Daniel Schaffer Ferreira Jorge

**Caracterização espectral das imagens de cor do oceano durante
florações de fitoplâncton na Lagoa dos Patos**

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

Orientadora: Profa. Dra. Áurea Maria
Ciotti

São Paulo

2013

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Caracterização espectral das imagens de cor do oceano durante
florações de fitoplâncton na Lagoa dos Patos

Daniel Schaffer Ferreira Jorge

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

Julgada em __/__/____

_____ Prof(a). Dr.(a).	_____ Conceito
_____ Prof(a). Dr.(a).	_____ Conceito
_____ Prof(a). Dr.(a).	_____ Conceito

Sumário

1. Introdução	01
1.1 Propriedades óticas dos oceanos	01
1.2 Sensoriamento remoto da cor do oceano e algoritmos bio-óticos	04
1.3 Florações de fitoplâncton	07
2. Área de Estudo	10
3. Objetivos	14
4. Materiais e métodos	15
4.1 Banco de dados	15
4.2 Análise dos dados	15
4.2.1 Análise por funções ortogonais empíricas	17
4.2.2 Análise por diagramas de Hovmoller	18
4.2.3 Análise de correlação	19
4.2.4 Análise por agrupamento hierárquico	20
5. Resultados	22
5.1 Caracterização espaço temporal das refletâncias espectrais	22
5.1.1 Análise EOF	22
5.1.2 Análise dos diagramas de Hovmoller	23
5.1.3 Relações entre os produtos de sensoriamento remoto e dados in situ	28
5.2 Relação entre a reflectância da Lagoa dos Patos e as variáveis ambientais	30
5.2.1 Distribuição sazonal das variáveis	30
5.2.2 Análises de correlação entre as variáveis	35
5.3 Comportamento espectral da reflectância ao longo do tempo e espaço durante florações do fitoplâncton	38
6. Discussão	53
6.1 Reflectância de sensoriamento remoto ao longo da Lagoa dos Patos	53
6.2 Variação temporal de produtos de cor do oceano	55
6.3 Relação entre os produtos de sensoriamento remoto e medidas in situ	59
6.4 Relação entre a precipitação e a componente u e v da velocidade do vento em relação a reflectância de sensoriamento remoto	60
6.5 Assinaturas dos espectros de reflectância do sensoriamento remoto	62
7. Conclusão	69
8. Considerações finais	71
9. Referências	72

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 DATA DAS IMAGENS DIÁRIAS UTILIZADAS PARA O DESENVOLVIMENTO DESTA ANÁLISE DE EOF.	18
TABELA 2 VALOR DE P OBTIDO PELA ANÁLISE ANOVA APLICADA AOS DADOS DE RRS E SENDO OS ANOS DE EL NINO E LA NINA COMO FATOR DE AGRUPAMENTO. AS LINHAS CORRESPONDEM AS 4 ÁREAS DE ESTUDO, E AS COLUNAS AOS 8 COMPRIMENTOS DE ONDA.....	25
TABELA 3 VALOR DE P OBTIDO PELA ANÁLISE ANOVA APLICADA AOS DADOS DE RRS SENDO OS ANOS E A ÁREA DE ESTUDO COMO FATOR DE AGRUPAMENTO. AS COLUNAS CORRESPONDEM AOS 8 COMPRIMENTOS DE ONDA E AS LINHAS AOS FATORES DA ANOVA (ANO, ÁREA, ANO x ÁREA).....	25
TABELA 4 VALOR DE P OBTIDO PELA ANÁLISE ANOVA APLICADA AOS DADOS DE RRS UTILIZANDO A SAZONALIDADE COMO FATOR DE AGRUPAMENTO. AS COLUNAS AOS 8 COMPRIMENTOS DE ONDA.....	26
TABELA 5 VALOR MEDIANO E DESVIO PADRÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A ($\text{MG} \cdot \text{M}^{-3}$). CHL SE REFERE AO PRODUTO E 1 A 4 SE REFERE À SUB-ÁREA.....	32
TABELA 6 VALOR MEDIANO E DESVIO PADRÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A ($\text{MG} \cdot \text{M}^{-3}$). CHL SE REFERE AO PRODUTO E 1 A 4 SE REFERE À SUB-ÁREA.	32
TABELA 7 VALOR MEDIANO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DO OCEANO ($^{\circ}\text{C}$) E DESVIO PADRÃO. SST SE REFERE AO PRODUTO E 1 A 4 SE REFERE À SUB-ÁREA.....	33
TABELA 8 VALOR MEDIANO DE TEMPERATURA SUPERFICIAL DO OCEANO ($^{\circ}\text{C}$) E DESVIO PADRÃO. SST SE REFERE AO PRODUTO E 1 A 4 SE REFERE À SUB-ÁREA.....	33
TABELA 9 VALOR MEDIANO DE ÍNDICE DE CDOM (SEM UNIDADE) E DESVIO PADRÃO. CDOM SE REFERE AO PRODUTO E 1 A 4 SE REFERE À SUB-ÁREA.....	34
TABELA 10 VALOR MEDIANO DE ÍNDICE DE CDOM (SEM UNIDADE) E DESVIO PADRÃO. CDOM SE REFERE AO PRODUTO E 1 A 4 SE REFERE À SUB-ÁREA.....	34
TABELA 11 VALOR DE P SIGNIFICATIVOS ($P < 0.05$) PARA O TESTE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS (PRE EQUIVALE A PRECIPITAÇÃO; UWIN E VWIN EQUIVALEM AS COMPONENTES U E V DA VELOCIDADE DO VENTO E A NUMERAÇÃO SE REFERE AOS 4 PONTOS OBTIDOS EM VOLTA DA LP) E OS PRODUTOS REMOTOS(RRS(412) A RRS(869), CHL-A, CDOM, SST E FLH), DA SUB-ÁREA 1. CÉLULAS VAZIAS CORRESPONDEM A VALORES DE P NÃO SIGNIFICATIVOS ($P > 0.05$).	36
TABELA 12 VALOR DE P SIGNIFICATIVOS ($P < 0.05$) PARA O TESTE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS (PRE EQUIVALE A PRECIPITAÇÃO; UWIN E VWIN EQUIVALEM AS COMPONENTES U E V DA VELOCIDADE DO VENTO E A NUMERAÇÃO SE REFERE AOS 4 PONTOS OBTIDOS EM VOLTA DA LP) E OS PRODUTOS REMOTOS(RRS(412) A RRS(869), CHL-A, CDOM, SST E FLH), DA SUB-ÁREA 2. CÉLULAS VAZIAS CORRESPONDEM A VALORES DE P NÃO SIGNIFICATIVOS($P > 0.05$).	36
TABELA 13 VALOR DE P SIGNIFICATIVOS ($P < 0.05$) PARA O TESTE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS (PRE EQUIVALE A PRECIPITAÇÃO; UWIN E VWIN EQUIVALEM AS COMPONENTES U E V DA VELOCIDADE DO VENTO E A NUMERAÇÃO SE REFERE AOS 4 PONTOS OBTIDOS EM VOLTA DA LP) E OS PRODUTOS REMOTOS(RRS(412) A RRS(869), CHL-A, CDOM, SST E FLH), DA SUB-ÁREA 3. CÉLULAS VAZIAS CORRESPONDEM A VALORES DE P NÃO SIGNIFICATIVOS($P > 0.05$).	37
TABELA 14 VALOR DE P SIGNIFICATIVOS ($P < 0.05$) PARA O TESTE DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS AMBIENTAIS (PRE EQUIVALE A PRECIPITAÇÃO; UWIN E VWIN	

EQUIVALEM AS COMPONENTES U E V DA VELOCIDADE DO VENTO E A NUMERAÇÃO SE REFERE AOS 4 PONTOS OBTIDOS EM VOLTA DA LP) E OS PRODUTOS REMOTOS(RRS(412) A RRS(869), CHL-A, CDOM, SST E FLH), DA SUB-ÁREA 1. CÉLULAS VAZIAS CORRESPONDEM A VALORES DE P NÃO SIGNIFICATIVOS.FLH), DA SUB-ÁREA 4. CÉLULAS VAZIAS CORRESPONDEM A VALORES DE P NÃO SIGNIFICATIVOS(P>0.05).	37
TABELA 15 DISTRIBUIÇÃO DOS ORGANISMOS FITOPLANCTÔNICOS PARA A LAGOA DOS PATOS DE ACORDO COM A REGIÃO, GRUPO TAXONÔMICO E O SEU TAMANHO. QUANTO A SUA DISTRIBUIÇÃO, N SE REFERE À REGIÃO NORTE, C A REGIÃO CENTRAL E S A REGIÃO SUL.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 IMAGEM DA LAGOA DOS PATOS GERADA ATRAVÉS DO COASTLINE EXTRACTOR (HTTP://WWW.NGDC.NOAA.GOV/MGG/COAST/) COM AS QUATRO SUB-ÁREAS DETERMINADAS EM NOSSO ESTUDO. AS FLECHAS EM VERMELHO E VERDE INDICAM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS MEDIDAS OBTIDAS <i>IN SITU</i>	10
FIGURA 2 PRIMEIRA EOF E SEGUNDA EOF PARA RRS EM 412 NM E 547 NM (ADIMENSIONAL). DEVIDO A SEMELHANÇA NA DISTRIBUIÇÃO DOS AUTOVALORES, RRS 412 NM REPRESENTA OS COMPRIMENTOS DE ONDA ENTRE 412 NM E 547 NM, ENQUANTO QUE RRS 547 NM REPRESENTA OS COMPRIMENTOS DE ONDA RRS 531 NM E 547 NM .PERCENTAGEM EXPLICADA PELO PRIMEIRO EIXO PRINCIPAL ENTRE 62 E 85% E 6 E 17% PARA O SEGUNDO EIXO PRINCIPAL. RRS SE REFERE À REFLECTÂNCIA DE SENSORIAMENTO.	23
FIGURA 3 HOVMOLLER DE REFLECTÂNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO (SR^{-1}) DO SENSOR MODIS PARA TODOS OS COMPRIMENTOS DE ONDA UTILIZADOS. OS DIFERENTES DIAGRAMAS SE REFEREM ÀS QUATRO ÁREAS DE ESTUDO AO LONGO DO EIXO NORTE-SUL; O EIXO X SE REFERE A CADA IMAGEM DIÁRIA AGRUPADA CRONOLOGICAMENTE E O EIXO Y SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA UTILIZADOS EM NM.	24
FIGURA 4 HOVMOLLER DE REFLECTÂNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO (SEM UNIDADE) DO SENSOR MODIS PARA OS COMPRIMENTOS DE ONDA ENTRE 443 E 531 NM. OS 4 DIAGRAMAS SE REFEREM ÀS QUATRO ÁREAS DE ESTUDO AO LONGO DO EIXO NORTE-SUL; O EIXO X SE REFERE A CADA IMAGEM DIÁRIA AGRUPADA CRONOLOGICAMENTE E O EIXO Y SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA UTILIZADOS EM NM. A MATRIZ DE CORES NO FIM DA TABELA SE REFERE ÀS ESTAÇÕES DO ANO.....	24
FIGURA 5 HOVMOLLER DE CLOROFILA-A ($MG \cdot M^{-3}$), LINHA DE LINHA DE ALTURA DE FLUORESCÊNCIA E TEMPERATURA SUPERFICIAL DO OCEANO ($^{\circ}C$) PARA AS ÁREAS DE ESTUDO. O EIXO X SE REFERE A CADA IMAGEM DIÁRIA AGRUPADA CRONOLOGICAMENTE E O EIXO Y SE REFERE ÀS 4 ÁREAS DE ESTUDO AO LONGO DO EIXO NORTE-SUL. A MATRIZ DE CORES NO FIM DA TABELA SE REFERE ÀS ESTAÇÕES DO ANO.....	27
FIGURA 6 DISTRIBUIÇÃO DA MAGNITUDE DE RRS(412) EM BARRAS E PRECIPITAÇÃO (KG/M^{-3}) EM LINHA AO LONGO DO TEMPO PARA AS 4 ÁREAS DE ESTUDO.....	28
FIGURA 7 GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE I-CDOM DE SENSORIAMENTO REMOTO E SALINIDADE MEDIDA <i>IN SITU</i> PARA UM ÚNICO PONTO DA LAGOA DOS PATOS.....	29
FIGURA 8 GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE OS VALORES MEDIANOS POR ESTAÇÃO DO ANO DE CLOROFILA-A MEDIDA ($MG \cdot M^{-3}$) <i>IN SITU</i> E CLOROFILA-A DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA A ÁREA 4 (A) E ENTRE A CLOROFILA-A SAZONAL MEDIDA <i>IN SITU</i> E A LINHA DE ALTURA DA FLUORESCÊNCIA MEDIDA POR SENSORIAMENTO REMOTO PARA A ÁREA 4 (B).....	30
FIGURA 9 COMPORTAMENTO SAZONAL (ANUAL E SAZONAL) DA CLOROFILA-A ($MG \cdot M^{-3}$) DOS SENSOR MODIS PARA AS QUATRO ÁREAS DE ESTUDO E PARA UMA MEDIDA <i>IN SITU</i> NO ESTUÁRIO, DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DO OCEANO ($^{\circ}C$) E I-CDOM (SEM UNIDADE).A LINHA PRETA INDICA A DIVISÃO ENTRE ANOS DE EL NIÑO E LA NIÑA.O VALOR DE 1 A 4 SE REFERE AS 4 SUB-ÁREAS DE ESTUDO.....	31
FIGURA 10 COMPORTAMENTO ESPECTRAL PARA O SENSOR MODIS DESENVOLVIDO A PARTIR DOS QUATRO GRANDES GRUPOS FORMADOS NA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO, COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ESPECTRO NO CANTO INFERIOR DIREITO. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM	

NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS.....	39
FIGURA 11 COMPORTAMENTO ESPECTRAL PARA O SENSOR MODIS PARA AS QUARTO ÁREAS DE ESTUDO, UTILIZANDO COMO CRITÉRIO DE SELEÇÃO O VALOR MÍNIMO DE 0.1 PARA FLH. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).....	40
FIGURA 12 COMPORTAMENTO ESPECTRAL PARA O SENSOR MODIS PARA AS QUARTO ÁREAS DE ESTUDO, UTILIZANDO COMO CRITÉRIO DE SELEÇÃO O VALOR MÍNIMO DE 0.15 PARA FLH. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).....	40
FIGURA 13 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PIXELS CARACTERIZADOS COMO FORMATO EM VALE ENTRE 412 E 531 NM PARA AS IMAGENS MODIS. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).	41
FIGURA 14 DISTRIBUIÇÃO DOS ESPECTROS DO SENSOR MODIS AGRUPADOS EM FUNÇÃO DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (1 A 10). 11 CORRESPONDE AO VALOR MÉDIO POR SUB GRUPO E A 12 SE REFERE AO DENDROGRAMA RESULTANTE. O EIXO X CORRESPONDE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).....	42
FIGURA 15 DISTRIBUIÇÃO DA SEGUNDA DERIVADA DOS ESPECTROS INTERPOLADOS LINEARMENTE DO SENSOR MODIS AGRUPADOS EM FUNÇÃO DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR AO VALOR DA SEGUNDA DERIVADA DO VALOR DE RRS.	42
FIGURA 16 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS PIXELS CARACTERIZADOS COMO FORMATO EM VALE ENTRE 412 E 531 NM PARA AS IMAGENS SEAWIFS. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531) PARA AS 4 ÁREAS DE ESTUDO. A AUSÊNCIA DE ESPECTROS PARA A ÁREA 2 SE REFERE À AUSÊNCIA DE PIXELS PARA ESSA SUB-ÁREA DE ESTUDO.	43
FIGURA 17 DISTRIBUIÇÃO DOS ESPECTROS DO SENSOR SEAWIFS AGRUPADOS EM FUNÇÃO DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (1 A 10). A 11 FIGURA SE REFERE AO VALOR MÉDIO POR SUB GRUPO E A 12 SE REFERE AO DENDROGRAMA RESULTANTE. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).....	43
FIGURA 18 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO/TEMPORAL DOS PIXELS VÁLIDOS PARA O SENSOR MODIS UTILIZADOS DURANTE A ANÁLISE DE AGRUPAMENTO.	45
FIGURA 19 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO/TEMPORAL DOS PIXELS VÁLIDOS PARA O SENSOR SEAWIFS UTILIZADOS DURANTE A ANÁLISE DE AGRUPAMENTO.....	45
FIGURA 20 COMPORTAMENTO ESPECTRAL MÉDIO PARA GRUPOS CLASSIFICADOS PELO DENDROGRAMA. DIATOMÁCEAS EM VERMELHO E CIANOBACTÉRIAS EM AZUL. O EIXO X CORRESPONDE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).....	46
FIGURA 21 ESPECTRO DE REFLECTÂNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA ÁGUAS AO LONGO DO VISÍVEL. OS ESPECTROS DE CLOROFILA-A ENTRE 0.03 E 10 FORAM PROPOSTOS EM MOREL (2001) E O ESPECTRO MEDIDO CORRESPONDE AO VALOR MÉDIO DOS PIXELS CARACTERIZADOS COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DOS DEMAIS COMPONENTES ÓTICOS. COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS EM X,	

