



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15748-TDI/1493

**BIBLIOTECA ESPECTRAL: DETERMINAÇÃO DE
ESPECTROS DE REFERÊNCIA PARA A
CLASSIFICAÇÃO DE TIPOS DE ÁGUA DAS ÁREAS
ALAGÁVEIS DA AMAZONIA**

Felipe de Lucia Lobo

Dissertação do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Evlyn Márcia de Moraes Novo e Claudio Clemente Faria, aprovada em 31 de março de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/05.14.16.39>>

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15748-TDI/1493

**BIBLIOTECA ESPECTRAL: DETERMINAÇÃO DE
ESPECTROS DE REFERÊNCIA PARA A
CLASSIFICAÇÃO DE TIPOS DE ÁGUA DAS ÁREAS
ALAGÁVEIS DA AMAZONIA**

Felipe de Lucia Lobo

Dissertação do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Evlyn Márcia de Moraes Novo e Claudio Clemente Faria, aprovada em 31 de março de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/05.14.16.39>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L786b Lobo, Felipe de Lucia.
Biblioteca espectral: determinação de espectros de referência para a classificação de tipos de água das áreas alagáveis da Amazonia / Felipe de Lucia Lobo. – São José dos Campos : INPE, 2009.
129p. ; (INPE-15748-TDI/1493)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. Evlyn Márcia de Moraes Novo e Claudio Clemente Faria.

1. Biblioteca espectral. 2. Ecossistemas aquáticos. 3. Áreas alagáveis. 4. Mapeamento por ângulo espectral. 5. Hiperespectral. I.Título.

CDU 528.88:556.551

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. Lênio Soares Galvão



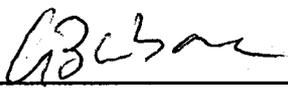
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo



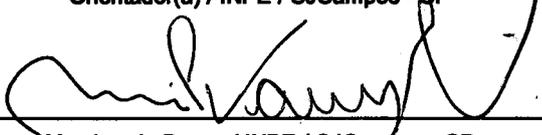
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Cláudio Clemente de Faria Barbosa



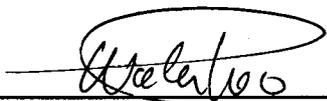
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Milton Kappel



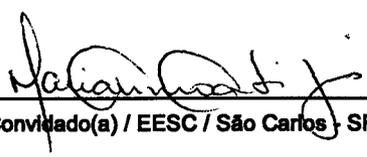
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Waterloo Pereira Filho



Convidado(a) / UFSM / Santa Maria - RS

Dra. Maria do Carmo Calijuri



Convidado(a) / EESC / São Carlos - SP

Aluno (a): Felipe de Lucia Lobo

São José dos Campos, 31 de março de 2009

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que este trabalho tenha sido realizado, principalmente aos colegas que realizaram as coletas de campo e participaram da organização dos dados: Waterloo Filho, Conrado Rudorff, Maycira Costa, Irene Nóbrega e Arley. Agradeço sinceramente à Dr^a. Evlyn Novo pela orientação clara e conversas sempre enriquecedoras, ao Dr. Cláudio Barbosa pelo total apoio e conhecimentos recebidos. Agradeço também ao pessoal da SPG sempre simpático e prestativo, e a todos os colegas pela amizade ao longo desses 2 anos de mestrado no INPE. Agradeço aos órgãos que financiaram a coleta e organização dos dados: CNPq (461930/2000-5, 301435/2004-9); FAPESP (2004/14086-5, 2003/00785-3, 2002/00785-3); CTHIDRO (55.0301/2002-0) e Rede Geoma.

Agradeço aqueles que tiveram paciência e interesse em discutir assuntos relativos à implementação da biblioteca espectral e sobre dados de satélites e, sobretudo, agradeço a minha família por me proporcionar e prover condições ideais para chegar até aqui e realizar este estudo.

Muito Obrigado!

