concentração de clorofila a em cada um dos pontos monitorados pela UFSC.

Tabela 2: Valores de refletância e concentração de Clorofila a

Data da Imagem	Pontos	% Refletância B2	Clorofila a ($\mu\text{g/l}$)
01/02/2009	P01	4,81	28,84
	P05	4,84	31,51
	P06	4,05	23,50
	P07	4,35	22,43
18/04/2010	P01	3,44	19,53
	P05	3,48	20,14
	P06	3,94	19,06
	P07	2,70	16,45
28/11/2010	P01	3,54	22,43
	P05	3,52	14,95
	P06	3,91	18,16
	P07	3,77	22,43

A partir dos dados apresentados é perceptível que a ocorrência de maiores valores de refletância nos pontos, de modo geral, acontece quando há valores mais elevados para as concentrações de clorofila a.

Uma forma de visualizar a correlação entre duas variáveis é por meio do diagrama de dispersão, no qual os valores das variáveis são representados por pontos em um sistema cartesiano (BARBETTA et al., 2008, Apud CICERELLI, 2013).

Desta forma, para aferir acerca da correlação entre dados de clorofila a e as informações das curvas espectrais extraídas na banda do verde, foi construído um gráfico de dispersão. Na Figura 27 segue o gráfico de dispersão linear entre as concentrações de clorofila a medidos nos levantamentos de campo da UFSC e a % refletância na banda do verde, extraída das imagens.

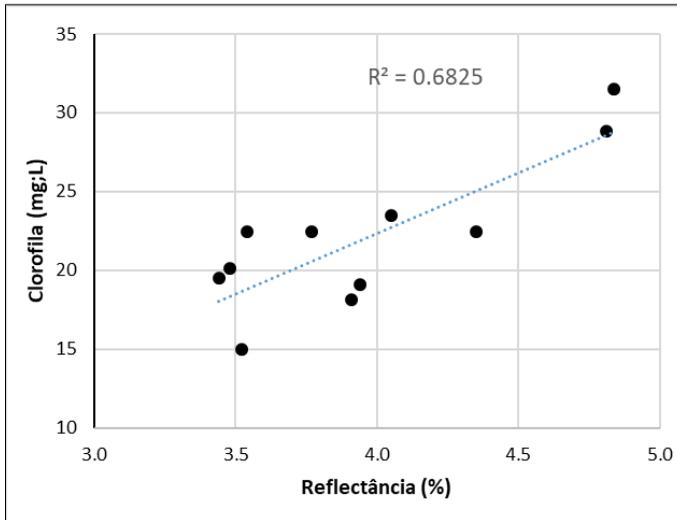


Figura 27: Curva de dispersão da clorofila a e refletância na Banda 2.

Comparativamente para as amostras de concentração de clorofila a nos pontos de monitoramento foram identificadas concentrações acima das médias anuais nos pontos, configurando um possível indicador da atividade fitoplantônica no local.

O gráfico de dispersão construído para avaliar a correlação entre os dados amostrais da concentração da clorofila a para os pontos de monitoramento da UFSC e a % de refletância na banda do verde (Banda 2) das imagens selecionadas, apresenta um $r^2=0.685$, o que é uma correlação média para os resultados atingidos. Observa-se uma melhor correlação dos dados para as datas de maiores concentrações de clorofila a e valores superiores a 3% de refletância na banda do verde.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A pesquisa em questão utilizou imagens do sensor Landsat TM5, para as quais a resolução espacial é de 30 metros e a resolução radiométrica de 8 bits, e deste modo, não permitiram a total discriminação da refletância da clorofila a com a de outros pigmentos e componentes óticos presentes na água, indicando ser um possível fator limitante durante o estudo. Desta forma, recomenda-se que para outras pesquisas utilizando métodos de avaliação bióticos sejam priorizados sensores com melhor resolução espacial, como é o caso do Sentinel, com 10 metros e do Landsat 8, com 15 metros, possibilitando uma distinção mais refinada dos alvos da superfície terrestre.