LOG10(EU/ED) NO EIXO Y PARA OS ESPECTROS MODELADOS E EM RRS NORMALIZADA EM RRS(531) PARA OS VALORES MEDIDOS.....	47
FIGURA 22 ASSINATURAS PARA A REGIÃO DE ESTUDO. NA PRIMEIRA COLUNA ESTÃO REPRESENTADAS A ÁGUA COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE CDOM E PARTÍCULAS, MISTA E DOMINADA POR CDOM/SEDIMENTO RESPECTIVAMENTE, E NA SEGUNDA COLUNA ESTÃO REPRESENTADAS FLORAÇÕES DE CIANOBACTÉRIAS, DIATOMÁCEAS DE ÁGUA DOCE E DIATOMÁCEAS DE ÁGUA SALGADA RESPECTIVAMENTE. O EIXO X SE REFERE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).	47
FIGURA 23 COMPORTAMENTO ESPECTRAL MÉDIO PARA AS ASSINATURAS CLASSIFICADAS PELO DENDROGRAMA. FLORAÇÕES DE FITOPLÂNCTON EM VERDE, ÁGUAS COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE CDOM/SEDIMENTOS E/OU FITOPLÂNCTON EM VERMELHO E ÁGUAS COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DOS DE MAIS COMPONENTES ÓTICOS EM AZUL. O EIXO X CORRESPONDE AOS COMPRIMENTOS DE ONDA EM NANÔMETROS E O EIXO Y SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO DE RRS EM RRS(531).	49
FIGURA 24 DISTRIBUIÇÃO DOS PIXELS VÁLIDOS PARA O SENSOR MODIS EM FUNÇÃO DO SEU FORMATO. O EIXO X CORRESPONDE À DIFERENÇA DO VALOR NORMALIZADO DE RRS ENTRE 547 E 443 NM (SEM UNIDADE), O EIXO Y CORRESPONDE À DIFERENÇA DO VALOR NORMALIZADO DE RRS ENTRE 488 E 412 NM (SEM UNIDADE) E O EIXO Z SE REFERE AO VALOR NORMALIZADO EM 547 NM (SEM UNIDADE).....	50
FIGURA 25 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS PIXELS UTILIZADOS PELO MODELO DE CLASSIFICAÇÃO PARA O DIA 7 DE JULHO DE 2004. RAZÃO 547 – 488 E 531-443 À ESQUERDA, E VALOR DE RRS EM 547 E MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA A DIREITA. 1 CORRESPONDE A ÁGUAS COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE CDOM/PARTÍCULAS, 2 A ÁGUAS MISTAS, 3 A ÁGUAS DOMINADAS POR CDOM/PARTÍCULAS, 4 A CIANOBACTÉRIAS, 5 A DIATOMÁCEAS EM ÁGUAS COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE CDOM E SEDIMENTOS E 6 A DIATOMÁCEAS COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE CDOM E SEDIMENTOS.	51
FIGURA 26 MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DOS PIXELS UTILIZADOS PELO MODELO DE CLASSIFICAÇÃO PARA O DIA 27 DE FEVEREIRO DE 2005. RAZÃO 547 – 488 E 531-443 À ESQUERDA, E VALOR DE RRS EM 547 E MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA A DIREITA. 1 CORRESPONDE A ÁGUAS COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE CDOM/PARTÍCULAS, 2 A ÁGUAS MISTAS, 3 A ÁGUAS DOMINADAS POR CDOM/PARTÍCULAS, 4 A CIANOBACTÉRIAS, 5 A DIATOMÁCEAS EM ÁGUAS COM ALTA CONCENTRAÇÃO DE CDOM E SEDIMENTOS E 6 A DIATOMÁCEAS COM BAIXA CONCENTRAÇÃO DE CDOM E SEDIMENTOS.	51
FIGURA 27 DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM ACUMULADA (0 A 1) DOS PIXELS CLASSIFICADOS PELO MODELO DE CLASSIFICAÇÃO PARA TODAS AS IMAGENS DISPONÍVEIS DO SENSOR MODIS/AQUA. O EIXO X CORRESPONDE AS 100 IMAGENS ANALISADAS E O EIXO Y CORRESPONDE À DISTRIBUIÇÃO DA PERCENTAGEM DOS PIXELS CLASSIFICADOS EM 7 CATEGORIA. OS CÍRCULOS EVIDENCIAM AS FLORAÇÕES IDENTIFICADAS.	52
FIGURA 28 DISTRIBUIÇÃO ACUMULADA DAS FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS (4), DIATOMÁCEAS 1(5) E DIATOMÁCEAS 2 (6) PARA TODO O CONJUNTO DE IMAGENS.	52
FIGURA 29 VELOCIDADE DA COMPONENTE U E V DO VENTO ENTRE OS DIAS 25 E 28 DE FEVEREIRO DE 2005. IMAGEM GERADA EM HTTP://WWW.ESRL.NOAA.GOV/PSD/DATA/GRIDDED/DATA.NCEP.REANALYSIS.HTML .	

.....	65
FIGURA 30 FLUXOGRAMA MODELO DE CLASSIFICAÇÃO DESENVOLVIDO PARA AMBIENTES LAGUNARES OTICAMENTE COMPLEXOS.....	68

Agradecimentos

Aos meus pais por apoiarem a minha escolha até o fim e fazerem o possível para que eu pudesse fazer o mestrado sem nenhum problema, e aos meus irmãos, pelas conversas e brincadeiras no convívio diário e por toda a diversão durante esses três anos. Também agradeço as tias Paula e Najda, por toda a preocupação e atenção.

Ao pessoal de Orlândia, David, Zorba, Aluísio, Bafo, Bean e Nanico, por tornarem as madrugadas mais divertidas e que, mesmo sem se ver por meses, conseguem manter a mesma amizade por mais de 20 anos.

Ao pessoal do laboratório aquarela, Monte, Bia, Ana Lu, Caju Nervo, Amábile e Amália, por toda a loucura coletiva e pelos dias em São Sebastião. Eles me deram todo o apoio necessário para o desenvolvimento e conclusão do mestrado, aturando toda a confusão e apoiando até o fim, especialmente a Amábile, por toda a ajuda na revisão final da dissertação.

A Áurea, pela paciência gigantesca e por acreditar que eu poderia concluir o mestrado, mesmo com todos os problemas, contribuindo para o meu desenvolvimento pessoal e acadêmico durante todos esses anos.

A Clarisse Odebrecht e ao Osmar Moller pelos dados *in situ* e por toda a atenção.

À FAPESP pelo auxílio concedido através da bolsa de mestrado.

Resumo

A Lagoa dos Patos (LP) é um dos ambientes opticamente complexos mais bem estudados no Brasil, e sua grande abrangência espacial, permite a união de diferentes medidas *in situ* com produtos de sensoriamento remoto, sendo possível entender melhor como os componentes óticos da água influenciam na sua cor. Florações de fitoplâncton possuem grande relevância ecológica e econômica, sendo o desenvolvimento de metodologias simples para o seu monitoramento de vital importância. O presente trabalho utilizou produtos de coloração do oceano de imagens diárias dos sensores MODIS/Aqua e SeaWiFS durante os anos de 2002-2005, dados de modelos meteorológicos de reanálise para precipitação e velocidade do vento e dados de clorofila-a e salinidade obtidos *in situ*. Foi identificado que o espectro de reflectância de sensoriamento remoto é controlado pelo regime de El Niño e La Niña, variação intra anual e espacial ($p < 0.05$), sendo a cor da água da LP em geral, característica de ambientes com alta concentração de CDOM/sedimentos ou de domínio misto. Partindo do pressuposto que o fitoplâncton domina o coeficiente de absorção da luz durante florações de fitoplâncton, e que as possíveis florações na LP se restringem a diatomáceas e cianobactérias, foi desenvolvido um modelo de classificação para discriminar a ocorrência desses eventos. O modelo proposto permite a classificação de águas opticamente complexas de acordo com o componente ótico predominante, e é pioneiro na exploração de dados do sensor MODIS/Aqua para detecção de florações de fitoplâncton em um ambiente lagunar.

Palavras chaves: Lagoa dos Patos, opticamente complexo, floração de fitoplâncton, modelo de classificação.

Abstract

Patos Lagoon (PL) is one of the optically complex environment best studied in Brazil, and its large spatial extent, allows the union of different *in situ* and remote sensing measures, enabling a better understanding of how the optical components in water can influence its color. Phytoplankton blooms have great ecological and economic relevance, and the development of simple methodologies for their monitoring is of vital importance. The present work used ocean color products from daily MODIS/Aqua and SeaWiFS images during the years 2002-2005, meteorological model data for precipitation and wind speed and chlorophyll-a and salinity data obtained *in situ*. It was detected that remote sensing reflectance spectra is controlled by the regime of El Niño and La Niña, intra annual and spatial changes ($p < 0.05$), and the water color from PL in general, characteristic of environments with high CDOM/sediments concentration or with mixed domain. Assuming that the phytoplankton dominate light absorption coefficient during phytoplankton blooms, and that PL possible blooms are restricted to diatom and cyanobacteria, a classification model was developed to discriminate the occurrence of those events. The proposed model allows for the classification of optically complex waters according to the predominant optical component, and it is pioneer in the exploration of data from MODIS/Aqua sensor to detect phytoplankton blooms in lagunar environment.

Keywords: Patos Lagoon, optically complex, phytoplankton bloom, classification model.

1. Introdução

1.1 Propriedades óticas dos oceanos

A coloração superficial da água, ou reflectância espectral, resulta da interação entre as substâncias presentes na água, através de processos de absorção e espalhamento (PREISENDORFER, 1961), com a irradiância solar na faixa espectral visível (400 a 700 nm). As propriedades óticas de corpos de água são divididas em 2 grupos: propriedades óticas inerentes (em inglês, *Inherent Optical Properties*; IOP) e aparentes (em inglês, *Apparent Optical Properties*; AOP). As IOPs são propriedades intrínsecas ao corpo de água, sendo as principais os coeficientes espectrais de absorção e espalhamento espectral da luz. As principais AOPs são a reflectância (cor da água) e o coeficiente de atenuação vertical difusa da luz. A reflectância é diretamente proporcional ao espalhamento da luz em direção à superfície e inversamente proporcional ao coeficiente de absorção (MOREL & BRICAUD, 1981; GORDON, 1991), o que permite usar medidas de reflectância obtidas por sensoriamento remoto para obter informações dos componentes opticamente ativos da água (GORDON *et al.*, 1989).

O coeficiente de absorção da luz em um corpo de água, $a(\lambda, m^{-1})$, é definido como:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_{det}(\lambda) \quad (1)$$

onde $a_w(\lambda)$, $a_{CDOM}(\lambda)$, $a_{ph}(\lambda)$, $a_{det}(\lambda)$ correspondem à absorção de luz pelas moléculas de água (w), pela matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM), pelo

fitoplâncton (ph) e pelos detritos e sedimentos inorgânicos (det), respectivamente, onde λ representa o comprimento de onda em nanômetros. Durante florações de fitoplâncton, a contribuição de $a_{ph}(\lambda)$ para $a(\lambda)$ geralmente supera a dos demais componentes opticamente ativos (WANG *et al*, 2010). Águas em que o coeficiente de absorção é dominado pelo fitoplâncton (águas Caso I), a influência de CDOM, detritos e sedimentos varia apenas com a concentração de clorofila-a (PRESENDORFER, 1961; MOREL & MARITORENA, 2001; MOREL & GENTILI 2009). Em ambientes opticamente complexos (águas Caso II), $a_{CDOM}(\lambda)$, e $a_{det}(\lambda)$ tendem a apresentar maiores magnitudes que $a_{ph}(\lambda)$ nos comprimentos de onda nas bandas do azul e do vermelho (GALEGOS & NEALE, 2002; CHEN *et al*, 2003; D'SA & MILLER, 2004). Todavia, caso se conheça o comportamento espectral dos componentes opticamente ativos da água, ou se estes não variem ao longo do tempo, é possível discriminar a absorção devido ao fitoplâncton da absorção dos demais componentes óticos (CIOTTI, 1999).

A magnitude da $a_w(\lambda)$ aumenta exponencialmente a partir dos comprimentos de onda nas bandas do vermelho (POPE & FRY 1997), e pode ser considerada relativamente constante. Ambas as magnitudes de $a_{CDOM}(\lambda)$ e $a_{det}(\lambda)$ aumentam exponencialmente com a diminuição do comprimento de onda (BRICAUD *et al*, 1981). O comportamento espectral de $a_{ph}(\lambda)$ é determinado por pigmentos presentes nas células (e.g., HOEPPFNER & SATHYENDRANATH, 1991), tamanho celular (e.g., CIOTT *et al* I, 2002) e grupo taxonômico (e.g., BARLOW *et al*, 2002).

A CDOM é em geral constituído por ácidos húmicos e fúlvicos (CARDER *et al.*, 1989; BLOUGH & GREEN, 1995) e pode ter origem local, pela

degradação de células do fitoplâncton (e.g., THURMAN, 1985) ou outras partículas orgânicas, ou pode ter origem alóctone (e.g., STUBBINS *et al.*, 2010; COBLE, 2007). Em ambientes estuarinos, observa-se uma maior concentração de CDOM (SIEBURTH & JENSEN, 1969; CARDER *et al.*, 1989; BRICAUD *et al.*, 1981). Em regiões costeiras com aporte continental significativo, a magnitude de $a_{CDOM}(\lambda)$ é geralmente inversamente relacionada à salinidade (BOWERS & BRETT, 2008; URQUHARD *et al.*, 2012), devido à mistura conservativa entre massas de água oceânicas com baixa concentração de CDOM e o aporte continental (PALACIOS *et al.*, 2009). Como o comportamento espectral de $a_{det}(\lambda)$ se assemelha àquele de $a_{CDOM}(\lambda)$ e por não ser possível separar os dois componentes de forma consistente (KIRK, 1994), a absorção de luz de ambos é geralmente combinada em um único termo, designado como $a_{dg}(\lambda)$ (CARDER *et al.*, 1991; SIEGEL *et al.*, 2002), no desenvolvimento de algoritmos para a sua detecção por sensoriamento remoto.

O espectro de absorção da luz do pigmento clorofila-a possui bandas nas faixas do azul e do vermelho e determina, em grande parte, as variações espectrais de a_{ph} . A composição dos pigmentos além da clorofila-a (pigmentos acessórios), bem como o tamanho das células do fitoplâncton, efeito de empacotamento e taxonomia são os fatores que alteram a variabilidade de $a_{ph}(\lambda)$ em segunda ordem (BRICAUD *et al.*, 1995, 2004; CIOTTI *et al.*, 2002). Essas alterações em $a_{ph}(\lambda)$, por sua vez, se relacionam às condições de luz e concentração de nutrientes sob as quais os o fitoplâncton se encontra (MARRA *et al.*, 2007).

1.2. Sensoriamento remoto da cor do oceano e algoritmos bio- óticos

A radiância que emerge da superfície do mar, atravessa a atmosfera e atinge os sensores orbitais pode ser medida e a sua razão com a irradiância incidente corresponde à reflectância do sensoriamento remoto:

$$Rrs(\lambda) = \frac{nLw(\lambda)}{Ed(\lambda)} \quad (2)$$

$Rrs(\lambda)$ corresponde à radiância emergente da subsuperfície da água, na ausência de atmosfera e com o sol posicionado no zênite, $nLw(\lambda)$, dividida pela irradiância incidente que atinge a superfície da água, $Ed(\lambda)$ ajustadas em função da posição entre o sensor e o ponto medido (e.g., MOBLEY, 1999), com unidade sr^{-1} (steradianos). No presente trabalho, foram utilizados dados de reflectância medida pelos sensores SeaWiFS e MODIS/Aqua, com imagens disponíveis a partir de 1997 e 2002, respectivamente, e bandas espectrais específicas (ver CIOTTI *et al.*, 2010).

A reflectância de sensoriamento remoto também pode ser estimada através dos seus componentes óticos ativos de forma que os algoritmos (ou modelos) bio-óticos seguem a aproximação proposta por MOREL (1988):

$$Rrs(\lambda) = f/Q \frac{bb(\lambda)}{a(\lambda) + bb(\lambda)} \quad (3)$$

onde $bb(\lambda)$ é o coeficiente de retroespalhamento e f/Q é um termo que depende do campo luminoso (KIRK 1984, GORDON 1989).

O coeficiente $bb(\lambda)$, m^{-1} , se refere à atenuação da luz causada pelo espalhamento entre 90 e 180°, em direção à fonte. Apesar de ser uma propriedade ótica importante, o comportamento de $bb(\lambda)$ em ambientes

oticamente complexos ainda não é bem conhecido, sendo normalmente utilizada uma magnitude média de 0.018 m^{-1} (PETZOLD, 1972), embora alguns autores acreditem que este valor seja superestimado (TZORTZIOU *et al.*, 2007). Para comunidades fitoplanctônicas, WHITMIRE *et al.* (2010) demonstram como bb varia para diferentes espécies em cultivo, mas são escassos os estudos com medidas de $bb(\lambda)$ em associação a florações de fitoplâncton em ambientes costeiros. Levando em conta essas limitações, o presente trabalho assume que $bb(\lambda)$ não varia em função do grupo taxonômico, possuindo um espectro achatado para todos os comprimentos de onda (WHITMIRE *et al.*, 2007).

Algoritmos (ou modelos) bio-óticos que se baseiam em aproximações entre Rrs e IOPs, em associação a relações estabelecidas empiricamente entre IOPs e os constituintes ópticos, são denominados semi-analíticos (e.g., CARDER *et al.*, 2003; CIOTTI *et al.* 2002; LEE *et al.*, 2002; MARITORENA *et al.*, 2002; CLARK, 1997). Estes modelos foram desenvolvidos especialmente para regiões oceânicas e sua implementação em ambientes oticamente complexos é ainda restrita, uma vez que não existe a dominância de apenas um componente ótico (fitoplâncton). Algoritmos bio-óticos empíricos, mais simples e, portanto computacionalmente menos exigentes, são estabelecidos através da relação matemática entre Rrs(λ) em comprimento de onda específicos e a concentração de determinada substância, sendo operacionalmente implementados para fins de sensoriamento remoto.

Uma série de algoritmos bio-óticos empíricos foram desenvolvidos para estimativas da concentração de clorofila-a em águas caso I, e o modelo padrão dessa predição utiliza os valores de Rrs nas bandas espectrais centradas em

443, 488/490, 510 e 547/555 nm, a depender do sensor (O'REILLY *et al.*, 1998; CARDER *et al.*, 2003), sendo as bandas do azul referentes ao máximo de absorção de clorofila-a, e a banda no verde referente ao seu mínimo. Tal modelo utiliza a maior razão de $Rrs(\lambda)$ entre 443/488/510 e 547 nm para o cálculo de clorofila-a, minimizando os efeitos da absorção de luz devido ao CDOM e detritos ($a_{dg}(\lambda)$).

Outro produto obtido através de razões entre $Rrs(\lambda)$ é o índice de CDOM (i-CDOM) desenvolvido por MOREL & GENTILI (2009) para águas caso I, e estima a relação entre CDOM e clorofila-a no corpo de água com base na razão de $Rrs(\lambda)$ entre 412/443 e 490/555 nm. Resumidamente, valores de i_{CDOM} entre 0 e 1 sugerem águas dominadas por $a_{ph}(\lambda)$, enquanto que valores de i_{CDOM} acima de 1, águas dominadas por $a_{dg}(\lambda)$. Outro produto obtido por sensoriamento remoto relevante para o estudo das propriedades óticas do fitoplâncton é a linha de altura da fluorescência, FLH ($W/m^2/\mu m/sr$), descrito inicialmente por ABBOTT & LETELIER (1999). Em teoria, FLH é proporcional à intensidade de fluorescência natural emitida pelo fitoplâncton nas bandas do vermelho. Esse algoritmo se baseia na subtração do valor médio de Rrs entre 678 e 748 nm do valor em 678 nm para estimar a altura do pico de fluorescência. Apesar de FLH possuir geralmente correlação positiva com a concentração de clorofila-a, ainda existem muitas incertezas quanto à aplicação do algoritmo (HUOT *et al.*, 2005).