RESUMO

Atualmente, os métodos para a caracterização de propriedades de águas continentais a partir de dados hiperespectrais baseiam-se em modelos semi-analíticos e empíricos. Uma alternativa a esses modelos é a construção de uma biblioteca espectral de referência que permita caracterizar diferentes tipos de água a partir do comportamento espectral dos corpos d'água. O objetivo deste trabalho foi, portanto, construir e validar uma biblioteca espectral de tipos de água das Áreas Alagáveis da Amazônia (AAA) e propor curvas de referências que viabilizem a identificação dessas massas de água a partir de espectros de campo e de imagens hiperespectrais (Hyperion), e multi-espectrais (MERIS). Um processo iterativo de agrupamento limnológico das amostras de água (n=327) e testes espectrais utilizando o SAM (Spectral Angle Mapper) permitiram definir 10 curvas de referência de classes que apresentam características limnológicas estatisticamente distintas entre si e alta separabilidade entre os espectros de campo (83% de acurácia total). A aplicação da biblioteca de tipos de água às imagens Hyperion e MERIS resultou num desempenho de 48% e 67%, respectivamente. As classes de água clara e as ricas em Chl-a apresentaram desempenho inferior em comparação às classes ricas em Sólidos Inorgânicos em Suspensão (SIS) devido à alta variabilidade angular das curvas na região espectral entre 700 e 900 nm. A análise dos resultados indica que o desempenho insuficiente da aplicação dos espectros de referência para a classificação das imagens do sensor Hyperion pode ser explicada pela instabilidade da razão sinal-ruído (RSR) ao longo do espectro. O bom desempenho com as imagens MERIS, entretanto, indica que o método proposto é promissor, reduzindo a necessidade de grande número de amostras *in situ* e os custos de monitoramento de propriedades da água.

SPECTRAL LIBRARY: REFERENCES FOR WATER TYPES CLASSIFICATION IN AMAZON WETLANDS

ABSTRACT

The advent of orbital hyperspectral sensors increased the possibility of assessing water properties in complex inland waters, such as that of Amazon wetlands. The current methods for water properties assessment are based upon empirical and semi-analytical models. An alternative to those methods is to build a water spectral library as reference to classify different water types from the Amazon wetlands. The objective of this work was to construct and to validate a spectral library of water types, which will enable to classify both field and orbital hyperspectral data acquired in Amazon wetlands. As a result of iterative clustering of both water samples ($n=327$), according to their limnological properties, and spectra using SAM (Spectral Angle Mapper) 10 reference spectra were defined to compose the spectral library representative of water types statistically distinct (83% of total accuracy). The library was applied to both, Hyperion and MERIS images, and presented an accuracy of 48% and 67%, respectively. Clear water and chlorophyll-a rich classes presented lower accuracy in relation to high inorganic sediment concentration classes due to the high angular variability in near-infrared (between 700 and 900 nm) in earlier classes. The analyses of these results indicate that the Hyperion performance can be explained by the instability of the noise-to-signal ration (NSR) throughout the visible and near-infrared spectrum. The library performance with MERIS data, however, indicates that the proposed method is sound and can reduce the need for large number of in situ sampling stations and the cost of water monitoring.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1 INTRODUÇÃO	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 Propriedades Ópticas da Água e de seus Componentes Opticamente Ativos.....	27
2.1.1 Comportamento Espectral da Água Pura.....	27
2.1.2 Pigmentos Fotossintetizantes	28
2.1.3 Sólidos Inorgânicos em Suspensão	32
2.1.4 Material Orgânico Dissolvido	33
2.1.5 Interação entre COA	34
2.2 Aquisição de Dados Hiperespectrais	36
2.2.1 Sensores de campo (<i>in situ</i>)	36
2.2.2 Sensores Orbitais.....	38
2.3 Métodos de Estimativas de COA Utilizando Dados Hiperespectrais	38
2.3.1 Modelos Empíricos.....	39
2.3.2 Modelos Semi-Analíticos.....	39
2.3.3 Métodos de Classificação que Utilizam Espectros de Referência – Biblioteca Espectral	41
2.4 Spectral Angle Mapper (SAM)	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 Área de Estudo	47
3.2 Metodologia	48
3.2.1 Banco de Dados e Campanhas	49
3.2.2 Análise de Consistência dos Dados.....	52
3.2.3 Definição das Classes de Água	54
3.2.4 Validação da Biblioteca Espectral	58
3.2.5 Variabilidade Angular das Curvas de Referência.....	58
3.2.6 Simulação de Bandas Espectrais de Sensores Orbitais	59
3.2.7 Aplicação da Biblioteca às Imagens Orbitais	59
4 RESULTADOS e DISCUSSÃO	63
4.1 Biblioteca Espectral de Tipos de Água.....	63
4.1.1 Classe 1 – Clara	64
4.1.2 Classe 2 – Preta	66
4.1.3 Classe 3 – SIS10	68
4.1.4 Classe 4 – SIS40	70
4.1.5 Classe 5 – SIS70	72
4.1.6 Classe 6 – SIS120	74
4.1.7 Classe 7 – SIS500	76
4.1.8 Classe 8 – CHL25.....	78
4.1.9 Classe 9 – CHL50.....	80