Da análise das curvas espectrais das feições características, vegetação, lagoa, oceano e área urbana, para cada uma das imagens analisadas, podemos concluir os resultados como adequados para o método comparativo aplicado.

O método de correlação entre os dados de concentração da Clorofila a e da refletância na banda do verde aplicado apresentou um ajuste de r^2 0,685 para os pontos analisados, o que é uma correlação média dos parâmetros.

Desta forma, é possível aferir que o uso das técnicas aplicadas de sensoriamento remoto, especificamente, da análise das curvas espectrais de refletância, mostrou-se promissor para a avaliação da ocorrência de organismos fitoplantônicos em corpos d'água, evidenciando possíveis alterações na comunidade fitoplantônica na Lagoa do Peri.

Recomenda-se para os próximos trabalhos e estudos voltados para análises bióticas do pigmento clorofila a, que sejam realizadas amostragem de suas concentrações *in situ*, juntamente com a aquisição das imagens na mesma data de coleta, proporcionando assim, a melhor acurácia na correlação dos resultados, uma vez que as algas possuem distribuição espacial desigual nas colunas d'água devido a fatores como: temperatura, propriedades dos organismos fitoplântonicos, luz, distribuição dos nutrientes), correntes de ventos e fatores hidrodinâmicos. Desta forma, a avaliação com a mesma temporalidade minimiza o efeito destas condicionantes.

Outra recomendação relevante para próximas pesquisas, é considerar a realização da avaliação de parâmetros relacionados ao levantamento de dados de materiais em suspensão, como por exemplo turbidez, e também da temperatura da água, uma que estas variáveis estão intimamente ligadas à ocorrência e desenvolvimento do fitoplâncton.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A, S, M. **Cinobactérias e Cianotoxinas em Águas Continentais**.2005. 165 f. Dissertação de Mestrado em hidráulica e Saneamento. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

APARICIO, C. **Análise da Resposta Espectral de Espécies de Macrófitas**.2007.163 f. Tese (Doutorado em Ecologia de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, São Paulo.

BARRETO, V. L ANDRADE, J. A; AUGUSTO, F; JARDIM, I. C. S. F. **Eutrofização em rios brasileiros**. Enciclopédia Biosfera., Goiânia, v.9, n. 16, p. 2167, Sept. 2013

BRASIL.Ministério do Meio Ambiente Conselho Nacional do Meio Ambiente.**Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005**.Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais.Disponível em:<http://www.mma.gov.br/port/conama>.Acesso em: 10 de agosto de 2017.

CALIJURI, M., C. et al. 2006.**Cianobactérias e Cianotoxinas em Águas Continentais**. Editora Rima. São Carlos.118p.

CAMPBELL, J.B. **Introduction to Remote Sensing**. New York: Guilford Press, 1987.550 p.

CASTILHOS, J. de A. **Evolução paleogeográfica da planície costeira da praia da armação - Ilha de Santa Catarina, SC**. 1997. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 1997. Disponível em:< <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/75641>>. Acesso em: 29 de setembro de 2017.

CECCA, Centro de Estudos Cultura e Cidadania. 1997. **Unidades de Conservação e Áreas Protegidas da Ilha de Santa Catarina: caracterização e legislação**. Ed. Insular, Florianópolis, Brasil, 160pp. Clarke, R. T.; Tucci.

CICERELLI, R. E.; GALO, M. **Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores.** Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental, p. 259-265, 2015.

CORAL, L.A. **Remoção de cianobactérias e cianotoxinas em águas de abastecimento pela associação de flotação por ar dissolvido e nanofiltração.** 2009. 199 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) UFSC, Florianópolis.

CORAL, L.A. **Avaliação da pré-ozonização no controle de cianobactérias e de degradação de microcistinas.** 2012. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) UFSC, Florianópolis.

CHUVIECO, E. **Teledetección Ambiental: La Observación de La Tierra Desde El Espacio.** 3ª edição. Barcelona, Ariel Ciência, 2007.