Baseado em trabalhos *in situ* e laboratoriais, as propriedades óticas do fitoplâncton foram estudadas de forma a compreender como a $Rrs(\lambda)$ se comporta em função de alterações nos grupos fitoplanctônicos predominantes, tamanho celular (e.g., CIOTTI, 1999) e composição de pigmentos acessórios

(e.g., ALVAIN *et al.*, 2005). Porém, é incerto se modelos que se baseiam nessas relações são apropriados para águas caso II. Em ambientes opticamente complexos, a obtenção de informações do fitoplâncton através de Rrs (WEAVER & WRIGLEY, 1994; RICHARDON, 1996) será possível, provavelmente, durante florações fitoplanctônicas e/ou em situações em que o sinal ótico devido ao fitoplâncton for maior do que o dos demais constituintes óticos (CULLEN *et al.*, 1997; KIRKPATRICK *et al.*, 2000; SUBRAMANIAM *et al.*, 2002).

1.3. Florações de fitoplâncton

As florações de fitoplâncton são potencialmente discrimináveis através do sensoriamento remoto porque a magnitude e o comportamento espectral da Rrs variam devido à presença de pigmentos além da clorofila-a, como clorofila-b, c e d, carotenóides ou ficobilinas, que também contribuem para $a_{ph}(\lambda)$ (BARLOW *et al.*, 2002), podendo gerar feições mais achatadas ou com a formação de picos em comprimentos de onda específicos. Florações de grupos específicos do fitoplâncton como os cocolitoforídeos, podem ser detectadas através de variações em Rrs devido a um alto grau de retroespalhamento causado por suas carapaças de carbonato de cálcio (e.g., Garcia *et al.*, 2011).

Espectros de Rrs associados à dominância do fitoplâncton apresentam um mínimo na região em torno de 440 nm, dada a maior absorção de luz pelos pigmentos (KIRK, 1994), e magnitude máxima na região do verde. Em ambientes opticamente complexos, a absorção de luz pelo CDOM e outros

materiais orgânicos particulados também contribuem para a diminuição da Rrs na faixa azul espectral (e.g., KONSTANDINOV *et al*, 2007).

Cianobactérias contém ficocianinas e ficobilinas como pigmentos acessórios em espécies de água doce e salgada, respectivamente. Em diatomáceas, os pigmentos acessórios são clorofila-c e fucoxantinas (LONDE, *et al*, 2005). Assumindo que o comportamento de $bb(\lambda)$ (Equação 3) não varia de forma significativa entre os dois grupos (WHITMIRE, *et al*, 2010; JOHNSEN *et al*, 1994), a variação em $Rrs(\lambda)$ se deve principalmente a $a_{ph}(\lambda)$ e, durante florações, seria possível diferenciar diatomáceas e cianobactérias através da forma de $Rrs(\lambda)$. É importante lembrar que o tamanho do organismo dominante do fitoplâncton altera $a_{ph}(\lambda)$; porém tal efeito se verifica em toda curva espectral, mas com um maior achatamento nas bandas do azul do que nas bandas do verde (BRICAUD *et al*, 2004). Neste trabalho, a possibilidade de diferenciação entre florações de cianobactérias e diatomáceas, será investigada através dos espectros de reflectância de sensoriamento remoto, discriminando espectros com um maior achatamento entre as bandas do azul e verde de espectros com um vale mais evidente e estabelecendo relações matemáticas entre comprimentos de onda pré-selecionados.

Florações de cianobactérias podem se desenvolver em ambientes oligotróficos com uma baixa razão nitrogênio:fósforo (HAVENS *et al*, 2003), uma vez que o grupo pode fixar nitrogênio atmosférico, não dependendo da disponibilidade desse nutriente na água. Por outro lado, as diatomáceas requerem maiores concentrações de nutrientes, além da sílica, necessária para a formação de suas estruturas celulares (WEHR *et al*, 2002). Outro fator que interfere no desenvolvimento do fitoplâncton é a mistura ao longo da coluna

d'água, que influencia positivamente o crescimento de organismos maiores ao mantê-los na zona eufótica (PETERS *et al*, 2006). Diatomáceas são mais eficientes na incorporação de nutrientes disponíveis na água, enquanto a adaptação de cianobactérias a situações de escassez de nutrientes confere vantagem ao grupo em relação aos demais (MOSS *et al*, 1997). Além de serem indicativos de disponibilidade de nutrientes, florações de cianobactérias podem conter toxinas, sendo importante o seu monitoramento em ambientes costeiros (DUAN *et al*, 2012).

Diversos estudos têm buscado à detecção de florações do fitoplâncton por sensoriamento remoto em áreas costeiras (e.g. SUBRAMANIAM *et al.*, 2002; TAKAHASHI, *et al.*, 2009; LUBAC & LOISEL, 2007; SISWANTO *et al.*, 2013) e corpos de água doce (e.g. RANDOLPH, 2008). Em ambientes lagunares, porém, esses estudos são escassos ou utilizam sensores hiperespectrais (e.g. LOBO *et al*, 2009). Mesmo com o fácil acesso aos dados de sensores de satélite multiespectrais (e.g. MODIS/Aqua e SeaWiFS) e da sua grande abrangência espacial e temporal, os mesmos são ainda pouco explorados no contexto de ambientes lagunares, uma vez que existe uma maior dificuldade de implementação devido ao menor número de bandas disponíveis. O presente trabalho visa desenvolver um modelo de classificação aplicável ao sensor MODIS/Aqua que permita a discriminação de florações categorizadas como diatomáceas e cianobactérias em um ambiente lagunar opticamente complexo, com alta concentração de CDOM e sedimentos. É importante salientar que as categorias de diatomáceas e cianobactérias foram selecionadas para destacar florações de grupos distintos.

2. Área de Estudo

A Lagoa dos Patos, LP, (Figura 1) possui uma área de 10,360 km² com diversos afluentes de água doce e cidades em seu entorno, além de uma bacia hidrográfica de cerca de 140,000 km² (SEELINGER *et al.*, 1997). A LP é uma laguna costeira rasa, com profundidade média de 5 m na região norte (CALLIARI, 1997) enquanto a região sul apresenta profundidades menores que 1,5 m em 80% da sua área (SEELINGER & ODEBRECHT, 2001). Localizada entre 30° e 32° de latitude sul e 50° a 52° de longitude oeste, a LP é uma das maiores lagunas costeiras restritas do mundo, com um clima caracteristicamente subtropical.

Figura 1 Imagem da Lagoa dos Patos gerada através do Coastline Extractor (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/>) com as quatro sub-áreas determinadas em nosso estudo. As flechas em vermelho e verde indicam a distribuição espacial das medidas obtidas *in situ*.

Devido às altas taxas de pluviosidade e baixa influência das marés, a circulação na LP é essencialmente controlada pelos aportes de água doce (MOLLER, 1996) da região ao norte, e entrada de água salgada da região estuarina, que possui uma área total de 900 km² com hidrologia normalmente condicionada pelo regime de ventos, taxas de evaporação e pluviosidade, todos caracteristicamente sazonais (MOLLER, 1996). Ventos do quadrante Sul, comuns durante o outono e inverno, geram gradientes de pressão entre a plataforma continental interna e o canal da LP, forçando as águas costeiras para o interior do estuário (MOLLER, 1996; GARCIA, 1997; FERNANDES, 2005). Já ventos do quadrante norte normalmente estão associados a altas taxas de pluviosidade e se iniciam ao final do inverno, o que causa um aumento da descarga fluvial (MOLLER *et al.*, 1996). A descarga do rio Guaíba, ao norte, possui grande relevância na hidrologia da LP, mas devido à distância de cerca de 250 km entre seu delta e o estuário, respostas biológicas a grandes entradas de água doce possuem um atraso de cerca de 20 dias (NIENCHESKI & WINDOM, 1994).

A região estuarina da LP atua como área de berçário para algumas espécies comerciais de peixe e camarão (KALIKOSKI, 2008) e propicia o desenvolvimento de macroalgas, cuja biomassa varia em função da salinidade, pluviosidade e atenuação da luz. ODEBRECHT *et al.* (2010) demonstram que a biomassa de macroalgas é bem correlacionada com a pluviosidade, ocorrendo uma diminuição da ocorrência desses organismos durante períodos de alta pluviosidade. Nesse contexto, eventos de El Niño possuem grande influência na dinâmica ecológica desses grupos, eliminando a população devido a alta pluviosidade, com um efeito que persiste por alguns anos.

A produtividade primária das águas da região de plataforma continental adjacente à LP é sazonal (CIOTTI *et al.*, 2010) e está relacionada à entrada de nutrientes do Rio da Prata e da própria Lagoa dos Patos (CIOTTI *et al.*, 1995). A biomassa fitoplanctônica e as taxas de produção primária têm sazonalidade marcada, com valores mínimos durante o inverno e máximos durante a primavera/verão, e a ocorrência de florações de cianobactérias e diatomáceas, respectivamente (ABREU *et al.*, 1994). Na LP, há um predomínio de água doce entre Novembro e Março em associação a ventos NE, enquanto entrada de água salgada ocorre até sua região central nos demais meses (ventos SO) (TORGAN *et al.*, 2004). Séries temporais obtidas de dados *in situ* de 20 anos no estuário da LP indicam variações na concentração de clorofila-a em diferentes escalas temporais (ABREU *et al.*, 2010). Esse mesmo trabalho mostra que respostas em pequena escala (horas a semanas) são relacionadas ao regime dos ventos, enquanto aquelas em escalas mensais e anuais são ligadas ao regime de chuvas. A variabilidade interanual da concentração de clorofila-a tem sido correlacionada positivamente com a chuva, que é mais intensa durante períodos de El Niño e mais escassa nos períodos de La Niña. ABREU *et al.* (2010) ainda reportam florações de diatomáceas durante o verão (menor salinidade).

Em resposta à variabilidade espaço-temporal na abundância e grupos predominantes do fitoplâncton, esperam-se diferenças nos espectros de Rrs das águas da LP possam ser identificadas através de sensoriamento remoto. Nosso trabalho pressupõe que existe uma variação sazonal na dominância de espécies durante florações fitoplanctônicas, e investigou-se a possibilidade de detectar florações de fitoplâncton na LP através de dados de reflectância do

sensoriamento remoto obtidos por satélite, propondo um modelo de classificação para florações de fitoplâncton categorizadas em grupos distintos, baseado no comportamento espectral de Rrs.

3. Objetivos

O objetivo geral do presente estudo foi identificar florações de fitoplâncton através da sua assinatura espectral de Rrs em um ambiente lagunar costeiro opticamente complexo. Os objetivos específicos consistiram em:

- Descrever a variabilidade da cor do oceano no tempo e ao longo do eixo longitudinal da Lagoa dos Patos;
- Investigar os efeitos da chuva e velocidade do vento na variabilidade da cor do oceano;
- Discriminar florações de diatomáceas e cianobactérias através da sua cor do oceano em um ambiente lagunar costeiro opticamente complexo.

4. Material e Métodos

4.1 Banco de dados

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas imagens de Rrs obtidas diariamente por satélite durante os anos de 2002 a 2005. Esse intervalo temporal foi escolhido em correspondência à série temporal de dados no estuário da LP obtida por ODEBRECHT *et al.* (2010). Os anos de 2002 e 2003 correspondem a períodos de El Niño e foram caracterizados por pluviosidade acima do esperado, enquanto os anos de 2004 e 2005 apresentaram níveis de chuva esperados para a região. Para uma abordagem espacial, a LP foi dividida em 4 regiões: norte, central, sul e estuário (Figura 1). (colocar onde)

Além dos dados de sensoriamento remoto, foram utilizados dados *in situ* de salinidade, concentração de clorofila-a e temperatura superficial da água de dois pontos do estuário da LP (Yacht-Museu: 32 01' 31"S, 52 06' 22"W) e Barra: 32 08' 57"S, 52° 06' 04"W), gentilmente cedidos pela Profa. Dra. Clarisse Odebrecht, além de dados *in situ* de salinidade para um único ponto do estuário da LP, cedidos pelo professor Osmar Moller. Taxas de precipitação e componentes Leste-Oeste (u) e Norte-Sul (v) da velocidade do vento em mesoescala foram obtidas através do banco de dados da reanálise do NCEP/NCAR, para 4 pontos mais próximos da região de estudo.

4.2 Análise dos dados

Os dados de satélite foram obtidos através do banco de imagens da National Aeronautics and Space Administration, NASA (<http://oceancolor.gsfc.n>

asa.gov/), em nível L0 (imagens brutas) imageados pelos sensores MODIS/Aqua (resolução espacial de 250 m) e SeaWiFS (1000 m). Imagens com baixa cobertura de nuvens foram processadas do nível L0 ao L2 e georreferenciadas através do software Seadas 6.4, utilizando a correção atmosférica MUMM. Essa correção foi selecionada por ser a mais adequada para águas opticamente complexas e sob influência de atmosfera continental (CARVALHO. *et al*, 2009; RUDDICK *et al.*, 2000).

Os produtos gerados através do processamento das imagens foram: a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}), a concentração de clorofila-a (CHL-a), temperatura superficial do oceano (SST), índice de CDOM (i-CDOM) e altura de linha de fluorescência (FLH). Também foram obtidos os coeficientes de retroespalhamento da luz pelas partículas (b_{bp}) e de absorção da luz por CDOM, detritos e sedimentos (a_{dg}) através dos modelos analíticos GSM ("Garver-Siegel-Maritorena model", MARITORENA *et al.*, 2002) e QAA versão 6 ("Quasi-Analytical Algorithm model", LEE *et al.*, 2002) como produtos complementares.

Cada imagem diária de certo produto, corresponde a uma matriz em que cada índice contém o valor do produto para seu respectivo pixel (resolução espacial de 250 ou 1000 m). Todas as matrizes de um dado produto foram sobrepostas, produzindo uma série temporal com a distribuição dos valores no espaço, tempo e, para os produtos com valores para cada banda espectral (R_{rs} , b_{bp} e a_{dg}), no espectro. Diferentes tratamentos estatísticos e critérios de seleção foram aplicados sobre as matrizes, como descrito a seguir.

4.2.1. Análise por funções ortogonais empíricas

Nesse trabalho foi utilizada a Função Empírica Ortogonal (EOF) como ferramenta estatística que descreve, por meio de seus componentes principais, padrões de variações espaço-temporais. A EOF correlaciona à variância dos dados em função do tempo, atribuindo valores extremos de variância entre -1 e 1 (autovalor) para cada pixel válido em cada padrão de variação (autovetor). Para este estudo, o número máximo de autovetores corresponde ao número de imagens analisadas. Como resultado, a análise EOF produz mapas para a região de estudo dos autovalores para cada autovetor, ou componente principal. As diferenças em magnitude dos autovalores sugerem fatores representativos da variabilidade observada. Como produto final, a análise EOF atribui uma percentagem de 0 a 100% para cada autovetor, que corresponde a quanto da variância observada pode ser explicada por este autovetor. Os valores resultantes representam a influência de alguma forçante na distribuição dos dados. Em geral, a maior parte da variância dos dados é explicada pelas primeiras 4 componentes principais da EOF. Tal análise foi aplicada aos valores de Rrs medidos pelo sensor MODIS/Aqua nos comprimentos de onda de 412 a 547 nm.

Por ser o objetivo de o nosso estudo discriminar florações do fitoplâncton ao longo do espaço na LP utilizando dados de satélite e a análise EOF não ser aplicável em séries temporais de dados com lacunas, um critério de seleção restritivo para cobertura de nuvens foi aplicado. Assim, foram utilizadas para a análise EOF apenas as imagens com CHL-a média da LP acima de 5 mg.m^{-3} , cobertura de nuvens abaixo de 10% e durante o período de

La Niña, resultando em 12 imagens (Tabela 1), de um total de 100 imagens. As imagens durante o período de El Niño foram removidas devido ao baixo número de imagens com cobertura de nuvem aceitável durante o período. Durante esse período esperamos identificar a presença de cianobactérias durante o outono e inverno e de diatomáceas durante a primavera.

Tabela 1 Data das imagens diárias utilizadas para o desenvolvimento desta análise de EOF.

2004	2005
10 Março	11 Março
14 Junho	16 Abril
20 Junho	29 Maio
06 Julho	14 Julho
25 Julho	
25 Setembro	
20 Outubro	
01 Novembro	

4.2.2 Análise por diagramas de Hovmoller

O diagrama de Hovmoller normalmente é utilizado para visualizar a distribuição de um conjunto de dados ao longo do tempo e espaço, permitindo a identificação de propagações e periodicidades ao longo dos eixos. O diagrama trabalha com o conceito de vales e picos, e permite colapsar dimensões, sendo possível analisar diferentes aspectos de um mesmo conjunto de dados. Neste trabalho, o conceito de diagramas de Hovmoller foi adaptado, construindo diagramas ao longo do tempo e espaço/comprimento de onda para as 4 sub-áreas da LP (Figura 1), representadas pelo valor mediano

das variáveis de interesse para todas as imagens diárias disponíveis e enfocando as feições relacionadas a máximos e mínimos, e sua periodicidade. As variáveis selecionadas foram os produtos do sensor MODIS/Aqua que incluem Rrs(412) a Rrs(748), CHL-a, SST e FLH. Para amenizar a influência de águas com turbidez extrema, os pixels com valor de Rrs(547) acima de 0.018 sr^{-1} , foram removidos todas as análises (modificado de SIMON & SHANMUGAM, 2012), maximizando os números de pixels válidos e diminuindo o efeito da turbidez. Apesar de Simon & Shanmugam (2012) utilizarem um valor de 0.014, essa mascara foi utilizada para águas costeiras, sendo necessário um ajuste, uma vez que a LP é naturalmente turva e a utilização de um mesmo valor de mascara inviabilizaria a análise.

4.2.3. Análise de correlação

A análise de correlação foi utilizada para estabelecer a relação entre 1) as variáveis meteorológicas (precipitação e velocidade do vento) e as variáveis medidas por sensoriamento remoto (CHL-a, SST e Rrs), bem como 2) a relação entre o valor de salinidade medido in situ e iCDOM, b_{bp} e a_{dg} estimadas com dados de sensoriamento remoto.

A análise de correlação utilizou as magnitudes diárias de Rrs, CHL-a, FLH e SST por subárea e a precipitação e componentes u e v da velocidade do vento. Após essa primeira análise, foi aplicada a análise de correlação entre as variáveis remotas e a precipitação em diferentes intervalos temporais, utilizando intervalos entre 0 e 7 dias. Essa análise pretendeu inferir o tempo necessário para que a precipitação altera a coloração da água.

Comparou-se também a relação entre a salinidade medida *in situ*, em um ponto ao longo do tempo, com o valor mediano de i-CDOM, bb e a_{dg} , calculado para os pixels disponíveis em um quadrado de 0.1° por 0.1° em volta da latitude e longitude do ponto *in situ*. O tamanho do quadrado se refere à necessidade de um número suficiente de pixels para utilizar durante a análise, sendo o tamanho selecionado para aumentar o número de magnitudes diárias (índice de CDOM). O foco dessa comparação foi verificar se relações entre salinidade e as variáveis remotas (i-CDOM, a_{dg} e b_{bp}) propostas pela literatura (PALACIOS *et al.*, 2009) são verificadas para a região de estudo e, então, a viabilidade de se estimar valores de salinidade para todos os pixels considerados no nosso estudo.