4.1.10 Classe 10 – CHL75.....	82
4.2 Separabilidade Limnológica das Classes	84
4.3 Separabilidade Espectral das Classes	89
4.4 Validação da Biblioteca.....	94
4.5 Desempenho da Biblioteca por Campanhas.....	95
4.6 Simulação de Bandas de Sensores Orbitais.....	95
4.7 Classificação SAM das Imagens Hiperespectrais.....	97
4.7.1 Hyperion	97
4.7.2 MERIS	104
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
APÊNDICE A – Campanhas de amostragens de água nas AAA.....	119
APÊNDICE B – Características Técnicas dos Sensores Orbitais Hyperion e MERIS.....	125
APÊNDICE C – Chave de Classificação Limnológica de Amostras de Água das AAA.....	127

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Coeficiente de absorção e espalhamento da água pura.	28
2.2 - Comportamento espectral de grupos principais fitoplanctônicos presentes em águas continentais.	30
2.3 - Reflectância espectral medida <i>in situ</i> de águas claras com concentrações variáveis de 0 a 1000 mg/l de argila (gráfico a) e silte (gráfico b).	33
2.4 - Porcentagem de reflectância de água rica em CHL-a com variável concentração de SIS (0 a 500 mg/l).	34
2.5 - Curvas espectrais de água rica em SIS (340 mg/L) e variável concentração de Chl-a (0 a 190 µg/L).	35
2.6 - Fatores que influenciam a luz emergente ascendente do corpo d'água: A) retroespalhamento pelas moléculas de água; B) retroespalhamento pelo material inorgânico em suspensão; C) absorção pela matéria orgânica dissolvida; D) reflexão de fundo; E) retroespalhamento pelo fitoplâncton.	37
2.7 - Representação do funcionamento do classificador por ângulos espectrais	43
3.1 - Mapa da região de estudo (em branco) referente às Áreas Alagáveis da Amazônia.	48
3.2 - Fluxograma da metodologia dividida em quatro etapas.	49
3.3 - Massa d'água com predomínio de matéria orgânica dissolvida e com forte componente de reflexão especular (a), que pode contaminar a medida espectral na região do azul entre 400 a 500 nm (b).	53
3.4 - Exemplos de dados espectrais inconsistentes das campanhas A, B e D.	54
3.5 - Seqüência de tratamento do conjunto de dados até a definição das classes da biblioteca espectral.	55
3.6 - Processo iterativo de agrupamento (A) e teste das curvas espectrais médias (B e C) para a definição das referências constituintes da biblioteca espectral de águas para as Áreas Alagáveis da Amazônia (D).	57
3.7 - Localização da faixa de imageamento dos sensores orbitais utilizados para classificação: Hyperion e MERIS.	60
3.8 - Razão sinal ruído (RSR) do sensor Hyperion entre 400 e 900 nm.	60
4.1 - Espectros das classes de águas constituintes da biblioteca espectral de tipos de água nas AAA.	63
4.2 - Curva de referência da Classe 1-Clara com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 15 curvas em comparação com a referência.	65
4.3 - Curva de referência da Classe 2-Preta com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 19 curvas em comparação com a referência.	67
4.4 - Curva de referência da Classe 3-SIS10 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 59 curvas em comparação com a referência.	69