DE SOUSA MACHADO, Marilia Teresinha ; DE MELLO BAPTISTA, Gustavo Macedo. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do Lago Paranoá (DF). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, 2016.

EASTMAN, J.R. Idrisi Andes – **Guide to GIS and Image Processing.** Clark Laboratory. Clark Labs, Clark university, Worcester/MA. USA. 2006. 284p.

ENVI. **User's Guide: Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH.** ESRI, 2009.

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

ELACHI, C. **Introduction to the physics and techniques of remote sensing.** New York. 1987. Disponível em :< http://www.itc.nl/library/papers_2009/general/PrinciplesRemoteSensing.pdf >. Acesso em: 04 de agosto de 2017.

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

GITELSON, A. A., et al. Comparative reflectance properties of algal cultures with manipulated densities. **Journal of Applied Phycology**, v.11, p. 345-354, 1999.

HELENO, G.V. **Avaliação do uso dos sensores remotos CBERS CCD e Lansat TM para o monitoramento de cianobactérias em ambientes aquáticos de grandes extensões**. 2009.184 f. Tese (Doutorado em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre) UFMG, Belo Horizonte.

HENNEMANN, M. C. **Dinâmica da qualidade da água em uma lagoa costeira: o caso peculiar da Lagoa do Peri, Ilha de Santa Catarina, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ecologia). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Manual de Geoprocessamento**. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acesso em 31 de julho de 2017.

JENSEN, J. R. (1949) **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres** / tradução José Carlos Neves Epiphanyo et al. São José dos Campos, SP. 2010.

KIRK, J.T.O. **Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**, London, Cambridge University Press, 1994, v. 2, p. 507.

Lamparelli, M.C. (2004). **Grau de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Ecologia, São Paulo. São Paulo, Brazil. 235p.

LAPOLLI, E. M. *et al.* **Carta dos elementos do meio ambiente – Parque da Lagoa do Peri**. Laboratório associado de sensoriamento remoto de Santa Catarina (LARS/SC), Florianópolis, 1990. 24p.

LAUDARES-SILVA, R. 1999. **Aspectos limnológicos, variabilidade espacial e temporal na estrutura da comunidade fitoplanctônica da Lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil**. Tese de Doutorado, Universidade federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 220pp.

LONDE, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 138 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) INPE, São José dos Campos.

LOPES, Fernando B. et al. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, 2014.

MENESES, P.R; ALMEIDA. T; et al. **Introdução ao Processamento de Imagens e Sensoriamento Remoto**. Brasília, DF. Universidade de Brasília, 2012.

MELCHER, S.S. **Estudos morfológicos e moleculares de cianobactérias potencialmente tóxicas dos gêneros *Cylindrospermopsis*, *Aphanizomenon* e *Raphidiopsis* (Nostocales)**. São Paulo: Instituto de Botânica da Secretária do Estado de Meio Ambiente, 2008. Disponível em: http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/pgibt/2013/09/Silvia_Su_sanne_Melcher_DR.pdf. Acesso em: 04 de agosto de 2017.

NOVO, Luciane de Moraes. **Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São José dos Campos, SP. Editora Parêntese, 2007.

SÁ, L. L. C. et al. Ocorrência de uma floração de cianobactérias tóxicas na margem direita do rio Tapajós, no Município e Santarém (Pará, Brasil). **Rev. Pan-Amaz. Saude**, v. 1, n. 1, p. 159-166, 2010.

SENS, M. L *et al.* 2005. Ozonização: uma alternativa para tratamento de água com cianobactérias. **Revista de Ciência & Tecnologia**. V.13, Nº 25/26 – pp. 47-54.

SILVA, R. L.; SENNA, P. A. C. Estudos limnológicos na lagoa do Peri (1995-1996), Florianópolis, SC. **Aquitaine Ocean**, v. 3, p. 265-270, 1997.

SHUBO, T. **Sustentabilidade do Abastecimento e da Qualidade da Água Potável Urbana**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental, Curso de Ciências na área de Saúde Pública, Escola Nacional de Saúde Pública Fundação Oswaldo Cruz. Rio de

Janeiro, 2003. Disponível em: <https://www.arca.fio-cruz.br/bitstream/icict/4971/2/566.pdf>. Acesso em: 03 de abril de 2017.