4.2.4 Análise por agrupamento hierárquico

Para investigar padrões espectrais de Rrs durante florações de fitoplâncton, uma análise de agrupamento hierárquico foi aplicada. Para a seleção de pixels válidos para tal análise, dois critérios foram utilizados. Primeiramente, foram estabelecidos valores mínimos de CHL-a (4 mg.m^{-3}) e máximos de Rrs em 547/555 nm (0.018 sr^{-1}), com o objetivo de selecionar apenas os pixels correspondentes a florações do fitoplâncton e excluir águas de alta turbidez. Também, foram selecionados apenas os pixels onde é possível notar uma feição em vale entre os valores de Rrs(412) e Rrs(488) (SISWANTO *et al.*, 2013)(valor de Rrs em 412 nm maior que o valor observado em 443 ou 488/490 nm). Com tais critérios, o número de pixels disponíveis para as análises foi bastante reduzido. Pelo fato de a Lagoa dos Patos ser

considerada rica em sedimentos e CDOM, não foram utilizados critérios de seleção mais restritivo para a Rrs em 547/555 nm.

A análise por agrupamento hierárquico não supervisionado foi selecionada, considerando-se a distância euclidiana como medida de distância e a metodologia de Ward para a formação dos grupos (WARD, 1963). A metodologia de Ward considera a variância do conjunto de dados para a formação de grupos ao minimizar a soma dos quadrados dos possíveis novos grupos durante cada passo na formação de um dendrograma. Esta metodologia é frequentemente utilizada para complementar análises de EOF (SAPORTA, 2006) aplicadas em dados espectrais. Para diminuir a influência dos valores absolutos de Rrs e enfatizar variações no formato espectral, cada espectro de Rrs foi normalizado pelo respectivo valor em Rrs(531). Para cada dendrograma, foram formados 10 grupos.

A segunda derivada dos espectros de Rrs foi calculada como forma de enfatizar variações espectrais. A segunda derivada foi selecionada porque evidencia a curvatura do espectro de Rrs (LUBAC & LOISEL, 2007). Para o cálculo da segunda derivada, cada espectro de Rrs foi linearmente interpolado com uma resolução espectral de 1 nm e a equação 4 foi utilizada, onde x representa o valor de Rrs e i se refere ao comprimento de onda.

$$x'(j) = x(i + 1) - x(i)$$

$$\therefore d^2 \rightarrow x'(j + i) - x'(j)$$

$$\text{onde } j = i + \frac{1}{2} \quad (4)$$

5. Resultados

5.1 Caracterização espaço-temporal das refletâncias espectrais

5.1.1 Análise EOF e variação espacial

A análise de EOF foi utilizada para identificar variações ao longo do eixo longitudinal da LP. Os resultados das análises representam principalmente os períodos entre outono e primavera, devido à ausência de imagens de boa qualidade no verão (Tabela 1). A variação explicada pelos dois primeiros componentes principais da EOF foi entre 62 e 85% e entre 6 e 17%, respectivamente. A variância do espectro de reflectância da água apresentou magnitudes diferentes ao longo do espaço e a magnitude do autovalor oscilou entre -0.03 e 0.03 (Figura 2).

Para o primeiro componente principal da EOF, os extremos nas magnitudes dos autovalores observados ocorrem na área central, enquanto as áreas norte e sul da Lagoa dos Patos registram valores próximos a 0 (Figura 2). O segundo componente principal da EOF resultou em máximos nos autovalores para a região sul e mínimos na região norte para os comprimentos de onda entre 412 e 488 nm, enquanto para os comprimentos de onda de 531 e 547 nm, observamos magnitudes máximas nos autovalores para a região norte e mínimos para a região sul (Figura 2).

Figura 2 Primeira EOF e segunda EOF para Rrs em 412 nm e 547 nm (adimensional). Devido a semelhança na distribuição dos autovalores, Rrs 412 nm representa os comprimentos de onda entre 412 nm e 547 nm, enquanto que Rrs 547 nm representa os comprimentos de onda Rrs 531 nm e 547 nm .Percentagem explicada pelo primeiro eixo principal entre 62 e 85% e 6 e 17% para o segundo eixo principal. Rrs se refere à reflectância de sensoriamento.

5.1.2 Análise dos diagramas de Hovmoller

Os diagramas de Hovmoller nesse trabalho mostram padrões espaço-temporais nas medianas das variáveis nas 4 sub-áreas da LP. Os diagramas utilizando Rrs (Figuras 3 e 4) ilustram variabilidade na magnitude em todos os comprimentos de onda com os maiores valores no início, e os menores ao final do período analisado, sugerindo diferenças entre anos de El Niño e La Niña (inverno de 2002 a verão de 2003 e verão de 2004 a primavera de 2005).

respectivamente). A análise visual sugeriu diferenças entre anos de El Niño e La Niña, confirmadas pela análise de ANOVA (Tabela 2) mostraram diferenças significativas nas magnitudes de Rrs em todos os comprimentos de onda na sub-área 1 (norte). Na sub-área 2, as diferenças em Rrs foram significativas em 678 e 748 nm; na sub-área 3, entre 488 e 748 nm e entre 667 e 748 nm na sub-área 4. Em escala de tempo anual, e entre as sub-áreas, a análise de ANOVA de 2 vias (Tabela 3) mostra um valor de p significativo para a interação dos dois fatores em praticamente todos os comprimentos de onda.

Figura 3 Hovmoller de reflectância de sensoriamento remoto (sr^{-1}) do sensor MODIS para todos os comprimentos de onda utilizados. Os diferentes diagramas se referem às quatro áreas de estudo ao longo do eixo norte-sul; o eixo x se refere a cada imagem diária agrupada cronologicamente e o eixo y se refere aos comprimentos de onda utilizados em nm.

Figura 4 Hovmoller de reflectância de sensoriamento remoto (sem unidade) do sensor MODIS para os comprimentos de onda entre 443 e 531 nm. Os 4 diagramas se referem às quatro áreas de estudo ao longo do eixo norte-sul; o eixo x se refere a cada imagem diária agrupada cronologicamente e o eixo y se refere aos comprimentos de onda utilizados em nm. A matriz de cores no fim da tabela se refere às estações do ano.

Tabela 2 Valor de p obtido pela análise ANOVA aplicada aos dados de Rrs e sendo os anos de El Nino e La Nina como fator de agrupamento. As linhas correspondem as 4 áreas de estudo, e as colunas aos 8 comprimentos de onda.

	412	443	488	531	547	667	678	748
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.50	0.86	0.93	0.73	0.53	0.28	0.02	0.02
3	0.39	0.37	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.31	0.99	0.56	0.16	0.07	0.00	0.00	0.00

Tabela 3 Valor de p obtido pela análise ANOVA aplicada aos dados de Rrs sendo os anos e a área de estudo como fator de agrupamento. As colunas correspondem aos 8 comprimentos de onda e as linhas aos fatores da ANOVA (Ano, Área, Ano x Área).

	412	443	488	531	547	667	678	748
Ano	0.00	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Área	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ano X Área	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05

Sazonalmente, em todas as 4 sub-áreas, os diagramas tipo Hovmoller para Rrs ilustram maiores valores em 667 e 678 nm durante os meses de verão, coincidentes com maiores taxas de precipitação (ABREU *et al*, 2010). Nos demais comprimentos de onda de Rrs, a variabilidade sazonal é apenas aparente para os anos de La Nina na região 3. ANOVAS entre Rrs e estações do ano (Tabela 4) para a sub-área 3, resultaram em diferenças significativas para os comprimentos de onda entre 443 e 678 nm. Para as demais sub-áreas, ocorreu diferença significativa apenas para 748 nm da sub-área 1. A análise ANOVA agrupou todas as imagens de uma mesma estação do ano entre os 4 anos de estudo, e a não observação de diferenças significativas pode estar atribuída à variabilidade interestações entre o período de estudo. A sazonalidade não foi utilizada como um fator adicional na segunda ANOVA, devido à ausência de imagens para o verão e outono de 2002.

Tabela 4 Valor de p obtido pela análise ANOVA aplicada aos dados de Rrs utilizando a sazonalidade como fator de agrupamento. As colunas aos 8 comprimentos de onda.

	412	443	488	531	547	667	678	748
1	0,83	0,98	0,95	0,77	0,57	0,10	0,12	0,03
2	0,55	0,31	0,11	0,13	0,11	0,97	0,96	0,63
3	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
4	0,54	0,63	0,35	0,29	0,25	0,11	0,14	0,15

O coeficiente de absorção do fitoplâncton apresenta maior contribuição para o coeficiente de absorção total nos comprimentos de onda entre 443 e 547 nm, e um novo diagrama de Hovmoller foi feito para esse intervalo (Figura 4). Os valores absolutos de reflectância tendem a aumentar linearmente entre 412 e 531 nm para todas as áreas, um indicativo de águas de composição mista, com interação da comunidade fitoplanctônica, CDOM e sedimentos. O diagrama utiliza valores medianos de Rrs, e não foi possível distinguir os espectros de floração do fitoplâncton dos espectros de domínio misto.

Os diagramas de Hovmoller para os valores medianos de CHL-a, FLH e SST (Figura 5), indicam maiores valores para CHL-a e SST durante períodos de primavera e verão, exceto para a CHL-a para a sub-área 4 (estuário), que apresentou um pico de concentração durante o inverno de 2003. A FLH, apresenta maiores valores na sub-área 4, principalmente durante a primavera e verão dos anos de El Niño.

Figura 5 Hovmoller de clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), linha de linha de altura de fluorescência e temperatura superficial do oceano ($^{\circ}\text{C}$) para as áreas de estudo. o eixo x se refere a cada imagem diária agrupada cronologicamente e o eixo y se refere às 4 áreas de estudo ao longo do eixo norte-sul. A matriz de cores no fim da tabela se refere às estações do ano.

A série temporal em resolução diária dos dados de precipitação mostra uma marcada variação temporal, com maiores valores durante o verão (Figura 6), bem como uma maior variação entre máximos e mínimos na magnitude durante os anos de El Niño. A precipitação anual acumulada, foi de 10165, 9260, 9174 e 9684 (kg/m^2) para os quatro anos de estudo, com um máximo de precipitação no primeiro ano de El Niño, e um mínimo no primeiro ano de La Niña. Apesar da diferença na resolução temporal entre as taxas de precipitação e as imagens de satélite disponíveis, nota-se que a relação entre as taxas de precipitação e $R_{rs}(412)$ tende a ser inversamente proporcional, devido à alta absorção de luz pela CDOM nessa faixa espectral (BRICAUD, 1981).

Figura 6 Distribuição da magnitude de Rrs(412) em barras e precipitação (kg/m^{-3}) em linha ao longo do tempo para as 4 áreas de estudo.

5.1.3 Relação entre os produtos de sensoriamento remoto e dados

in situ

Apesar de geralmente esperada para regiões costeiras, não foi encontrada correlação significativa inversa com a_{dg} ou bb e salinidade no nosso estudo. Deve-se levar em conta que foi comparado um único ponto *in situ* com um quadrado de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ de latitude e longitude de dados de sensoriamento remoto, e que a ausência de correlação significativa, pode estar atribuída a este fator. Uma tendência inversamente proporcional foi verificada com i-CDOM, apesar de não significativa (Figura 7).

Figura 7 Gráfico de dispersão entre i-CDOM de sensoriamento remoto e salinidade medida *in situ* para um único ponto da Lagoa dos Patos.

A comparação entre os valores de CHL-a estimados remotamente com os medidos *in situ* (Figura 8a), mostra superestimativas das primeiras na maior parte dos casos. A mesma comparação entre os dados agrupados por estação do ano mostra concordância durante a primavera, outono e inverno, apesar de interceptos positivos entre 3 e 4 mg.m^{-3} , e nenhuma relação foi observada para o verão. Por outro lado, nenhuma correlação entre os valores de altura da linha de fluorescência e a concentração de clorofila-a medida *in situ* foi verificada, nem mesmo com os dados agrupados por estação (Figura 8b).

Figura 8 Gráfico de dispersão entre os valores medianos por estação do ano de clorofila-a medida ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) *in situ* e clorofila-a de sensoriamento remoto para a área 4 (a) e entre a clorofila-a sazonal medida *in situ* e a linha de altura da fluorescência medida por sensoriamento remoto para a área 4 (b).

5.2 Relação entre a reflectância da Lagoa dos Patos e as variáveis ambientais

5.2.1 Distribuição sazonal das variáveis

Um claro padrão sazonal foi observado para temperatura e a concentração de clorofila-a medidas por sensoriamento remoto. Apesar do mesmo não ter sido verificado para i-CDOM, esse produto variou

significativamente entre os anos de El Niño e La Niña (Figura 9, Tabelas 5 a 10).

Figura 9 Comportamento sazonal (anual e sazonal) da clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) dos sensor MODIS para as quatro áreas de estudo e para uma medida in situ no estuário, da temperatura superficial do oceano ($^{\circ}\text{C}$) e i-CDOM (sem unidade). A linha preta indica a divisão entre anos de El Niño e La Niña. O valor de 1 a 4 se refere as 4 sub-áreas de estudo.

Na sub-área 1, houve um pequeno aumento no valor médio de clorofila-a e SST quando comparamos os anos de 2002-2003 e 2004-2005, enquanto que, para as demais sub-áreas, houve uma diminuição nos valores médios. Já para o i-CDOM, observou-se um aumento no ano de 2002 para o ano de 2003, e posterior diminuição em todas as áreas.

Não foram encontradas correlações significativas entre os dados in situ de CHL-a, SST e salinidade e as magnitudes de Rrs obtidas por sensoriamento remoto, ou com a razão entre os diferentes comprimentos de onda normalmente utilizados para estimativas de produtos bio-óticos. Deve-se levar

em conta que a análise de correlação utilizou valores sazonais médios, além de um único ponto *in situ* (com distribuição mensal), dificultando o estabelecimento de uma relação clara entre as medidas de sensoriamento remoto e *in situ*.

Tabela 5 Valor mediano e desvio padrão da concentração de clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Chl se refere ao produto e 1 a 4 se refere à sub-área.

	Chl1	Chl2	Chl3	Chl4
2002	8.5 ± 1.1	7.7 ± 0.9	7.1 ± 1.0	7.2 ± 1.8
2003	8.6 ± 1.8	7.3 ± 1.1	6.6 ± 1.3	6.5 ± 1.3
2004	9.27 ± 1.9	6.7 ± 1.3	6.3 ± 1.6	6.3 ± 1.6
2005	8.5 ± 2.0	6.8 ± 1.6	6.2 ± 1.9	6.8 ± 2.2

Tabela 6 Valor mediano e desvio padrão da concentração de clorofila-a ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Chl se refere ao produto e 1 a 4 se refere à sub-área.

	Chl1	Chl2	Chl3	Chl4
Inverno	7.2 ± 1.0	6.6 ± 0.9	6.3 ± 0.9	7.0 ± 1.2
Primavera	9.2 ± 1.2	8.2 ± 0.9	7.4 ± 1.2	7.2 ± 2.0
Verão	9.3 ± 2.4	7.6 ± 1.0	6.9 ± 1.4	6.6 ± 2.4
Outono	8.4 ± 2.5	7.2 ± 1.3	6.9 ± 1.4	6.8 ± 2.5
Inverno	7.3 ± 1.4	6.3 ± 0.8	6.0 ± 0.9	6.4 ± 2.1
Primavera	9.4 ± 1.0	8.1 ± 1.1	6.8 ± 1.4	6.4 ± 1.5
Verão	10.7 ± 2.2	7.6 ± 1.0	7.0 ± 1.3	7.0 ± 1.9
Outono	10.1 ± 1.7	7.5 ± 1.6	7.7 ± 2.3	7.2 ± 2.5
Inverno	7.9 ± 1.7	6.0 ± 1.2	5.8 ± 1.5	6.0 ± 1.8
Primavera	10.2 ± 2.2	6.7 ± 1.4	5.8 ± 1.2	5.7 ± 1.5
Verão	8.5 ± 2.1	6.9 ± 1.6	6.5 ± 1.7	7.0 ± 2.6
Outono	8.9 ± 2.2	7.3 ± 1.9	6.2 ± 2.1	6.25 ± 2.7
Inverno	6.2 ± 1.9	5.1 ± 1.7	5.4 ± 2.1	6.3 ± 2.3
Primavera	10.3 ± 1.9	7.4 ± 1.0	6.3 ± 1.9	7.0 ± 1.4

Tabela 7 Valor mediano de temperatura superficial do oceano (°C) e desvio padrão. SST se refere ao produto e 1 a 4 se refere à sub-área.

	SST1	SST2	SST3	SST4
2002	21.2 ⁺ ₋ 0.9	20.1 ⁺ ₋ 0.7	19.9 ⁺ ₋ 0.9	20.0 ⁺ ₋ 1
2003	21.4 ⁺ ₋ 0.6	21.1 ⁺ ₋ 0.6	20.6 ⁺ ₋ 0.7	20.4 ⁺ ₋ 0.7
2004	19.4 ⁺ ₋ 0.6	19.2 ⁺ ₋ 0.5	18.8 ⁺ ₋ 0.6	18.8 ⁺ ₋ 0.8
2005	22.3 ⁺ ₋ 0.5	21.8 ⁺ ₋ 0.6	21.7 ⁺ ₋ 0.6	21.6 ⁺ ₋ 0.8

Tabela 8 Valor mediano de temperatura superficial do oceano (°C) e desvio padrão. SST se refere ao produto e 1 a 4 se refere à sub-área.