4.5 - Curva de referência da Classe 4-SIS40 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 23 curvas em comparação com a referência.	71
4.6 - Curva de referência da Classe 5-SIS70 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 47 curvas em comparação com a referência.	73
4.7 - Curva de referência da Classe 6-SIS120 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 35 curvas em comparação com a referência.	75
4.8 - Curva de referência da Classe 7-SIS500 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 58 curvas em comparação com a referência.	77
4.9 - Curva de referência da Classe 8-CHL25 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 13 curvas em comparação com a referência.	79
4.10 - Curva de referência da Classe 9-CHL50 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 36 curvas em comparação com a referência.	81
4.11 - Curva de referência da Classe 10-CHL75 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 22 curvas em comparação com a referência.	83
4.12 - Gráfico Box-plot da distribuição de Chl-a em função das classes de água propostas. Destaca-se, nos enquadramentos em azul, os níveis diferentes estatisticamente (Teste-t com nível significância de 5%).	85
4.13 - Gráfico Box-plot da distribuição de SIS (escala logarítmica) em função das classes de água propostas. Destaca-se, nos enquadramentos em azul, os níveis diferentes estatisticamente (Teste-t com nível significância de 5%).	86
4.14- Gráfico Box-plot da distribuição de COD em função das classes de água propostas. Destacam-se, nos enquadramentos em azul, os níveis diferentes estatisticamente (Teste-t com nível significância de 5%).	87
4.15- Distribuição das classes da biblioteca função das concentrações médias de COD (eixo X), Chl-a (eixo Y) e SIS (eixo Z, escala logarítmica).	88
4.16 - Gráfico da distribuição das 10 classes da biblioteca em função das proporções entre COD e CID (em ppm), e entre SIS e Chl-a (em mg/L). Destaque para os agrupamentos identificados.	93
4.17- Gráfico do resultado da classificação dos pontos do BDSIMA em simulações dos sensores Hyperion e MERIS para cada classe da biblioteca.	96
4.18- Imagem Hyperion classificada pelo SAM; a) Composição colorida verdadeira (640 – vermelho; 557 – verde; e 468 – azul); b) máscara da água (em branco) contendo verdade terrestre os 44 pontos obtidos na campanha I; c) classificação SAM no intervalo entre 480 e 895 nm, destaque para o Lago Curumuru (topo da figura) não classificado.	99
4.19- Comparação das curvas de referências da biblioteca com curvas espectrais retiradas da imagem Hyperion. Eixo da esquerda apresenta	

valores de R% (representação em linhas) e eixo da direita, valores em radianos da diferença angular (representação em áreas).....	100
4.20- Classificações da imagem Hyperion por métodos empíricos: a) Variações na concentração de Chl-a (em ug/L), estimadas a partir da derivativa em 691nm; b) Variações na concentração de SIS (em mg/L), estimadas a partir da derivativa em 711nm, segundo Rudorff et al. (2007). E classificação pelo método SAM (c) resultante deste trabalho (mesma classificação da Figura 4.18.c).....	103
4.21- Imagem MERIS classificada pelo SAM; a) Composição colorida verdadeira (640 – vermelho; 557 – verde; e 468 – azul); b) verdade terrestre dos 69 pontos obtidos na campanha D; c) classificação SAM no intervalo entre 412 e 900 nm. Destaque para as regiões da imagem com erro de classificação.	107
4.22- Comparação das curvas de referências da biblioteca com curvas espectrais retiradas da imagem MERIS. Eixo da esquerda apresenta valores de R% e eixo da direita, valores em radianos da diferença angular.	108