TONETTA, D. **Produção primária e respiração pelágica em um lago costeiro subtropical (Lagoa do Peri, Brasil):** Variações vertical e temporal e suas relações com a comunidade fitoplantônica. 2012. 84 f. Tese (Mestrado em Ecologia), UFSC. Florianópolis.

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

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de Água**. 4.ed. Editora EPUSP. V. 1. 2013, 10 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

WETZEL, R. G. **Limnology**. Academic press, v. 3, 2001, p. 1006.

YUNES, J. et al. **Florações de Cianobactérias Tóxicas: Mãos à obra ao problema**. Lições de Limnologia. RiMa, São Carlos, p. 299-323, 2005.

APÊNDICE I - Dados de entrada para o modelo FLAASH extraídos do metadados Lansat 5TM(*) e inferidos pela autora ().**

Nº Imagem	Data				Modelo Atmosférico	Modelo de Aerossol
	Dia	Mês	Ano	Hora de Aquisição (h/m/s)		
01	30	05	2000	12:47:46	MLS	Rural
02	19	08	2000	12:49:25	MLS	Rural
03	31	10	2000	12:44:20	MLS	Rural
04	23	11	2000	12:50:53	MLS	Rural
05	26	01	2001	12:51:38.	MLS	Rural
06	15	03	2001	12:51:51.	MLS	Rural
07	03	11	2001	12:51:51.	MLS	Rural
08	19	11	2001	12:52:34.	MLS	Rural
09	28	12	2001	12:50:59	MLS	Rural
10	29	01	2002	12:50:39	MLS	Rural
11	23	02	2002	12:43:54	MLS	Rural
12	11	03	2002	12:43:38	MLS	Rural
13	24	07	2002	12:47:04	MLS	Rural
14	12	08	2003	12:48:37	MLS	Rural
15	09	11	2003	12:43:40	MLS	Rural
16	20	02	2004	12:50:41	MLS	Rural
17	07	03	2004	12:55:09	MLS	Rural
18	17	04	2004	12:45:18.	MLS	Rural
19	06	07	2004	12:47:38	MLS	Rural
20	30	08	2004	12:55:09	MLS	Rural
21	15	09	2004	12:55:34	MLS	Rural
22	26	10	2004	12:50:17	MLS	Rural
23	04	12	2004	12:57:12	MLS	Rural
24	19	03	2005	12:52:32	MLS	Rural
25	27	05	2005	12:53:25.	MLS	Rural
26	02	09	2005	12:59:51	MLS	Rural
27	20	10	2005	12:59:46	MLS	Rural
28	21	11	2005	13:00:16	MLS	Rural
29	14	04	2006	13:03:24	MLS	Rural
30	16	05	2006	13:03:52	MLS	Rural
31	19	07	2006	13:04:48.	MLS	Rural
32	29	08	2006	12:59:09	MLS	Rural

33	11	8	2006	13:06:06	MLS	Rural
34	05	09	2006	13:05:25	MLS	Rural
35	12	05	2007	13:00:06	MLS	Rural
36	29	06	2007	12:59:19	MLS	Rural
37	06	07	2007	13:05:27	MLS	Rural
38	23	08	2007	13:05:01	MLS	Rural
39	01	02	2009	12:57:15	MLS	Rural
40	24	05	2009	12:59:39.	MLS	Rural
41	12	08	2009	13:01:00	MLS	Rural
42	12	01	2010	12:56:20	MLS	Rural
43	18	04	2010	12:56:25	MLS	Rural
44	27	05	2010	13:02:27	MLS	Rural
45	12	09	2010	12:54:06	MLS	Rural
46	28	11	2010	12:55:21	MLS	Rural

APÊNDICE II – Quadro dos dados de % Refletância dos Objetos Espectrais Amostrais (lagoa, vegetação, oceano e urbano) para as bandas 1,2,3e 4, utilizados na validação das informações obtidos das análises espectrais para cada uma das imagens em estudo.