	SST1	SST2	SST3	SST4
Inverno	17.2 ⁺ ₋ 0.6	16.2 ⁺ ₋ 0.5	15.9 ⁺ ₋ 0.7	16.7 ⁺ ₋ 0.8
Primavera	23.0 ⁺ ₋ 0.5	22.6 ⁺ ₋ 0.8	22.0 ⁺ ₋ 1	21.2 ⁺ ₋ 0.9
Verão	27.1 ⁺ ₋ 0.8	26.7 ⁺ ₋ 0.7	25.9 ⁺ ₋ 0.9	24.9 ⁺ ₋ 1.0
Outono	21.0 ⁺ ₋ 0.7	20.3 ⁺ ₋ 0.6	20.2 ⁺ ₋ 0.7	20.2 ⁺ ₋ 0.7
Inverno	26.0 ⁺ ₋ 0.6	15.7 ⁺ ₋ 0.6	14.8 ⁺ ₋ 0.7	14.7 ⁺ ₋ 0.7
Primavera	21.9 ⁺ ₋ 0.5	21.9 ⁺ ₋ 0.5	21.4 ⁺ ₋ 0.6	21.2 ⁺ ₋ 0.6
Verão	25.0 ⁺ ₋ 0.4	24.4 ⁺ ₋ 0.3	23.9 ⁺ ₋ 0.3	22.9 ⁺ ₋ 0.6
Outono	20.5 ⁺ ₋ 0.5	20.0 ⁺ ₋ 0.5	20.0 ⁺ ₋ 0.5	20.0 ⁺ ₋ 0.7
Inverno	16.4 ⁺ ₋ 0.6	16.0 ⁺ ₋ 0.5	15.6 ⁺ ₋ 0.5	15.6 ⁺ ₋ 0.6
Primavera	20.7 ⁺ ₋ 0.5	20.9 ⁺ ₋ 0.7	20.8 ⁺ ₋ 0.8	20.4 ⁺ ₋ 1.0
Verão	26.4 ⁺ ₋ 0.5	26.0 ⁺ ₋ 0.6	26.0 ⁺ ₋ 0.6	26.0 ⁺ ₋ 1.0
Outono	20.5 ⁺ ₋ 0.5	20.0 ⁺ ₋ 0.3	19.6 ⁺ ₋ 0.5	19.5 ⁺ ₋ 0.5
Inverno	16.9 ⁺ ₋ 0.9	16.2 ⁺ ₋ 0.6	16.1 ⁺ ₋ 0.8	15.8 ⁺ ₋ 0.8
Primavera	21.7 ⁺ ₋ 0.5	21.5 ⁺ ₋ 0.7	21.5 ⁺ ₋ 0.7	21.2 ⁺ ₋ 0.8

Tabela 9 Valor mediano de índice de CDOM (Sem unidade)e desvio padrão. CDOM se refere ao produto e 1 a 4 se refere à sub-área.

	CDOM1	CDOM2	CDOM3	CDOM4
2002	6.5 ⁺ ₋ 1.6	6.2 ⁺ ₋ 1.2	5.3 ⁺ ₋ 1.1	6.7 ⁺ ₋ 1.3
2003	6.8 ⁺ ₋ 1.9	7.3 ⁺ ₋ 1.5	6.7 ⁺ ₋ 1.6	6.0 ⁺ ₋ 1.8
2004	6.1 ⁺ ₋ 1.8	6.3 ⁺ ₋ 1.6	6.0 ⁺ ₋ 1.7	6.2 ⁺ ₋ 1.6
2005	5.8 ⁺ ₋ 1.9	5.7 ⁺ ₋ 1.6	5.6 ⁺ ₋ 1.8	5.3 ⁺ ₋ 1.5

Tabela 10 Valor mediano de índice de CDOM (Sem unidade)e desvio padrão. CDOM se refere ao produto e 1 a 4 se refere à sub-área.

	CDOM1	CDOM2	CDOM3	CDOM4
Inverno	5.4 ⁺ ₋ 1.4	6.3 ⁺ ₋ 1.4	3.8 ⁺ ₋ 1.0	6.2 ⁺ ₋ 0
Primavera	8.0 ⁺ ₋ 1.7	6.1 ⁺ ₋ 0.9	7.1 ⁺ ₋ 1.5	7.0 ⁺ ₋ 2.2
Verão	6.5 ⁺ ₋ 1.9	7.7 ⁺ ₋ 1.7	6.5 ⁺ ₋ 2.0	5.4 ⁺ ₋ 1.4
Outono	6.2 ⁺ ₋ 2.3	7.0 ⁺ ₋ 1.6	7.0 ⁺ ₋ 1.6	6.5 ⁺ ₋ 2.3
Inverno	7.0 ⁺ ₋ 1.6	7.5 ⁺ ₋ 1.6	5.8 ⁺ ₋ 1.9	6.0 ⁺ ₋ 1.9
Primavera	8.1 ⁺ ₋ 0.5	6.7 ⁺ ₋ 1.0	7.5 ⁺ ₋ 1.0	5.9 ⁺ ₋ 1.6
Verão	5.4 ⁺ ₋ 2.2	8.0 ⁺ ₋ 1.9	4.7 ⁺ ₋ 1.1	7.1 ⁺ ₋ 1.2
Outono	5.4 ⁺ ₋ 1.5	5.0 ⁺ ₋ 1.5	5.7 ⁺ ₋ 1.7	4.5 ⁺ ₋ 2.1
Inverno	6.4 ⁺ ₋ 1.9	6.2 ⁺ ₋ 1.6	5.8 ⁺ ₋ 2.0	6.3 ⁺ ₋ 1.3
Primavera	6.3 ⁺ ₋ 1.8	6.9 ⁺ ₋ 1.7	6.5 ⁺ ₋ 1.3	6.5 ⁺ ₋ 2.1
Verão	5.9 ⁺ ₋ 2.0	5.7 ⁺ ₋ 1.8	5.7 ⁺ ₋ 2.1	6.2 ⁺ ₋ 1.6
Outono	6.1 ⁺ ₋ 1.9	6.0 ⁺ ₋ 1.7	6.2 ⁺ ₋ 2.1	4.8 ⁺ ₋ 1.0
Inverno	4.6 ⁺ ₋ 1.6	4.7 ⁺ ₋ 1.5	4.7 ⁺ ₋ 1.5	4.8 ⁺ ₋ 1.8
Primavera	7.7 ⁺ ₋ 1.6	6.9 ⁺ ₋ 1.3	6.2 ⁺ ₋ 1.5	5.3 ⁺ ₋ 1.7

5.2.2 Análises de correlação entre as variáveis

Na sub-área 1, observou-se correlação significativa entre a precipitação e Rrs para a maior parte dos comprimentos de onda, enquanto a Rrs em 667 nm e nos maiores comprimentos de onda se correlacionaram significativamente com a componente de velocidade do vento leste oeste (u). As magnitudes de Rrs entre 488 e 547 nm apresentaram correlação significativa com a componente de velocidade do vento norte sul (v). As correlações foram significativas entre precipitação, CHL-a e Rrs em 412, 443, 488, 748 e 869 nm com um tempo de resposta de 4 dia. Para a componente u do vento, esse atraso ocorreu em 4 dias para a Rrs em comprimentos de onda maiores que 667 nm e em 5 dias para menores que 488 nm, assim como para CHL-a. Para a componente v do vento, correlação significativa só foi observada com um atraso de 5 dias para os Rrs menores de 531 nm e CHL-a (Tabela 11).

Na sub-área 2, valores de Rrs em 412, 667 678 e 748 nm apresentaram correlação significativa com a precipitação, enquanto Rrs maiores que para 667 nm se correlacionaram significativamente com ambas as componentes do vento. Para a sub-área 2, as análises de correlação com atrasos não foram significativas (Tabela 12).

Nas sub-áreas 3 e 4, não foram verificadas correlações significativas entre as componentes u e v do vento e as demais variáveis. Na sub-área 3, observou-se correlação significativa entre a precipitação e valores de Rrs para acima de 667 nm com 3 dias de atraso, e entre as componentes u e v do vento com CHL-a e Rrs entre 488 e 678 nm com 5 dias de atraso. Na sub-área 4, correlação significativa foi constatada entre a precipitação com um atraso de 1

e 2 dias e a CHL-a e com as componentes u e v do vento, e com 4 dias para a precipitação, Rrs(531) e Rrs(547) (Tabela 13 e 14).

Tabela 11 Valor de p significativos ($p < 0.05$) para o teste de correlação entre as variáveis ambientais (pre equivale a precipitação; uwin e wwin equivalem as componentes u e v da velocidade do vento e a numeração se refere aos 4 pontos obtidos em volta da LP) e os produtos remotos (Rrs(412) a Rrs(869), CHL-a, CDOM, SST e FLH), da sub-área 1. Células vazias correspondem a valores de p não significativos ($p > 0.05$).

	Pre1	Pre2	Pre3	Pre4	Uwin1	Uwin2	Uwin3	Uwin4	Vwin1	Vwin2	Vwin3	Vwin4
412	0,01	0,01	0,01	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
443	0,03	0,01	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
488	-	0,04	-	0,04	-	-	0,05	-	0,03	0,02	0,02	0,01
531	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,03	0,01	0,02	0,00
547	-	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,02	0,03	0,01
667	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,01	-	0,03	-	-	-	-
678	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,01	-	0,05	-	-	-	-
748	0,00	0,01	0,00	0,00	-	0,01	-	-	-	-	-	-
869	0,00	0,01	0,00	0,00	-	0,01	-	-	-	-	-	-
CHL-a	-	-	-	-	-	-	0,03		-	-	-	-
SST	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CDOM	0,02	0,02	0,01	0,02	-	-	0,05	-	0,04	-	-	-
FLH	-	-	0,05	-	-	-	-	-	0,04	0,00	0,04	0,00

Tabela 12 Valor de p significativos ($p < 0.05$) para o teste de correlação entre as variáveis ambientais (pre equivale a precipitação; uwin e wwin equivalem as componentes u e v da velocidade do vento e a numeração se refere aos 4 pontos obtidos em volta da LP) e os produtos remotos (Rrs(412) a Rrs(869), CHL-a, CDOM, SST e FLH), da sub-área 2. Células vazias correspondem a valores de p não significativos ($p > 0.05$).

[illegible]

Tabela 13 Valor de p significativos ($p < 0.05$) para o teste de correlação entre as variáveis ambientais (pre equivale a precipitação; uwin e wwin equivalem as componentes u e v da velocidade do vento e a numeração se refere aos 4 pontos obtidos em volta da LP) e os produtos remotos (Rrs(412) a Rrs(869), CHL-a, CDOM, SST e FLH), da sub-área 3. Células vazias correspondem a valores de p não significativos ($p > 0.05$).

	Pre1	Pre2	Pre3	Pre4	Uwin1	Uwin2	Uwin3	Uwin4	Vwin1	Vwin2	Vwin3	Vwin4
412	0,01	0,04	0,01	-	0,05	-	-	-	-	-	-	-
443	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
488	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
531	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
547	-	0,05	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
667	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
678	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
748	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
869	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
CHL-a	0,00	0,01	0,01	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
SST	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CDOM	-	0,02	-	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-
FLH	0,00	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 14 Valor de p significativos ($p < 0.05$) para o teste de correlação entre as variáveis ambientais (pre equivale a precipitação; uwin e wwin equivalem as componentes u e v da velocidade do vento e a numeração se refere aos 4 pontos obtidos em volta da LP) e os produtos remotos (Rrs(412) a Rrs(869), CHL-a, CDOM, SST e FLH), da sub-área 1. Células vazias correspondem a valores de p não significativos. FLH), da sub-área 4. Células vazias correspondem a valores de p não significativos ($p > 0.05$).

	Pre1	Pre2	Pre3	Pre4	Uwin1	Uwin2	Uwin3	Uwin4	Vwin1	Vwin2	Vwin3	Vwin4
412	-	0,05	-	0,04	-	-	-	-	-	-	-	-
443	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
488	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
531	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
547	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
667	0,00	0,02	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
678	0,00	0,02	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-
748	0,01	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
869	0,01	-	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-	-	-
CHL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SST	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CDOM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FLH	0,04	0,05	0,02	0,01	-	-	-	-	-	0,02	-	0,04

5.3 Comportamento espectral da reflectância ao longo do tempo e espaço durante florações do fitoplâncton

De maneira simples, é possível relacionar o espectro da reflectância do sensoriamento remoto a águas com alta concentração de constituintes óticos ativos, através de dois grupos de comportamento espectral (KUTSER *et al.*, 2006). Águas de domínio misto, ou seja, nas quais todos os componentes óticamente ativos contribuem de forma importante para o valor de reflectância de sensoriamento remoto, em geral apresentam um máximo de Rrs em 547 nm. Já águas dominadas por CDOM e sedimentos em geral apresentam picos de Rrs deslocados em direção aos comprimentos de onda maiores e um espectro em forma de platô entre 547 e 678 nm. Outra feição que pode ser notável é o formato de vale entre 412 e 531 nm para águas dominadas por fitoplâncton (SISWANTO, 2013).

Os espectros de Rrs, medianos por sub-área, medidos pelo sensor MODIS/Aqua em nossa região de estudo foram separados em 4 grupos pela análise de agrupamento (Figura 10). A figura 10 representa a distribuição dos espectros medianos de Rrs para os 4 grupos encontrados. Uma feição distinta é verificada para o terceiro grupo, com a presença de um platô entre 547 e 678 nm, o que sugere uma massa de água dominada por CDOM e sedimentos (KUTSER *et al.*, 2006). Para os demais grupos, notamos um aumento linear da magnitude de Rrs entre 412 nm e 547 nm, e uma diminuição até 748 nm, o que indica águas mistas. Outra informação obtida se refere à distribuição espacial dos 4 grupos presentes. O primeiro e o quarto grupo possuem um maior número de espectros medianos de Rrs originados da sub-área 4 (34 de 91 e 32

de 75 respectivamente), enquanto que os grupos 2 e 3, possuem um maior número de espectros medianos de Rrs originados da sub-área 1 (31 de 75 e 47 de 104 respectivamente). Como antecipado para a área 1, o formato de platô indentificado para o grupo 3 se deve a maior concentração de CDOM.

Devido a impossibilidade de discriminar florações de fitoplâncton utilizando um valor mínimo de clorofila-a, uma proposta alternativa foi testada, selecionando os espectros medianos de Rrs por área foram computados de acordo com um valor mínimo de FLH. Os valores mínimos de FLH foram selecionados entre 0.01 e 0.15, mas não foi possível remover os pixels com influência de CDOM/sedimentos, resultando em espectros medianos de Rrs semelhantes aos computados de acordo com valor mínimo estipulado de CHL-a. As figuras 11 e 12 correspondem aos espectros médios por sub-área que possuem um valor mínimo 0.10 e 0.15 em FLH. Assim como a CHL-a, a FLH pode ser utilizada como uma medida auxiliar para a classificação dos espectros de reflectância.

Figura 10 Comportamento espectral para o sensor MODIS desenvolvido a partir dos quatro grandes grupos formados na análise de agrupamento, com a distribuição espacial do espectro

no canto inferior direito. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs.

Figura 11 Comportamento espectral para o sensor MODIS para as quatro áreas de estudo, utilizando como critério de seleção o valor mínimo de 0.1 para FLH. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Figura 12 Comportamento espectral para o sensor MODIS para as quatro áreas de estudo, utilizando como critério de seleção o valor mínimo de 0.15 para FLH. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

As figuras 13 e 16 correspondem à distribuição dos espectros de Rrs por área para os sensores MODIS/Aqua e SeaWiFS (respectivamente); as figuras 14 e 17 correspondem aos espectros separados por análise de agrupamento; a figura 15 mostra a segunda derivada de Rrs para o sensor MODIS/Aqua e as figuras 18 e 19 ilustram a distribuição espaço/temporal dos pixels utilizados para o desenvolvimento do modelo de classificação.

Na distribuição do espectro médio de Rrs por sub-área (figuras 13 e 16), os dois sensores são semelhantes. O sensor MODIS apresenta um número maior de pixels válidos, provavelmente devido à quantidade de imagens utilizadas; também podemos verificar que o sensor SeaWiFS não apresenta pixels para a região 2. Quanto aos espectros de Rrs, há uma variação no formato para uma mesma área de estudo, além de uma variação ao longo do espaço. Nas figuras 14 e 17, o enfoque é a identificação de assinaturas espectrais e não a distribuição espacial.

Figura 13 Distribuição espacial dos pixels caracterizados como formato em vale entre 412 e 531 nm para as imagens MODIS. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Figura 14 Distribuição dos espectros do sensor MODIS agrupados em função da análise de agrupamento (1 a 10). 11 corresponde ao valor médio por sub grupo e a 12 se refere ao dendrograma resultante. O eixo x corresponde aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Figura 15 Distribuição da segunda derivada dos espectros interpolados linearmente do sensor MODIS agrupados em função da análise de agrupamento. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor da segunda derivada do valor de Rrs.

Figura 16 Distribuição espacial dos pixels caracterizados como formato em vale entre 412 e 531 nm para as imagens SeaWiFS. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531) para as 4 áreas de estudo. A ausência de espectros para a área 2 se refere à ausência de pixels para essa sub-área de estudo.

Figura 17 Distribuição dos espectros do sensor SeaWiFS agrupados em função da análise de agrupamento (1 a 10). A 11 figura se refere ao valor médio por sub grupo e a 12 se refere ao dendrograma resultante. O eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Os espectros de Rrs observados pelo sensor MODIS/Aqua, mostram dois grupos distintos (Figura 14). O primeiro grande grupo se refere a águas

com influência de sedimentos (grupos 1, 2, 3, 5, e 9), com a formação de um platô entre 547 e 667 nm; o segundo grande grupo indica florações de fitoplâncton, sendo esta subdividida em 3 sub grupos. O primeiro sub grupo se refere aos grupos 4 e 7 e 8, onde é possível notar um vale entre 412 e 547 nm, assim como um rápido declínio em direção a 667 nm, assumido aqui como florações de diatomáceas em águas ricas em CDOM e sedimentos. Já para o segundo sub grupo (6), notamos um formato em vale mais achatado, e menor diferença do valor absoluto entre 412 e 547 nm, que assumiremos aqui ser atribuído à presença de maiores concentrações de cianobactérias. No terceiro e último sub grupo (10), existe um vale claro, mas o seu comportamento espectral é semelhante ao de águas com menores concentrações de partículas e influencia de CDOM, assumido aqui como florações de diatomáceas nessas condições. Para os dados do sensor SeaWiFS, foi possível notar assinaturas que indicam a presença de florações de diatomáceas nas Rrs medidas (Figura 17).

A segunda derivada das assinaturas espectrais (Figura 15), mostra que para a assinatura assumida como cianobactérias, os valores em 443, 531 e 547 nm possuem uma magnitude semelhante, enquanto que para as assinaturas assumidas como diatomáceas, a magnitude em 547 nm é maior que em 531 nm, e a magnitude em 443 é elevada, representando as diferenças na curvatura do espectro de Rrs, e um formato mais achatado para cianobactérias.

Existe uma grande variação da distribuição dos pixels classificados como floração ao longo da LP (Figura 18 e 19), com maior concentração na terceira área de estudo, principalmente durante o ano de 2005 para as imagens

MODIS/Aqua, e para 2004 e 2005 para as imagens SeaWiFS, com a ausência de pixels para a sub-área 2 do sensor SeaWiFS.

Figura 18 Distribuição espaço/temporal dos pixels válidos para o sensor MODIS utilizados durante a análise de agrupamento.

Figura 19 Distribuição espaço/temporal dos pixels válidos para o sensor SeaWiFS utilizados durante a análise de agrupamento.

Para a análise das assinaturas assumidas como florações de diatomáceas e cianobactérias, a figura 20 mostra o espectro médio por assinatura de floração para o sensor Modis/Aqua, e a diferença no formato em vale entre 412 e 547 nm de Rrs fica evidente.