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Comprimentos de onda de absorção dos pigmentos.	28
3.1 - Variáveis limnológicas compiladas para essa pesquisa provenientes das 9 campanhas. Indicação do número amostral total, média, mínimo, máximo e desvio padrão (DP) de cada variável.	51
3.2 - Número amostral total e número de pontos eliminados por inconsistência em cada campanha.	52
4.1 - Características limnológicas das classes de água da biblioteca espectral.	64
4.2 - Enquadramento das classes em níveis de concentração de Chl-a (nível de significância de 5%).	84
4.3 - Enquadramento das classes em níveis de concentração de SIS (nível de significância de 5%).	86
4.4- Enquadramento das classes em níveis de concentração de COD (nível de significância de 5%).	87
4.5- Matriz de confusão da classificação das 327 amostras obtidas <i>in situ</i> , tendo como verdade de campo as próprias classes à que cada curva foi atribuída no processo de definição de suas médias.	90
4.6- Proporção entre as médias de COD e CID, e entre SIS e Chl-a das classes da biblioteca.	92
4.7- Matriz de confusão da classificação dos 40 pontos amostrais separados previamente para validação da biblioteca.	94
4.8- Tabela de desempenho da classificação dos 327 pontos amostrais de treinamento separados por campanha.	95
4.9- Resultado da classificação dos espectros radiométricos do BDSIMA (n=327) em simulações dos sensores Hyperion e MERIS.	96
4.10- Matriz de confusão da classificação da imagem Hyperion tendo como verdade de campo as 44 amostras da campanha I.	98
4.11- Matriz de confusão da classificação da imagem MERIS tendo como verdade de campo as 73 amostras da campanha D.	105

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAA	Áreas Alagáveis da Amazônia
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer
CDOM	Colour Dissolved Organic Matter
Chl-a	Concentração de clorofila-a
COA	Componente (s) Ópticamente(s) Ativo(s)
COD	Concentração de Carbono Orgânico Dissolvido
DP	Desvio Padrão
ENVI	Environment for Visualizing Images
ER	Espectro de Referência
GEOMA	Rede Temática de Pesquisa em Modelagem da Amazônia
IVP	Infra Vermelho Próximo
LBA	Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia
LGC	Lago Grande do Curuai
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer Instrument
MLM	Modelo Linear de Mistura
POA	Propriedades Ópticas Aparentes
POI	Propriedades Ópticas Inerentes
PPI	Pixel Purity Index
RSR	Razão Sinal Ruído
SAM	Spectral Angle Mapper
SFF	Spectral Feature Fitting
SIMA	Sistema de Monitoramento Ambiental da Amazônia
SIS	Sólidos Inorgânicos em Suspensão

LISTA DE SÍMBOLOS

φ	Ângulo azimutal
Θ	Ângulo zenital
A	Coefficiente de absorção
β_b	Coefficiente de retro-espalhamento
λ	Comprimento de onda
r	Espectro de referência
t	Espectro de teste
E	Irradiância de superfície
L_p	Radiância do alvo de referência
L_t	Radiância do alvo de teste
$R\%$	Reflectância de superfície
$R(0^-)$	Reflectância de sub-superfície