Data da Imagem	% Refletância															
	Amostra da Lagoa				Amostra da Vegetação				Amostra do Oceano				Amostra da Área Urbana			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
30/5/2000	0,80	2,55	1.16	1.35	0.69	4.99	2.37	33.54	4.65	1.87	1.92	1.35	6.40	10.45	12.66	25.35
19/8/2000	1,12	4.13	2.45	1.16	1.17	3.60	3.67	31.77	1.29	1.98	0.93	0.94	6.19	10.25	12.65	24.19
31/10/2000	2,75	4.18	2.67	1.44	4.75	5.02	3.25	40.02	2.47	4.95	2.54	1.05	9.51	0.138	15.97	31.5
23/11/2000	5,39	7.83	6.65	6.09	1.64	4.32	3.25	41.75	6.28	6.36	5.32	5.81	6.52	10.71	12.61	27.75
26/1/2001	1,01	2.66	1.78	1.12	1.07	3.18	2.03	41.41	2.48	2.52	1.57	1.95	6.81	11.36	13.84	26.45
3/11/2001	2,38	4.77	2.99	2.17	2.33	4.51	3.08	41.08	2.35	2.14	0.58	0.75	10.26	15.09	18.17	31.43
28/12/2001	2,24	5.46	3.96	2.80	1.02	3.80	2.20	41.96	5.27	4.53	3.47	2.53	7.75	12.76	15.65	29.32
29/1/2002	1,85	3.21	3.33	2.16	1.13	3.07	1.97	40.18	1.88	2.25	1.44	1.01	7.32	0.1192	14.78	28.67
23/2/2002	1,44	3.36	2.03	0.70	1.95	3.64	2.22	42.96	2.15	1.65	0.33	0.33	7.79	11.93	14.4	27.26
3-Nov-02	1,40	3.06	1.77	0.70	1.86	3.64	2.21	44.14	2.74	2.14	0.52	0.33	9.2	13.57	15.98	30
24/7/2002	0,57	4.58	2.67	1.24	1.15	3.57	2.71	41.89	1.87	2.63	1.27	1.26	6.34	11.25	14.18	25.35
12/8/2003	1,30	4.57	2.17	1.22	1.40	3.48	2.43	36.08	2.62	3.34	1.13	1.00	7.19	11.76	14.19	26.12
9/11/2003	1,58	4.71	3.13	2.07	1.04	3.01	1.98	40.51	1.43	1.76	0.70	1.07	8.23	13.37	16.79	28.72