Figura 20 Comportamento espectral médio para grupos classificados pelo dendrograma. Diatomáceas em vermelho e cianobactérias em azul. O eixo x corresponde aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Identificamos uma assinatura espectral adicional, sugestiva de alta concentração de CDOM e sedimentos (Terceiro grupo de espectros do sensor MODIS, Figura 10) e notamos uma quinta assinatura espectral, referente a águas mistas, com presença de fitoplâncton, CDOM e sedimentos em conjunto (Grupos de espectro 1, 2 e 4 do sensor MODIS, Figura 10). Devido à alta turbidez das águas da área de estudo, não foi possível detectar uma assinatura espectral para águas sem o domínio de fitoplâncton, CDOM ou sedimentos. Para identificar esta assinatura, a área costeira foi incorporada na análise. Verificamos se o espectro de Rrs dessa sexta assinatura condiz com águas com baixa concentração de CHL-a e CDM, através da comparação com os espectros propostos por MOREL (2001). Nota-se a semelhança entre a

assinatura espectral assumida e o espectro de reflectância em baixas concentrações de CHL-a (Figura 21). As seis assinaturas espectrais em Rrs podem ser observadas na figura 22.

Figura 21 Espectro de reflectância de sensoriamento remoto para águas ao longo do visível. Os espectros de clorofila-a entre 0.03 e 10 foram propostos em Morel (2001) e o espectro medido corresponde ao valor médio dos pixels caracterizados com baixa concentração dos demais componentes óticos. Comprimentos de onda em nanômetros em x, $\log_{10}(Eu/Ed)$ no eixo y e para os espectros modelados e em Rrs normalizada em Rrs(531) para os valores medidos.

Figura 22 Assinaturas para a região de estudo. Na primeira coluna estão representadas a água com baixa concentração de CDOM e partículas, mista e dominada por CDOM/sedimento respectivamente, e na segunda coluna estão representadas florações de cianobactérias, diatomáceas de água doce e diatomáceas de água salgada respectivamente. O

eixo x se refere aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Através da figura 22 podemos verificar que existe uma grande variação na inclinação da curva entre 412 e 547 nm, e para evidenciar essa diferença, a figura 23 mostra o espectro médio por assinatura identificada. Identificamos 3 feições: a) formato de vale para espectros referentes a florações de fitoplâncton, b) inclinação negativa para espectros com baixa concentração dos demais componentes óticos e c) inclinação positiva para espectros onde diferentes componentes óticos controlam o espectro de Rrs. Baseado nas feições evidenciadas, o trabalho buscou uma forma de identificar essas diferenças através de valores de Rrs para comprimentos de onda específicos, relacionando informações bio-ólicas, referentes a inclinação para espécies de fitoplâncton de diferente tamanho (CIOTTI, *et al.*, 2002) e a_{dg} , com os valores observados para medidas de sensoriamento remoto, propondo um modelo de classificação.

Para classificar as assinaturas espectrais assumidas, foi proposto usar a razão entre $nRrs_{547-443}$ e $nRrs_{488-412}$, e a distribuição dos pixels selecionados pode ser visto na figura 24. O modelo de classificação utilizou as razões entre bandas propostas, com os intervalos de variação baseados na distribuição dos pixels:

- Água com baixa concentração de CDOM e partículas: $nRrs_{547-443} < -0.2$ e $nRrs_{488-412} < -0.1$.
- Água com domínio misto: $0.4 < nRrs_{547-443} < -0.65$ e $0.2 < nRrs_{488-412} < 0.5$.
- Água com alta concentração de CDOM e partículas: $0.65 < nRrs_{547-443}$ e $0.45 < nRrs_{488-412}$.

- Água com floração de diatomáceas 1 (alta concentração de partículas e CDOM): $0.35 < nRrs_{547-443}$ e $nRrs_{488-412} < 0.2$.
- Água com floração de diatomáceas 2 (baixa concentração de partículas e CDOM): $-0.2 < nRrs_{547-443} < 0.35$ e $-0.4 < nRrs_{488-412} < 0.1$.
- Água com floração de cianobactérias: $-0.1 < nRrs_{547-443} < 0.2$ e $-0.1 < nRrs_{488-412} < 0.1$.

Figura 23 Comportamento espectral médio para as assinaturas classificadas pelo dendrograma. Florações de fitoplâncton em verde, águas com alta concentração de CDOM/Sedimentos e/ou fitoplâncton em vermelho e águas com baixa concentração dos demais componentes óticos em azul. O eixo x corresponde aos comprimentos de onda em nanômetros e o eixo y se refere ao valor normalizado de Rrs em Rrs(531).

Figura 24 Distribuição dos pixels válidos para o sensor MODIS em função do seu formato. O eixo x corresponde à diferença do valor normalizado de Rrs entre 547 e 443 nm (sem unidade), o eixo y corresponde à diferença do valor normalizado de Rrs entre 488 e 412 nm (sem unidade) e o eixo z se refere ao valor normalizado em 547 nm (sem unidade).

O modelo de classificação desenvolvido foi aplicado a 2 imagens do sensor MODIS/Aqua (Figura 25 e 26 respectivamente), a todo o conjunto de imagens do sensor (Figura 27) e para a produção de um mapa com a distribuição acumulada para florações de fitoplâncton (Figura 28). O modelo de classificação identificou indícios de florações de diatomáceas e cianobactérias ao longo do tempo, com florações de diatomáceas nas regiões 1, 2 e 4 durante a primavera e verão, e cianobactérias durante o outono e inverno (com a presença de uma floração durante a primavera de 2003 para a área 4).

Figura 25 Mapas de distribuição dos pixels utilizados pelo modelo de classificação para o dia 7 de Julho de 2004. Razão 547 – 488 e 531-443 à esquerda, e valor de Rrs em 547 e mapa de distribuição das massas de água a direita. 1 Corresponde a águas com baixa concentração de CDOM/Partículas, 2 a águas mistas, 3 a águas dominadas por CDOM/Partículas, 4 a cianobactérias, 5 a diatomáceas em águas com alta concentração de CDOM e sedimentos e 6 a diatomáceas com baixa concentração de CDOM e sedimentos.

Figura 26 Mapas de distribuição dos pixels utilizados pelo modelo de classificação para o dia 27 de Fevereiro de 2005. Razão 547 – 488 e 531-443 à esquerda, e valor de Rrs em 547 e mapa de distribuição das massas de água a direita. 1 Corresponde a águas com baixa concentração de CDOM/Partículas, 2 a águas mistas, 3 a águas dominadas por CDOM/Partículas, 4 a cianobactérias, 5 a diatomáceas em águas com alta concentração de CDOM e sedimentos e 6 a diatomáceas com baixa concentração de CDOM e sedimentos.

Figura 27 Distribuição da percentagem acumulada (0 a 1) dos pixels classificados pelo modelo de classificação para todas as imagens disponíveis do sensor MODIS/Aqua. O eixo x corresponde as 100 imagens analisadas e o eixo y corresponde à distribuição da percentagem dos pixels classificados em 7 categoria. Os círculos evidenciam as florações identificadas.

Figura 28 Distribuição acumulada das floração de cianobactérias (4), diatomáceas 1(5) e diatomáceas 2 (6) para todo o conjunto de imagens.

6. Discussão

6.1. *Reflectância de sensoriamento remoto ao longo da Lagoa dos Patos*

Em lagunas costeiras, a entrada de nutrientes através da atmosfera, rios, trocas com sedimentos, escoamento terrestre direto e lençol freático (NIXON, 1982; NIENCHESKI & WINDOM, 1994; ATTISANO *et al.*, 2008), lençol freático influencia na biomassa e grupos dominantes do fitoplâncton (KNOPPERS, 1994). Por estarem situadas entre ambientes marinhos e de água doce, a salinidade se torna uma das grandes forçantes físicas e biológicas, possuindo grande influência na taxonomia dos grupos fitoplanctônicos.

Na LP o gradiente de salinidade varia em função do regime de ventos e marés, bem como ciclos sazonais marcantes (COSTA, *et al.*, 1988). Independente da época do ano, todavia, um gradiente norte-sul de salinidade ocorrerá, possivelmente acompanhado de variação na taxonomia de fitoplâncton (BRAARUD, 1951). A variabilidade espectral em Rrs explicada pela análise de EOF indica que a forçante responsável pelo primeiro padrão de variação atua de forma semelhante para todos os comprimentos de onda. Para o segundo componente principal da EOF, identificamos diferenças entre as bandas do azul e do verde. Entretanto, ao analisarmos os scores para esse componente principal, identificamos que eles possuem um sinal invertido, de forma que o comportamento de Rrs não varia entre os comprimentos de onda. Temporalmente, identificamos a formação de um ciclo para o primeiro comprimento de onda, com scores semelhantes durante a primavera e verão, e

valores semelhantes e de sinal invertido durante o outono e inverno. Para o segundo componente principal esse padrão pode ser observado, mas não é tão claro.

A EOF de $Rrs(\lambda)$ indica que a variância possui um comportamento semelhante para todos os comprimentos de onda em primeira e segunda ordem, e se deve a outros componentes óticos que não os coeficientes da absorção do fitoplâncton e CDOM (Figura 2). Em ambientes opticamente complexos, a contribuição do coeficiente de retroespalhamento devido aos sedimentos em suspensão é importante (BUKATA *et al*, 1995), e este é o caso na LP (CALLIARI *et al*, 2009). A variabilidade atribuída ao primeiro componente principal da EOF é relevante para a região central da LP, concordando com outros trabalhos que mostram que esta possui uma grande dinâmica na concentração de sedimentos (CALLIARI *et al*, 2009), enquanto que em segunda ordem, existe uma variância atribuída à região ao norte e ao sul, provavelmente devido à entrada de água doce pelo Guaíba e pela entrada de água salgada pelo estuário. Foi identificado que a concentração de sedimentos possui grande influência no espectro de Rrs para a LP, e que esta influência é linear para todos os comprimentos de onda, concordando o que foi assumido previamente a respeito do espectro de retroespalhamento para a LP. Baseado nessa informação pode-se assumir que a variação no formato do espectro de Rrs se deve ao coeficiente de absorção dos componentes óticos, e não devido ao retroespalhamento.

6.2 Variação temporal de produtos de cor do oceano

Na Lagoa dos Patos, ODEBRECHT *et al.*(2010) compararam a variação de salinidade com aquela da concentração de clorofila-a, mostrando um aumento da biomassa fitoplanctônica para a região estuarina em períodos de baixa salinidade (devido a maior pluviosidade), atingindo valores entre 40~90 µg/L de clorofila-a e de 30~80 mm³/L de biomassa durante os anos de 2002-2003 (El Niño), e valores mínimos em anos de La Niña. ODEBRECHT *et al.* (2010) observaram que a diminuição da clorofila-a durante o período de La Niña em 1988, foi coincidente com altas concentrações de amônia e com o aumento geral do tempo de residência da água no estuário. Abreu *et al* (1994) relatam que as taxas de produção primária parecem ser limitadas pela quantidade de irradiância solar, temperatura da água, e pela a concentração de nitrato inorgânico.

Tanto TORGAN *et al.* (2004) como ODEBRECHT *et al.* (2005) ilustram variações da composição do fitoplâncton da Lagoa dos Patos nos anos de 1987 e 1989, durante eventos La Niña, reportando espécies de água doce e salobra entre dezembro e março, ODEBRECHT *et al.* (2005) mostram que a distribuição longitudinal das espécies na LP, registrando diatomáceas na região norte com aumento na concentração de cianobactérias e clorofíceas na região central. Na Tabela 15, mostramos algumas espécies reportadas para a Lagoa dos Patos, enfocando a sua distribuição no eixo norte-sul e características de tamanho e formação de colônias.

Tabela 15 Distribuição dos organismos fitoplanctônicos para a Lagoa dos Patos de acordo com a região, grupo taxonômico e o seu tamanho. Quanto a sua distribuição, N se refere à região Norte, C a região central e S a região Sul.

Gênero ou espécie	Tamanho Organismo	Formação Colônias	Distribuição Lagoa			Referências
Diatomáceas			N	C	S	
<i>Aulacoseira ambigua</i>	5-15µm	x	x			Torgan <i>et al.</i> , 2004
<i>Aulacoseira granulata</i>	4-20µm	x	x	x		
<i>Aulacoseira</i>	8-20µm	x	x			
<i>Aulacoseira nyassensis</i>	20-35µm	x	x			Odebrecht <i>et al.</i> , 2005
<i>Skeletonema costatum</i>	2-21µm	x		x	x	
<i>Skeletonema</i>	<11µm	x		x	x	
<i>Aulacoseira granulata</i>	4-20µm	x	x			
<i>Aulacoseira ambigua</i>	5-15µm	x	x			
<i>Aulacoseira distans</i>	4~20µm	x	x			Bergesch <i>et al.</i> , 1995
<i>Aulacoseira nyassensis</i>	20-35µm	x	x			
<i>Terpsinoe americana</i>	47-48µm	x				
<i>Melosira sp.</i>	6-30µm	x				
<i>Pleurosira laevis</i>	40-55µm	x				
<i>Skeletonema costatum</i>	2-21µm	x				Torgan <i>et al.</i> , 2004
<i>Pseudosolenia calcar avis</i>	12.5-19.8µm	x				
<i>Coscinodiscus sp.</i>	50-550µm					
Criptofíceas						
<i>Rhodomonas minuta</i>	12µm	x		x	x	
Cianobactérias						Torgan <i>et al.</i> , 2004
<i>Planktolyngbya limnetica</i>		x	x	x		
<i>Psephonema aenigmaticum</i>			x	x		
<i>Cyanodictyon</i>	4.5µm	x	x	x	x	
<i>Cyanodictyon Striata</i>		x	x	x	x	
<i>Cyanodictyon Subtilis</i>		x		x		Odebrecht <i>et al.</i> , 2005
<i>Aphanocapsa nubilum</i>	0.5-1µm	x	x	x		
<i>Microcystis aeruginosa</i>	2~3µm	x		x	x	
<i>Microcystis wesenbergii</i>		x	x	x	x	
<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i>	2~2.5µm	x	x	x		
<i>Aphanocapsa nubilum</i>	0.5-1µm	x				
<i>Cyanodiction</i>	4.5µm	x				
<i>Planktolyngbya</i>		x				
<i>Synechocystis aquatilis</i>						

A análise dos produtos de sensoriamento remoto por diagramas de Hovmoller permitiu verificar que os dados variaram tanto no tempo quanto no espaço com um comportamento espacial e sazonal persistente. Identificamos picos independentes entre a região norte e sul ao longo do tempo, além de um gradiente na magnitude ao longo do eixo norte-sul. Foram observados tanto de clorofila-a quanto de reflectância para o período de primavera e verão, concordando com a literatura existente (ODEBRECHT *et al.*, 2010; BERGESCH *et al.*, 1995). Também ficou clara a variação atribuída a anos de El Niño e La Niña (Figuras 3, 4 e 5), com maiores valores de Rrs ao longo do espectro para o primeiro grupo, conforme esperado para a área de estudo e observado pela análise ANOVA (Tabela 2)

Pelos valores de p observado nas análises ANOVAs para as 4 sub-áreas de estudo, o valor de reflectância em 412 nm tem uma maior variação na sub-área 1, provavelmente devido a maior concentração de CDOM. Para as demais sub-áreas, não foi possível identificar uma diferença significativa (Tabela 2). Foram observados valores abaixo de 0.05 para todos os comprimentos de onda da sub-área 1, indicando que a coloração da água é fortemente controlada pelo regime de El Niño e La Niña. Para a sub-área 2, foi possível identificar uma maior variação atribuída aos sedimentos e sua influência na magnitude de reflectâncias maiores que 667 nm. Nas sub-áreas 3 e 4, as diferenças entre os anos El Niño e La Niña foi encontrada em comprimentos de onda mais curtos.

A variabilidade das Rrs na LP foi explicada pela interação entre o fator tempo (em anos) e as sub-áreas (Tabela 3). Observamos que os 2 componentes atuam de forma conjunta para os comprimentos de onda acima de 488 nm,

mas de forma independente para os demais comprimentos de onda, não sendo possível observar uma variação intra anual em 443 nm. Por fim, observamos diferenças significativas na sazonalidade apenas para a sub-área 3 (Tabela 4). Idealmente, o fator sazonal teria sido aplicada em conjunto com o ano e área, mas devido à disponibilidade de imagens por período, não foi possível utilizar a ANOVA em 3 vias.

Baseado nas 3 análises podemos entender que a sazonalidade não controla a CDOM (412 nm), o valor em 443 nm é dependente da sub-área de análise e os demais comprimentos de onda são o resultado da influência todos os fatores abordados, apesar das sub-áreas 2 e 4 não responderem significativamente aos anos de El Niño e La Niña. Apesar de esperado, não foi possível observar diferenças significativas devido à sazonalidade, provavelmente atribuída à variação intra-estação.

Uma feição característica de R_{rs} em águas ricas em CDOM/sedimentos é a formação de um platô entre 531 e 667 nm (KUTSER *et al.*, 2006), e essa feição pode ser notada quando analisamos os diagramas de Hovmöller para todos os comprimentos de onda, principalmente para a região norte, com valores semelhantes entre 531 e 678 nm (Figura 3). Ao longo do eixo norte sul, essa influência vai diminuindo progressivamente, dando lugar a um sinal com um pico em 547 nm e que diminui para os extremos (412 e 748 nm), possuindo um formato característico para águas mistas, causado pela associação de florações fitoplânctônicas, CDOM e sedimentos (SISWANTO *et al.*, 2013), como é esperado para a área de estudo.

Em geral, o formato do espectro de R_{rs} entre os comprimentos de onda de 412 e 547 nm pode ser utilizado como um indicativo da influência do

espectro de absorção dos componentes óticos presentes na água, onde um formato em vale está associado a uma forte absorção pelo fitoplâncton nas bandas do azul; um formato em domo está associado a águas dominadas por CDOM e sedimentos; e um formato linear esta associado a águas mistas (AHN & SHANMUGAM, 2006; SASAKI *et al.*, 2008; TASSAN, 1994). Levando em conta a influência dos componentes óticos ativos no espectro de Rrs, podemos identificar que, em média, o sinal do CDOM é dominante para a região norte, porém, para as demais regiões o espectro corresponde a águas mistas. Levando em conta o formato dos espectros, quando analisamos o diagrama de Hovmoller entre 443 e 531 nm (Figura 5), podemos notar algumas diferenças espaciais, com uma menor variação de magnitude entre 488 e 531 nm para as regiões centrais, enquanto que para a área ao norte, essa amplitude é maior, indicando um espectro mais achatado para as regiões centrais, e mais inclinado para a área norte.

6.3 Relação entre os produtos de sensoriamento remoto e medidas in situ

Produtos de sensoriamento remoto são desenvolvidos assumindo diversos fatores, e isso deve ser levado em conta durante a sua utilização para região de estudo. Apesar do OC2 (ou OC3 e OC4) calcular a concentração de clorofila-a ser, a presença de CDOM e detritos, de origem terrestre, pode atuar nesse cálculo, superestimando os valores encontrados, ou gerando valores característicos de florações fitoplanctônicas, mesmo que não ocorra a floração (SENJYU *et al.*, 2001; MUSTAPHA & LAROUICHE, 2008; LAPUCHI *et*

al.,2012). Um melhor entendimento das características óticas da Lagoa dos Patos pode auxiliar o desenvolvimento de algoritmos regionais ou permitir o uso de produtos de sensoriamento remoto específicos para ambientes lagunares costeiros, resultando em dados mais confiáveis.