1 INTRODUÇÃO

Os corpos d'água são caracterizados por baixo sinal de reflectância em função da alta atenuação da radiação pela própria água e seus componentes opticamente ativos (COA). Isso limita os estudos de ecossistemas aquáticos por sensores remotos na faixa espectral compreendida entre 400 e 900 nm (KIRK, 1994), o que inclui a região do visível e Infravermelho Próximo (IVP). Além disso, o sinal proveniente da água obtido pelo sensor é resultado da mistura, muitas vezes não linear, de sinais de COA como pigmentos fitoplanctônicos, representado pela clorofila-a (Chl-a), sólidos inorgânicos em suspensão (SIS), e carbono orgânico dissolvido (COD) (ACKLESON, 2003). Esses COA apresentam comportamentos espectrais distintos, mas com sobreposição espectral e interferência de sinal entre eles. Essas características dificultam o uso de métodos de sensoriamento remoto para o estudo das propriedades dos sistemas aquáticos continentais.

Com o advento de sensores hiperespectrais orbitais, como Hyperion, ampliou-se a possibilidade de melhor caracterização da resposta espectral da água, tanto em ambientes oceânicos como em águas continentais, o que, teoricamente permite o aprimoramento da extração de informações sobre as propriedades de corpos d'água (BRANDO e DEKKER, 2003; GIARDINO et al., 2007) por meio dos métodos atualmente empregados, como por exemplo, os modelos semi-analíticos e empíricos.

Ao contrário do que ocorre em águas oceânicas, onde modelos semi-analíticos são aplicados com maior precisão devido à maior homogeneidade das massas d'água e menor contribuição de material particulado em suspensão (KAMPEL e NOVO, 2005), em águas interiores a complexa interação entre os COA dificulta sua aplicação principalmente pela carência de medidas *in situ* das POI (Propriedades Ópticas Inerentes). De fato, as poucas medidas dessa natureza relatadas para águas continentais encontram-se em Kirk (1994) e Giardino et

al. (2007). Os primeiros dados espectrais de POI para as águas continentais brasileiras estão sendo obtidos por Costa et al. (2006) e Valério (2009). Por sua vez, modelos empíricos aplicados em diversos ambientes em todo mundo (THIEMANN e KAUFMANN, 2002; LATHROP et al., 1991) são restritos ao conjunto de dados analisados e não podem ser generalizados a outros ambientes (KUTSER et al., 2001). Em geral, ambos os métodos têm como meta a classificação de massas de água em função de intervalos de concentração de COA como em índices de eutrofização e potabilidade, por exemplo. E, por isso, outros métodos de estimativas qualitativas de COA e de classificação de massas de água podem ser com eles comparados.

Nesse sentido, uma proposta complementar aos modelos semi-analíticos e empíricos para a classificação de corpos d'água é o uso de espectros de referência que representem massas de água com propriedades limnológicas bem definidas e organizadas em classes ou tipos de água. Essa é uma estratégia amplamente difundida nos estudos de minerais e solos (DEBBA et al., 2005; van der MEER, 2004) e de alvos urbanos (MOREIRA, 2008), nos quais se associam feições espectrais a minerais e materiais específicos.

A implementação dessa estratégia a alvos aquáticos, entretanto, depende da existência de uma biblioteca de espectros de referência que esteja associada a diferentes tipos de água, ou seja, massas de água com diferentes propriedades limnológicas. O termo 'tipos de água' foi consolidado por Sioli (1984) e utilizado para discriminar basicamente 3 tipos de água na bacia hidrográfica amazônica: águas claras, com ocorrência de fitoplâncton conferindo aspecto esverdeado; águas brancas ricas em SIS; e águas pretas, com predomínio de COD (ver seção 3.2-área de estudo). Vale ressaltar que a definição dos membros de referência considerando essa tipificação é uma tarefa difícil pelo fato de a resposta de um dado COA interferir na resposta espectral de outro COA como ocorre com a Chl-a e SIS (HAN e RUNDQUIST, 1997; BARBOSA, 2005). Outro aspecto importante são as condições ambientais no momento de cada coleta

dos espectros de campo as quais podem condicionar respostas espectrais que não tenham relação com as concentrações dos COA.