20/2/2004	0,47	3.47	1.99	0.95	0.77	3.24	2.09	41.65	1.08	1.69	0.48	0.95	6.397	11.75	14.53	27.17
7/3/2004	0,58	3.63	2.03	0.97	0.78	3.09	2.02	41.07	2.65	2.61	0.90	1.25	7.22	12.52	15.58	28.08
17/4/2004	1,27	3.50	1.80	0.45	1.70	3.35	1.99	41.45	2.28	2.78	0.90	0.71	8.28	12.79	15.64	27.90
6/7/2004	1,39	3.21	1.78	0.79	1.95	3.80	2.66	43.45	3.62	3.19	1.05	0.55	6.76	10.49	12.32	24.93
30/8/2004	1,40	4.15	2.25	1.16	1.73	3.82	3.76	37.19	2.99	3.98	1.53	0.91	7.30	11.56	14.36	24.95
15/9/2004	1,21	3.54	2.12	1.36	1.80	3.89	4.56	33.74	2.07	3.20	2.84	1.04	6.36	10.63	13.04	22.91
26/10/2004	1,94	3.73	2.05	0.97	2.34	4.30	2.81	37.98	1.91	1.68	1.28	0.87	9.02	13.3	16.19	28.31
4/12/2004	2,73	5.94	4.46	4.05	1.37	3.60	2.28	38.97	2.58	3.38	3.24	2.43	7.825	12.58	15.57	28.86
19/3/2005	1,58	3.28	2.08	0.52	1.72	3.36	2.12	42.67	1.97	1.78	1.50	0.66	8.467	12.84	15.5954	28.68
27/5/2005	1,43	3.52	1.97	0.80	2.10	4.03	2.44	41.78	2.00	3.43	1.24	0.69	6.10	9.51	11.505	22.98
2/9/2005	1,11	3.52	1.96	1.26	1.67	3.23	2.64	35.95	2.36	2.70	1.24	0.87	6.68	10.46	12.72	23.85
20/10/2005	1,92	3.78	2.08	1.23	1.91	3.76	2.69	35.31	1.76	1.76	1.37	1.10	8.617	13.32	16.08	28.36
21/11/2005	2,21	3.78	1.54	0.86	1.73	3.93	2.47	39.77	1.99	3.54	1.52	0.98	9.268	14.14	17.09	29.38
14/4/2006	1,39	3.42	2.80	1.24	3.46	3.96	4.75	41.41	1.97	2.71	1.23	0.97	7.74	12.30	14.99	26.12
16/5/2006	1,78	4.34	2.39	0.78	1.01	3.38	2.24	43.80	2.76	4.13	1.16	0.70	8.23	13.09	15.83	28.36
19/7/2006	1,21	4.26	2.61	1.20	1.54	3.71	2.61	39.16	2.09	3.98	2.44	1.08	6.67	10.74	13.09	23.29
29/8/2006	1,77	4.08	2.50	1.01	4.08	7.06	4.11	32.45	2.45	2.36	1.34	0.98	8.62	13.37	15.72	18.4
8/11/2006	1,32	3.56	1.76	0.86	2.04	3.98	3.03	38.12	2.02	1.79	1.89	1.55	10.05	14.69	17.52	28.86
12/5/2007	1,76	4.45	2.11	0.97	2.03	4.20	2.30	42.98	1.89	1.99	3.67	0.81	6.80	10.29	11.77	24.10
29/6/2007	1,77	4.79	2.56	0.79	2.07	4.09	2.66	43.44	1.94	1.98	1.18	0.78	7.24	10.60	12.36	23.97

23/8/2007	2,34	3.86	4.43	1.25	1.75	3.65	2.78	36.10	1.87	1.56	1.23	0.68	7.07	11.545	13.90	24.38
1/2/2009	1,72	4.53	3.17	1.54	1.13	3.44	2.24	41.37	2.59	3.03	1.51	1.92	7.26	11.52	13.08	26.3
24/5/2009	1,34	3.23	1.77	0.98	3.38	2.54	3.87	35.71	3.02	4.24	1.72	0.93	4.43	8.05	9.52	19.53
12/8/2009	1,36	4.72	2.78	0.99	1.31	4.05	2.87	38.46	1.98	4.14	2.41	1.47	6.65	10.83	12.57	23.2
12/1/2010	1,52	3.16	1.65	0.75	1.72	3.78	1.91	45.34	2.63	2.58	1.34	0.62	9.37	13.09	14.44	27.24
18/4/2010	1,83	3.71	2.43	1.24	3.42	2.97	1.88	43.63	1.67	2.97	2.24	0.96	7.20	10.65	12.01	24.48
27/5/2010	1,45	4.55	2.47	1.49	1.44	3.73	2.42	43.16	2.30	3.05	1.28	1.15	6.36	9.86	10.27	22.17
12/9/2010	1,77	3.14	1.80	0.87	2.03	3.30	2.65	40.21	1.86	1.60	1.34	0.87	8.98	10.12	14.78	19.08
18/10/2010	2,05	2.98	1.88	0.91	1.89	3.54	2.34	41.40	1.90	1.96	1.78	0.96	7.65	11.23	15.65	18.78
28/11/2010	1,63	3.45	2.03	0.82	1.95	2.21	1.87	39.54	2.10	2.25	1.56	1.01	8.43	13.78	14.2	21.01

APÊNDICE III – Curvas Espectrais dos pontos de monitoramento UFSC, para as 46 imagens avaliadas.