A clorofila-a varia ao longo das estações do ano, mas o valor é superestimado para a área de estudo (Figura 8a). Deve se levar em conta que o algoritmo de clorofila-a foi desenvolvido para águas Caso I, e que a relação com os produtos in situ foi feita utilizando um valor mediano para toda a área 4. Apesar disso, o padrão de variação coincide com o descrito pela literatura (ABREU *et al.*, 2010), com máximos durante a primavera/verão, e mínimos durante o outono/inverno.

Os dados de SST do presente trabalho possuem um componente sazonal claro e de acordo com o esperado, e o i-CDOM apresentou valores médios distintos entre os anos de El Niño e La Niña.

6.4 Relação entre a precipitação e componentes u e v da velocidade do vento em relação à reflectância de sensoriamento remoto.

Em ambientes subtropicais, o estudo de VARONA-CORDERO *et al.* (2010) descreve a variação anual da comunidade fitoplanctônica em duas lagunas no México e demonstra que o regime de precipitação (estação seca ou úmida) condiciona a taxonomia dos grupos de organismos observados. Os autores identificaram, durante a estação seca, o domínio de diatomáceas neríticas em ambientes de influência marinha e de dinoflagelados e diatomáceas de água salobra em ambientes de influência de água doce; já

durante a estação chuvosa, houve maior presença de diatomáceas cêntricas sob influência de água salgada e de espécies exclusivas de água doce fora da mesma.

Ao compararmos o regime de pluviosidade e ventos com os produtos de sensoriamento remoto, observamos que essas variáveis possuem grande relevância para a região, alterando de forma significativa a coloração da água. Os resultados estão de acordo com os trabalhos propostos por ODEBRECHT *et al* (2010) e BERGESCH *et al* (1995), que indicam que o regime de ventos e precipitação atua na ecologia dos organismos fitoplanctônicos (Tabelas 11 a 14). Normalmente, o regime de ventos tem um efeito sul-norte, controlando a entrada de água salgada pelo estuário, enquanto que a pluviosidade tem um efeito norte-sul, aumentando a descarga fluvial. Além disso, esperamos um atraso na resposta da coloração da água em função da precipitação devido ao tamanho da LP e ao tempo necessário para a precipitação referente a bacia de drenagem atingir toda a LP. Considerando esses fatores, os resultados mostram que a pluviosidade atua em 2 pulsos, com um efeito imediato e com um atraso de 4 dias para a área 1, enquanto que para as regiões 3 e 4, esse tempo é de 3 dias. Apesar da identificação dos dois pulsos de precipitação, era esperado que o tempo de atraso aumentasse ao longo do eixo norte-sul, o que não foi identificado para o nosso conjunto de dados. Isso provavelmente se deve as características hidrológicas e fluviais da LP, de forma que a influência do aumento da descarga de água doce pelo Guaíba, não possa ser considerada independentemente.

O grande aporte de CDOM/sedimentos provavelmente se origina da região norte devido à entrada pelo Guaíba, assim como pelos rios Arambaré,

Camaquã e São Lourenço na região central da LP (CALLIARI, 2009). Para a velocidade do vento, observamos valores semelhantes, com uma influência imediata nos comprimentos de onda mais longos (acima de 667 nm), e com um atraso de 4 a 5 dias para os comprimentos de onda mais curtos, indicando que leva certo tempo para a coloração da água responder a essa forçante.

6.5 Assinaturas dos espectros de reflectância do sensoriamento remoto

Apesar da LP ser um ambiente oticamente complexo e dinâmico, foi possível verificar que a cor da água varia de forma consistente no tempo e no espaço. Partindo do pressuposto que a distribuição da comunidade fitoplanctônica é sazonal e varia ao longo do gradiente de salinidade (TORGARN *et al.*, 2004; ODEBRECHT *et al.*, 2005) foi desenvolvida uma metodologia de classificação bio-ótica para auxiliar a compreensão dos fenômenos que regem a variabilidade da cor do oceano. O modelo de classificação proposto corresponde a uma ferramenta para a detecção de assinaturas espectrais em ambientes oticamente complexos e tem como propósito sugerir a predominância de determinado componente ótico.

Ao analisarmos os quatro grupos de espectros formados pela análise de agrupamento através dos valores medianos do espectro de Rrs e compararmos com a literatura disponível para variações espectrais de reflectâncias em águas costeiras, foi possível identificar que o terceiro grupo ilustrado na Figura 13, possui um formato bem semelhante ao proposto por KUTSER *et al* (2006), em uma área costeira e rica em CDOM e sedimentos,

enquanto que os grupos 1, 2 e 4 se assemelham a águas costeiras pobres em CDOM e sedimentos. O grupo 2 provavelmente possui influência de CDOM, uma vez que corresponde a grande parte da região norte da Lagoa dos Patos. Analisando o dendrograma e o formato dos espectros, podemos estabelecer uma relação entre os grupos formados. O primeiro e o segundo grupo possuem características semelhantes, e correspondem aos grupos mais próximos dentro do dendrograma, entretanto, possuem origens distintas, com o primeiro grupo pertencente à área sul, enquanto o segundo pertence à área norte. O terceiro grupo pertence à área norte e possui uma assinatura com nítida influência de CDOM e sedimentos. Nota-se que as assinaturas espectrais são consistentes entre os grupos e sugerem que em média, a LP pode ser caracterizada opticamente com águas dominadas pela presença de sedimentos e CDOM ou como águas de domínio misto.

A análise de agrupamento aplicada sobre os espectros de Rrs selecionados a partir de pixels individuais (ver seção 5.3), resultou em assinaturas espectrais distintas das obtidas utilizando um valor mínimo de clorofila-a ou FLH (Figuras 10, 11 e 12). Considerando-se os comprimentos de onda de 412 a 547 nm, pudemos identificar espectros característicos de comunidades fitoplanctônicas (SISWANTO, 2013) e assinaturas espectrais de Rrs semelhantes às encontradas na literatura (KUTSER *et al.*, 2006; LOBO *et al.*, 2006; TAKAHASHI *et al.*, 2009, SASAKI *et al.*, 2008; LUBAC & LOISEL, 2007). Com base nos espectros de Rrs identificados pelos estudos citados e na conhecida ocorrência de florações de diatomáceas e cianobactérias na área de estudo, o trabalho discriminou as assinaturas espectrais de Rrs em 3 grupos de florações arbitrárias (Figura 22).

O primeiro grupo de florações foi caracterizado como dominado por diatomáceas em ambientes com altas concentrações de CDOM e sedimentos, e pixels assim classificados foram associados a espectros de reflectância em formato de vale entre 412 e 547 nm. De maneira prática, os grupos 4, 7 e 8 de espectros de reflectância referentes ao sensor MODIS/Aqua (Figura 14) e os grupos 1, 3, 4, 7 e 9 ao SeaWiFS (Figura 17) podem ser utilizados como indicativo de massas de água associadas às florações de diatomáceas.

O segundo grupo de florações foi assumido como sendo dominado por cianobactérias, já que os espectros de reflectância entre 412 e 547 nm apresentam o comportamento em vale mais achatado, devido ao efeito de ficobilinas no coeficiente de absorção de luz pelo fitoplâncton. Na prática, o comportamento espectral do grupo 6 (sensor MODIS/Aqua) pode ser considerado para indicar a presença de florações de cianobactérias (Figura 14).

A terceira assinatura encontrada foi associada a florações de diatomáceas em ambientes com concentrações de sedimentos e CDOM relativamente mais baixas (comparadas as demais assinaturas). Aqui, assumiu-se que espectros de reflectância associados a tais condições apresentam o formato de vale entre 412 e 547 nm, mas o espectro de Rrs se assemelha a massas de água com baixa concentração de fitoplâncton, CDOM ou sedimentos e que a feição espectral associada ao grupo 10 referente ao sensor MODIS/Aqua (Figura 14) e aos grupos 2, 5, 6, 8 e 10 do sensor SeaWiFS (Figura 17), podem indicar florações de diatomáceas nessas condições.

A distribuição espaço-temporal dos espectros de Rrs encontradas no nosso estudo, identificou o comportamento espectral associado ao grupo 10 a

uma única imagem durante o verão de 2005 (27 de Fevereiro). Foi possível identificar a assinatura espectral nas sub-áreas 3 e 4, bem como as componentes u e v da velocidade do vento indicando a direção noroeste (Figura 29). Essas condições provavelmente causaram entrada de água costeira na LP, que propiciaram o aumento no número de diatomáceas. A maior parte dos espectros de reflectância do grupo 6 referentes ao mesmo sensor corresponderam ao período de outono e inverno nas sub-áreas 2 e 4, períodos nos quais é esperado o predomínio de cianobactérias na região. A distribuição espacial do comportamento espectral dos grupos 4, 7 e 8 se mostrou menos consistente, mas ao assumirmos que essas assinaturas correspondem às diatomáceas associadas à água doce e salgada, esse comportamento era esperado.

Figura 29 Velocidade da componente u e v do vento entre os dias 25 e 28 de Fevereiro de 2005. Imagem gerada em <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.

Em suma, baseado nas premissas biológicas assumidas pelo nosso estudo, assinaturas espectrais associadas a 6 situações bio-óticas foram discriminadas (Figuras 22, 23 e 24).

- Baixas concentrações de fitoplâncton, CDOM e sedimentos.
- Sem dominância de um dado constituinte ótico (águas mistas).
- Dominância de CDOM e sedimentos.
- Ocorrência de florações de cianobactérias
- Ocorrência de florações de diatomáceas associadas a altas concentrações de CDOM e sedimentos.
- Ocorrência de florações de diatomáceas associadas a baixas concentrações de CDOM e sedimentos.

Duas imagens de reflectância foram selecionadas para exemplificar a aplicação do modelo de classificação (Figuras 25 e 26). A primeira imagem (2 de Julho de 2004) indica uma grande floração de cianobactérias na área 3 e coincidiu com altos valores de clorofila-a medidos in situ para o estuário (entre 5,44 e 8,48 $\mu\text{g/L}$). Na segunda imagem (dia 27 de Fevereiro de 2005), o modelo de classificação indicou uma grande floração de diatomáceas para a área 3. Infelizmente, não existem dados in situ para esse último.

Nossas análises mostram que, em geral, a Lagoa dos Patos possui uma composição ótica mista (Figura 27), com o desenvolvimento de florações ao longo do tempo. A série temporal de imagens classificadas mostrou florações de diatomáceas ocorrendo preferencialmente durante a primavera e verão e florações de cianobactérias ocorrendo durante o outono e inverno, como esperado. A distribuição espacial das florações também seguiu o

esperado, sendo de diatomáceas nas sub-áreas 1, 2 e 4 e de cianobactérias nas sub-áreas 2, 3 e 4 (TORGAN *et al*, 2004; ODEBRECHT *et al*, 2005).

Apesar da ausência de pixels devido à cobertura de nuvens e dos critérios de seleção aplicados em Rrs, o modelo de classificação o permitiu inferir como os componentes óticos variaram ao longo do tempo em um ambiente óticamente complexo. Na figura 28 podemos notar que o modelo de classificação conseguiu detectar florações de fitoplâncton para grande parte da LP. o fluxograma de como o modelo de classificação foi aplicado pode ser observado na figura 30. A linha em vermelho corresponde ao processo de pré processamento para a remoção dos pixels com alta concentração de núvens, ou mal processados, e a linha em verde corresponde a distinção das florações das demais assinaturas espectrais.

Figura 30 Fluxograma modelo de classificação desenvolvido para ambientes lagunares opticamente complexos.

7. Conclusão

Em geral, a cor da Lagoa dos Patos segue um comportamento sazonal e espacial claro, com maiores valores de Rrs durante a primavera e verão, e no norte, com uma diminuição ao longo do eixo norte-sul e durante o outono e inverno. A cor da Lagoa dos Patos também é controlada pelo regime de ventos e precipitação, atuando em 2 pulsos, o primeiro com um impacto imediato, e o segundo com um atraso entre 3 e 5 dias. A discriminação de espectros de Rrs relacionados a florações de fitoplâncton através de um valor mínimo de clorofila-a ou FLH se mostrou ineficaz, sendo necessária uma abordagem visando minimizar a influência de CDOM e sedimentos. Com o desenvolvimento de um critério de distinção bio-ótico em Rrs, foi possível selecionar apenas os pixels referentes a florações fitoplanctônicas, permitindo estudar a variabilidade dos componentes óticos através de imagens de satélite. O trabalho também mostrou que nem sempre é possível relacionar medidas bio-óticas de sensoriamento remoto a um número pequeno de pontos *in situ*, sendo necessário um aumento na escala espacial e temporal dos programas de monitoramento *in situ*. Um outro fator importante é a necessidade de desenvolvimento de algoritmos regionais para o estudo de ambientes costeiros, uma vez que os algoritmos desenvolvidos para oceano não podem ser aplicados de maneira eficaz. Entretanto, foi possível inferir os processos que regem as propriedades óticas em um ambiente lagunar através de medidas de Rrs. Como produto final, foi desenvolvido um modelo de classificação para a classificação de águas em ambientes oticamente complexos através espectro de Rrs para imagens do sensor MODIS/Aqua que indica qual o componente

ótico dominante e baseado no conhecimento taxonômico para o fitoplâncton da região, permite a distinção das florações em categorias.

8. Considerações finais

É importante notar que o trabalho assume diversas premissas durante o seu desenvolvimento, e que ao aplicar o modelo de classificação em ambientes opticamente complexos, os resultados devem ser interpretados como indicativos de dominância de um componente ótico e não como verdade absoluta. Apesar da incerteza atribuída ao modelo de classificação, o trabalho buscou relacionar propriedades óticas e biológicas de florações de fitoplâncton, desenvolvendo um modelo capaz de auxiliar a compreensão das propriedades bio-óticas do ambiente. Devido a baixa quantidade de dados simultâneos *in situ* e por sensoriamento remoto para a LP não foi possível fazer uma validação direta do modelo de classificação. Apesar disso a distribuição taxonômica identificada pelo modelo de classificação, condiz com a distribuição teórica, indicando que o modelo classifica de forma adequada as águas da LP. Estudos em grande escala espacial e temporal possuem um custo muito elevado, e a implementação de modelos bio-óticos em ambientes opticamente complexos é comparativamente simples. Em nosso conhecimento, apesar do banco de imagens disponível para o sensor MODIS/Aqua ter iniciado em 2002, o presente trabalho é pioneiro para a discriminação de florações fitoplanctônicas em ambientes lagunares utilizando esses dados.

9. Referências

- ABBOTT, M.R.; LETELIER, R.M. **Chlorophyll Fluorescence (MODIS Product Number 20)**. Algorithm Theoretical Basis Document. College of Oceanic and Atmospheric Sciences: Oregon State University, 1999.
- ABREU, P.C.O.V.; ODEBRECHT, C.; GONZALEZ, A.. Particulate and dissolved phytoplankton production of the Patos Lagoon estuary, southern Brazil: comparison of methods and influencing factors. Journal of Plankton Research, v. 16, n.7, p. 737-753, 1994.
- ABREU, P.C.; BERGESCH, M.; PROENÇA, L.A.; GARCIA, C.A.E.; ODEBRECHT, C.. Short- and Long-Term Chlorophyll Variability in the Shallow Microtidal Patos Lagoon Estuary, Southern Brazil. Estuaries and Coasts, v. 33, p. 554-569, 2010.
- AHN, Y.H.; SHANMUGAM, P. Detecting red tides from satellite ocean color observations in optically complex Northeast-Asia coastal waters. Remote Sensing of Environment, v.103, p.419-437, 2006.
- ALVAIN, S.; MOULIN, C.; DANDONNEAU, Y. ;BRÉON, F.M. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery. Deep Sea Research I, n.52, 1989-2004, 2005.
- ATTISANO, K.K.; NIENCHESKI, L.P.H.; MILANI, I.C.B.; MACHADO, C.S.; MILANI, M.R.; ZARZUR, S.; ANDRADE, C.F.F. Evidences of continental groundwater inputs to the shelf zone in Albardão, RS, Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, v. 56, n. 3, p. 189 - 200, 2008.
- BARLOW, R. G.; AIKEN, J.; HOLLIGAN, P. M.; CUMMINGS, D. G.; MARIOTENA, S.; HOOKER, S. Phytoplankton pigment and absorption characteristics along meridional transects in the Atlantic Ocean. Deep-

Sea Research I, v.49, p.637-660, 2002.

BERGESCH, M.; ODEBRECHT, C.; ABREU, P.C. Microalgas do estuário da Lagoa dos Patos: Interação entre o sedimento e a coluna da água.

Oecologia Brasiliensis, v.1, p.273-289, 1995.

BLOUGH, N. V.; GREEN, S.A. Spectroscopic characterization and remote sensing of non-living organic matter. In *The role of non-living organic matter in the Earth's carbon cycle*. Proc. Dahlem Conf. Wiley. P. 23-45, 1995.

BOWERS, D.G.; BRETT, H.L. The relationship between CDOM and salinity in estuaries: an analytical and graphical solution. Journal of Marine Systems, v.73, n.1-2, p.1-7, 2008.

BRAARUD, T.; Salinity as an ecological factor in marine phytoplankton. Physiologia Plantarum, v.4, p.28-34, 1951.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PIUEUR, L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. Limnology and Oceanography, v. 26, p. 43-53, 1981.

BRICAUD, A.; BABIN, M.; MOREL, A.; CLAUSTRE, H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficient of natural phytoplankton: analysis and parameterization. Journal of Geophysical Research, v.100, C7, p.13321-13332, 1995.

BRICAUD, A.; ROESLER, C.; ZANEVELD, J.R.V. In situ methods for measuring the inherent optical properties of ocean waters. Limnology and Oceanography, v. 40, p. 393-410, 1995.

BRICAUD, A.; CLAUSTRE, H.; RAS, J.; OUBELKHEIR, K. Natural variability of phytoplankton absorption in oceanic waters: influence of the size

structure of algal populations. Journal of Geophysical Research, v.109, C11010, 2004.

BUKATA, R.P.; JEROME, J.H.; KONDRATYEV, K.Y.; POZDNYAKOV, D.V.

Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters, CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.

CALLIARI, L.J. Environment and biota of the Patos Lagoon estuary. Geological setting. In: SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C.; CASTELLO, J.P. (Eds.) **Subtropical Convergence Environments: The Coast and Sea in the Southwestern Atlantic**. Springer: Berlin, p.13–18, 1997.