Apesar das dificuldades associadas à criação membros de referência para massas de água, a hipótese dessa pesquisa é de que é possível criar, a partir de uma coleção de espectros representativos de diferentes tipos de água da bacia amazônica, uma biblioteca espectral (espectros de referência) que permita classificar os corpos de água em termos de intervalos de concentrações de COA. Assim, o termo 'tipos de água' empregado no presente estudo representa classes de água derivadas da interação, em diferentes níveis de concentração, dos tipos de água definidos por Sioli (1984) e mais o componente de variação da biomassa fitoplanctônica, expressa pela concentração de Chl-a.

Dessa forma, a construção de uma biblioteca espectral pode servir como referência para classificar corpos d'água, indicando massas d'água similares aos espectros de classes de água definidas como referência.

O objetivo deste trabalho é, portanto, definir e validar espectros de referência que sirvam para a classificação de tipos de água das AAA, a partir de espectros radiométricos de campo e de imagens hiperespectrais derivadas de sensores orbitais, como o Hyperion e o MERIS.

No capítulo 2 são abordados os conceitos relativos à resposta espectral d'água e seus COA, ao processo de aquisição de dados espectrais e às atuais abordagens de predição de COA utilizando sensoriamento remoto. No capítulo 3 apresenta-se a metodologia com a descrição dos procedimentos adotados para a organização, tratamento dos dados, definição das classes e curvas espectrais de referência que levaram à implementação da biblioteca espectral de tipos de água nas AAA. Em seguida, no capítulo de resultados apresenta-se a biblioteca espectral de água e a avaliação de seu desempenho a partir da

classificação de espectros obtidos por radiômetros, simulações de sensores orbitais e aplicação em imagens hiperespectrais. No capítulo de conclusões apresentam-se as ilações no tocante à hipótese de trabalho e aos resultados alcançados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Propriedades Ópticas da Água e de seus Componentes Opticamente Ativos

Na interação da radiação eletromagnética incidente sobre o corpo d'água pode haver absorção e retro-espalhamento seletivo dependendo da proporção de COA nele presentes (DURAND et al., 2000). O sinal captado pelo sensor é composto pela somatória da radiação absorvida e espalhada seletivamente pelos COA. Além da própria água, os outros componentes de diferentes naturezas participam da interação com a radiação incidente e contribuem para a caracterização dos coeficientes de absorção (α) e espalhamento (β) são eles: pigmentos fotossintetizantes, representados pela clorofila-a (Chl-a) presentes em organismos fitoplanctônicos; sólidos inorgânicos em suspensão (SIS); e carbono orgânico dissolvido (COD) representado por ácidos húmicos ou substâncias amarelas (JENSEN, 2000).

2.1.1 Comportamento Espectral da Água Pura

A absorção da radiação pela água pura é mínima na região compreendida entre 400 e 500 nm, passando a ser significativa a partir de 550 nm e aumentando rapidamente no infravermelho (Figura 2.1) com máximo de absorção em 750 nm. O espalhamento, ao contrário da absorção, é máximo na região do azul e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho. Além disso, a água pura apresenta alta transmitância na região do visível contribuindo para o alto coeficiente de atenuação, mencionado anteriormente, e para o baixo sinal de reflectância de massas de água (WOODRUFF et al., 1999). Esse comportamento do meio aquático limita os estudos de sensoriamento remoto a região entre 400 e 900 nm (KIRK, 1994; BARBOSA, 2005).