CALLIARI, L.J.; WINTERWERP, J.C.; FERNANDES, E.H.; CUCHIARA, D.C.; VINZON, S.B.; SPERLE, M.; HOLLAND, K.T. Fine grain sediment transport and deposition in the Patos Lagoon-Cassino beach sedimentary system. Continental Shelf Research, v.29, n.3, p.515-529, 2009.

CARDER, K.L.; STEWARD, R.G.; HARVEY, G. R.; ORTNER, P. B. Marine humic and fulvic acids: Their effects on remote sensing of ocean chlorophyll. Limnology and Oceanography, v. 34, p. 68-81, 1989.

CARDER, K.L. Reflectance model for quantifying chlorophyll a in the presence of productivity degradation products. Journal of Geophysical Research, v.96, p.20599-20611, 1991.

CARDER, K.L.; CHEN, F.R.; LEE, Z.P.; HAWES, S.K.; CANNIZZARO, J.P.; **MODIS ocean science team algorithm theoretical basis document (ATBD 19, Case 2 Chlorophyll a)**. University of South Florida Publ.: St. Petersburg, p.67, 2003.

CARVALHO, M. *Estimativa da concentração de clorofila-a através de dados de*

cor do oceano e caracterização oceanográfica da plataforma continental adjacente à Baixada Santista. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009

CHEN, C.; SHI, P.; YIN, K.; PAN, Z.; ZHAN, H.; HU, C. Absorption coefficient of yellow substance in the Pearl River estuary. PROCEEDINGS- SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING; v.4892; p.215-221, 2003.

CIOTTI, A.M.; ODEBRECHT, C.; FILLMANN, G.; MOLLERJR, O. Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. Continental Shelf Research, v. 15, p. 1737-1756, 1995.

CIOTTI, A. M. **Influence of phytoplankton communities on relationships between optical properties of coastal surface waters**. Dalhousie University, Department of Oceanography, 1999.

CIOTTI, A.M.; LEWIS, M.R.; CULLEN, J.J. Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. Limnology and Oceanography, v. 47, p. 404-417, 2002.

CIOTTI, A.; GARCIA, C.A.E.; JORGE, D.S.F. Temporal and meridional variability of Satellite-estimates of surface chlorophyll concentration over the Brazilian continental shelf. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, v. 5, p. 236-253, 2010.

CLARK, D. **Bio-optical algorithms — Case 1 waters**. MODIS algorithm theoretical basis document, Version 1.2. : National Oceanic and

- Atmospheric Administration, p. 50, 1997.
- COBLE, P.G. Marine Optical Biogeochemistry – The Chemistry of Ocean Color. Chemical Reviews, v.107, n.2, p. 402-418, 2007.
- COSTA, E. C.; MARQUES, E. N. Aspectos etológicos de *Oncideres impluviata* (Germar, 1824) em bracinga. Rev.Centro Ciências.Rurais, v. 18, n. 3-4, p. 219 - 228, 1988.
- CULLEN, J.J.; CIOTTI, A.M.; DAVIS, R.F.; EWIS, M.R. Optical detection and assessment of algal blooms. Limnology and Oceanography, v. 42, p.1223-1239, 1997.
- D'SA, E.J.; MILLER, R.L. Bio-optical properties in waters influenced by the Mississippi River during low flow conditions. Remote Sensing of Environment, v.84, p.538-549, 2003.
- DUAN, H.; MA, R.; HU, C. Evaluation of remote sensing algorithms for cyanobacterial pigment retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China. Remote Sensing of Environment, v.126, p.126–135, 2012.
- FERNANDES, E.H.L.; DYER, K.R.; MOLLER; O.O. Spatial gradients in the flows of Southern Patos Lagoon. Journal of Coastal Research, v.21, p.759–769, 2005.
- GALLEGOS, C.L.; NEALE, P.J. Partitioning spectral absorption in case 2 waters: discrimination of dissolved and particulate components. Applied Optics, v.41, p.4220-4233, 2002.
- GARCIA, C. Coastal Plain and Patos Lagoon—hydrographic characteristics. In SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C.; CASTELLO J.P. (Ed.) **Subtropical convergence environment**. The coast and sea in the Southwestern

- Atlantic, p.18–20. New York: Springer, 1997.
- GARCIA, C.; GARCIA, V.; DOGLIOTTI, F.; FERREIRA, A.; ROMERO, S.; MANINNO, A. Environmental conditions and bio-optical signature of a coccolithophore bloom in the Patagonian shelf. Journal of Geophysical Research. 2011. Doi:10.1029/2010JC006595.
- GORDON, H. R. Dependence of the diffuse reflectance of natural waters on the Sun angle. Limnology and Oceanography, v.34, p.1484–1489, 1989.
- GORDON, H.R. Absorption and scattering estimates from irradiance measurements: Monte Carlo simulations. Limnology and Oceanography, v.36, p.769-777, 1991.
- HAVENS, K.E.; JAMES, R.T.; EAST, T.L.; SMITH, V.H. N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution. Environmental Pollution, v.122, p.379-390, 2003.
- HOEPFFNER, N., SATHYENDRANATH, S. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. Marine Ecology. Progress Series, v.73, p.11 – 23, 1991.
- HUOT, Y.; BROWN, C.A.; CULLEN, J.J. New algorithms for MODIS sun-induced chlorophyll fluorescence and a comparison with present data products. Limnology and Oceanography: Methods, 2005.
- JOHNSEN, G.; SAMSET, O.; GRANSKOG, L.; SAKSHAUG, E. In vivo absorption characteristics in 10 classes of bloom-forming phytoplankton: taxonomic characteristics and responses to photoadaptation by means of discriminant and HPLC analysis. Marine Ecology Progress Series, v. 105, p. 149-157, 1994.

- KALIKOSKI, D. C.; ALMUDI, T.; QUEVEDO, P. Building adaptive capacity to weather variability: the case of artisanal fisheries in two Southern Brazilian lagoons. Governing shared resources: connecting local experience to global challenges. In: **Biennial Conference Of The International Association For The Study Of Commons Conference - IASC**, 12, 2008.
- KIRK, J. T. O., Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude. Limnology and Oceanography, v.29, p.350–356, 1984.
- KIRK, J.T.O. **Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems**, Second Edition, Cambridge Univ. Press, 1994.
- KIRKPATRICK, G.; MILLIE, D.F.; MOLINE, M.A.; SCHOFIELD, O. Optical discrimination of a phytoplankton species in natural mixed populations. Limnology and Oceanography, v.45, n.2, p.467-471, 2000.
- KNOPPERS, B., Aquatic Primary Production in Coastal Lagoons. In: KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal lagoon processes**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. Elsevier Oceanography Series, v.60, p.243-285, 1994.
- KONSTADINOL, T.S.; SIEGEL, D.A.; MARITORENA, S.; GUILLOCHEAU, N. Ocean color observations and modeling for an optically complex site: Santa Barbara Channel, California, USA. Journal of Geophysical Research, Oceans, 112, C07011, 10.1029/2007JC003526.
- KUTSER, T.; METSAMAA, L.; STRÖMBECK, N.; VAHTMÄE, E. Monitoring cyanobacterial blooms by satellite remote sensing. Estuarine Coastal Shelf Science, v.67, p.303–312, 2006.
- LAPUCCI, C.; RELLA, M.A.; BRANDINI, C.; GANZIN, N.; GOZZINI, B.;

- MASELLI, F.; MASSI, L.; NUCCIO, C.; ORTOLANI, A.; TREES, C. Evaluation of empirical and semianalytical chlorophyll algorithms in the Ligurian and North Tyrrhenian Seas. Journal of Applied Remote Sensing. v.6, p.1-21, 2012.
- LEE, Z.; CARDER, K. L.; ARNONE, R. A. 2002. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. Applied Optics, v.41, n.27, p.5755 – 5772, 2002.
- LOBO, F. L.; YUNES, J.S.; BARBOSA, C.C.; LONDE, L.R.; PEREIRA FILHO, W.; THEIL, C.I.; NOVO, E.M.L.M. Propriedades da reflectância de *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) manipulada em altas concentrações de pigmentos. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)**, 14., 2009, Natal. Anais. São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 4747-4754, 2009.
- LUBAC, B.; LOISEL, H. Variability and classification of remote sensing reflectance spectra in the Eastern English Channel and southern North Sea. Remote Sensing of Environment, v.110, p.45-58, 2007.
- MILLER, C.B. **Biological Oceanography**. Malden: Blackwell Science, p.402, 2004.
- MARITORENA, S.; SIEGEL, D. A.; PETERSON, A. Optimization of a semi-analytical ocean color model for global scale applications. Applied Optics, v.41, n.15, p.2705– 2714, 2002.
- MARRA, J.; TREES, C.; OREILLY, J. Phytoplankton pigment absorption: A strong predictor of primary productivity in the surface ocean. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, v. 54, n.2, p. 155-163. 2007

- MOBLEY, C. Estimation of the Remote-Sensing Reflectance from Above-Surface Measurements. Applied Optics, v. 38, p.7442-7455, 1999.
- MÖLLER JR., O.O. **Hydrodynamique de la lagune dos Patos (30°S, Brésil): mesures et modélisation**. Tese de Doutorado. França, Universidade de Bordeaux 1, 204p, 1996.
- MÖLLER, O. O.; LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L. ; MATA, M. M. . The Patos Lagoon summertime circulation and dynamics. Continental Shelf Research, v.16, n.3, p.335-351, 1996.
- MOREL, A.; BRICAUD, A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. Deep-Sea Research, v.28, p.1375-1393, 1981.
- MOREL, A., Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case 1 waters), Journal of Geophysical Research, v.93, p.10,749–10,768, 1988.
- MOREL, A.; S. MARITORENA. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. Journal of Geophysical Research, v.106, p.7763-7780, 2001.
- MOREL, A. & GENTILI. A simple band ratio technique to quantify the colored dissolved and detrital organic material from ocean color remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 113, 998-1011, 2009.
- MOSS B., BEKLIOGLU, M.; CARVALHO, L.; KILINC, S.; MCGOWAN, S.; STEPHEN, D. Vertically-challenged limnology, contrasts between deep and shallow lakes. Hydrobiologia, v. 342/343, p.257-267, 1997.
- MUSTAPHA, S.B.; LAROUCHE, P. Evaluation of MODIS and SeaWiFS Ocean Color Algorithms in the Canadian Artic Waters: the Cape Bathurst Polynia, Proceedings of IGARSS'88, July 7-11, Boston. 2008

- NIENCHESKI, L.F.; WINDOM, H.L. Nutrient flux and budget in Patos Lagoon estuary. Science of the Total Environment, v.149, p.53–60, 1994.
- NIXON S. W. Nutrients dynamics, primary production and fisheries yields of lagoons. Oceanologica Acta, p.357-371, 1982.
- ODEBRECHT, C.; ABREU, P.C.; MOLLER, O.O.; NIENCHESKI, L.F.; PROENÇA, L.A.; TORGAN, L.C. Drought Effects on Pelagic Properties in the Shallow and Turbid Patos Lagoon, Brazil. Estuaries., v.28, n.5, p.675:685, 2005.
- ODEBRECHT, C.; ABREU, P.C.; BEMVENUTI, C.E.; COPERTINO, M.; MUELBERT, J.H.; VIEIRA, J.P.; SEELIGER, U. The Patos Lagoon Estuary Biotic Responses to Natural and Anthropogenic Impacts in the Last Decades (1978-2008). In: **Coastal Lagoons: Critical Habitats of Environmental Change**, 2010.
- O'REILLY, J. E.; MARITORENA, S.; MITCHELL, B. G.; SIEGEL, D. A.; CARDER, K. L.; GARVER, S. A.; KAHRU, M.; MCCLAIN, C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. Journal of Geophysical Research-Oceans, v.103, p.24937-24953, 1998.
- PALACIOS, S.L.; PETERSON, T.D.; KUDELA, R.M. Development of synthetic salinity from remote sensing for the Columbia River plume. Journal of Geophysical Research, v.114, C00B05, 2009.
- PETERS, H.; JOHNS, W.E. Bottom Layer Turbulence in the Red Sea Outflow Plume. Journal Physical Oceanography, v.36, p.1763-1785. 2006
- PETZOLD, T.J. Volume scattering functions for selected ocean waters. Scripps Institute Oceanography Report SIO, p.72-78, 1972.
- POPE, R.M.; FRY, E.S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II.

- Integrating cavity measurements. Applied Optics, v.36, p. 8710-8723, 1997.
- PREISENDORFER, R. W. Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea. In: **IUGG-IAPO Symposium on Radiant Energy in the Sea**, 4-5 Aug. 1960, Helsinki: Finland. Monograph N.10, p.83-91, 1961.
- RANDOLPH, K.; WILSON, J.; TEDESCO, L.; LI, L.; PASCUAL, D. L.; SOYEUX, E. Hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid productive water using optically active pigments, chlorophyll a and phycocyanin. Remote Sensing of Environment, v.112, p.4009–4019, 2008.
- RICHARDSON, L.L. 1996. Remote Sensing of algal bloom dynamics: New research fuses remote sensing of aquatic ecosystems with algal accessory pigment analysis. BioScience, v. 46, n. 7, p. 492-501, 1996.
- RUDDICK, K.G.; OVIDIO, F.; RIJBOER, M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. Applied Optics, v. 39, n. 6, p. 897-912, 2000.
- SAPORTA, G. **Probabilités, analyse des données et statistique**. Paris: Editions Technip, 2006.
- SASAKI, H.; TANAKA, A.; IWATARI, M.; TOUKE, Y.; SISWANTO, E.; TAN, C.K. Optical properties of the red tide in Isahaya Bay, Southwestern Japan: Influence of chlorophyll a concentration. Journal of Oceanography, v. 63, pp. 511-523. 2008
- SEELIGER, U.; ODEBRECHT, C.; CASTELLO, J.P. (Eds.). **Subtropical convergence environments**. The coast and sea in the Southwestern Atlantic. Berlin: Springer, 308 pp, 1997.

- SEELINGER, U.; ODEBRECHT, C. **O estuário da Lagoa dos Patos um século de transformações**. Rio Grande:FURG, 180pp, 2010.
- SENJYU, T.; YASUDA, H.; SUGIHARA, S.; KAMIZONO, M. Current and turbidity variations in the western part of Suo-Nada, the Seto Inland Sea, Japan: A hypothesis of the oxygen-deficient water mass formation. Journal of Oceanography, v.57, p.15–27, 2001.
- SIEBURTH, J. MCN.; JENSEN, A. Studies on the algal substances in the sea. 2. The formation of Gelbstoff (humic material) by exudates of phaeophyta. Journal of Experimental Marine Biology Ecology, v.3. p.275-289, 1969.
- SIEGEL, D.A.; MARITORENA, S.; NELSON, N.B.; HANSELL, D.A.; LORENZI-KAYSER, M. Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials. Journal of Geophysical Research, v.107, p.3228, doi:10.1029/2001JC000965, 2002.
- SIMON, A.; SHANMUGAM, P. An Algorithm for Classification of Algal Blooms Using MODIS-Aqua Data in Oceanic Water around India. Advances in Remote Sensing,v.1, pp.35-51. 2012.
- SISWANTO, E.; ISHIZAKA, J.; TRIPATHY, S.C.; MIYAMURA, K. Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan. Remote Sensing of Environment, v. 129, p.185-196, 2013.
- STUBBINS, A.; SPENCER, R. G. M.; CHEN, H.; HATCHER, P. G.; MOPPER, K.; HERNES, P. J.; MWAMBA, V. L.; MANGANGU, A. M.; WABAKANGHANZI, J. N.; SIX, J. Illuminated darkness: molecular signatures of Congo River dissolved organic matter and its

- photochemical alteration as revealed by ultrahigh precision mass spectrometry. Limnology and Oceanography, v.55, p.1467–1477, 2010.
- SUBRAMANIAM, A.; HOOD, R.R.; BROWN, C.W.; CARPENTER, E.J.; CAPONE, D.G. Detecting Trichodesmium Blooms in SeaWiFS Imagery. Deep-Sea Research Part II, v.4, n.1-3, n.107-121, 2002.
- TAKAHASHI, W.; KAWAMURA, H.; OMURA, T.; FURUYA, K. Detecting red tides in the Eastern Seto Inland Sea with satellite ocean color imagery. Journal of Oceanography, v.65, p.647–656, 2009.
- TASSAN, S. Local algorithms using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. Applied Optics, v.33, p.2369–2378, doi:10.1364/AO.33.002369, 1994.
- THURMAN, E.M. **Organic geochemistry of natural waters**. Martinus Nijhoff/Dr W Junk Publishers, Boston, 1985.
- TORGAN, L.C.; PILLAR, V.D.; NIENCHESKI, L.F. Phytoplankton Associations of a Coastal Lagoon in South of Brazil. Journal of Coastal Research. SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium, Itajaí, SC, Brazil), p.1149 - 1151. 2004.
- TZORTZIOU, M.; OSBURN, C. L.; NEALE. P. J. Photobleaching of dissolved organic material from a tidal marsh-estuarine system of the Chesapeake Bay. Photochemistry Photobiology, v.83, p.782–792, 2007.
- URQUHART, E. A.; ZAITCHIK, B. F.; HOFFMAN, M. J.; GUIKEMA, S. D.; GEIGER, E. F. Remotely sensed estimates of surface salinity in the Chesapeake Bay: A statistical approach. Remote Sensing of Environment, v.123, p.522–531, 2012.

- VARONA-CORDERO, F.; GUTIERREZ-MENDIETA, F.J.; MEAVE DEL CASTILLO, M. E. Phytoplankton assemblages in two compartmentalized coastal tropical lagoons (Carretas-Pereyra and Chantuto-Panzacola, Mexico). Journal of Plankton Research, v. 32, n.9, p.1283, 2010.
- WANG, J.J.; TANG, D.L.; SUI, Y. Winter phytoplankton bloom induced by subsurface upwelling and mixed layer entrainment southwest of Luzon Strait, Journal of Marine Systems, v.83, p.141-149, 2010.
- WARD, J.H. Hierarchical Grouping to optimize an objective function. Journal of American Statistical Association, v.58, n.301, p.236-244, 1963.
- WEAVER, E.C.; WRIGLEY, R. **Factors affecting the identification of phytoplankton groups by means of remote sensing**. Moffet Field: NASA, p.121, 1994.
- WEHR, J.D.; SHEATH, R.G.; KOCIOLEK, P.; THORP, J.H. Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification. Aquatic Ecology, 2002.
- WHITMIRE, A.L.; BOSS, E.; COWLES, T.J.; PEGAU, W.S. Spectral variability of the particulate backscattering ratio. Optics Express, v. 15, n.11, p. 7019-7031. 2007.
- WHITMIRE, A.L.; PEGAU, W.S.; KARP-BOSS, L.; BOSS, E.; COWLES, T.J. Spectral backscattering properties of marine phytoplankton cultures. Optics Express, v. 18, n. 14, p. 15073, 2010.