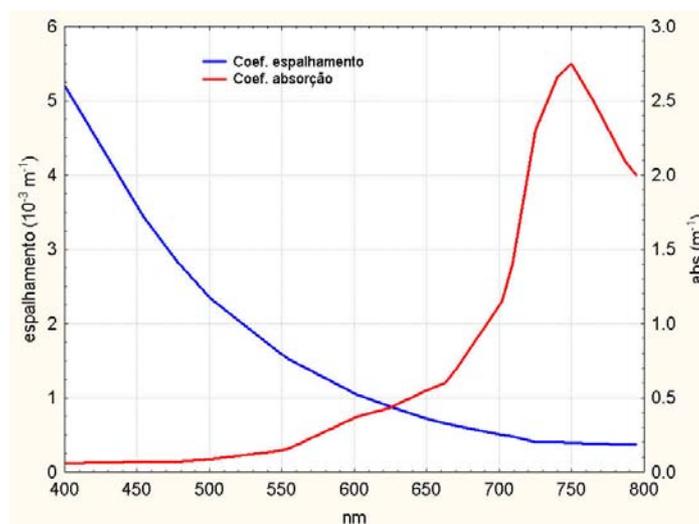


Figura 2.1 - Coeficiente de absorção e espalhamento da água pura.

Fonte : Adaptada de Dekker (1993).

2.1.2 Pigmentos Fotossintetizantes

Em geral, os pigmentos fotossintetizantes aproveitam principalmente a radiação da faixa do azul (400 a 500 nm) e do vermelho (600 a 700 nm) para o processo de fotossíntese, dessa maneira apresentam maior absorção nessas faixas do que na região espectral do verde (500 a 600 nm) (Tabela 2.1). Por isso, corpos d'água ricos em fitoplâncton apresentam coloração verde.

Tabela 2.1 - Comprimentos de onda de absorção dos pigmentos.

Pigmento	Absorção (nm)	Fluorescência (nm)	Tipo de Fitoplâncton
Clorofila a	438, 676	685	Todos os tipos
Hexa-ficoxantina	470		cianobactérias
β-caroteno	480, UV		Dinoflagelados, diatomáceas, crisófitas, cianobactérias
ficorobilina	493, 567, 627	560-570	cianobactérias
ficoeritrina	493(in vivo)		cianobactérias
c-ficoeritrina	562	570-580	cianobactérias
ficocianina	615	650-660	cianobactérias
aloficocianina	650		cianobactérias

Fonte: Adaptada de Londe (2008).

A Chl-a, presente em todos grupos de fitoplâncton, é o principal pigmento dos fotossistemas I (PSI) e II (PSII) e apresenta absorções máximas nos comprimentos de onda 440 e 675 nm (KROON, 1994). A emissão por fluorescência da Chl-a corresponde ao fenômeno conhecido por dissipação da energia em comprimentos de onda maiores em relação aos comprimentos de absorção de cada pigmento (Tabela 2.1). Esse mecanismo é uma forma de proteção da célula ao aquecimento e à degradação de proteínas da cadeia fotossintética por excesso de energia absorvida pelos pigmentos.

Além da Chl-a, como principal pigmento absorvedor e centro de reação fotoquímica, há outros pigmentos que também participam da fotossíntese, exercendo, além dessa, outras funções. Os carotenóides, representados pelo β -caroteno e presente na maioria dos grupos fitoplanctônicos, são pigmentos auxiliares da fotossíntese na absorção de energia na região azul (480 nm) e também funcionam como sistemas defensivos aos raios UV que são altamente energéticos e danosos às células.

Outro grupo importante de pigmentos é o das ficobiliproteínas presentes exclusivamente nas cianobactérias. O principal representante das ficobiliproteínas em águas continentais é a ficocianina com absorção máxima em 620 nm e fluorescência em 650 nm. São pigmentos hidrofílicos distribuídos dentro das células, não na membrana celular, como a Chl a e carotenóides. Isso permite a construção de complexos-antena (VERMAAS et al., 2008), com altas concentrações de ficobiliproteínas e, conseqüentemente, alta produtividade primária. Além disso, por se localizarem no PS II exibem proeminente pico de fluorescência em 650 nm contrastando com a absorção em 620 nm. Essa feição torna o comportamento espectral das cianobactérias diferentes dos demais grupos e, portanto, uma feição espectral diagnóstica do grupo.

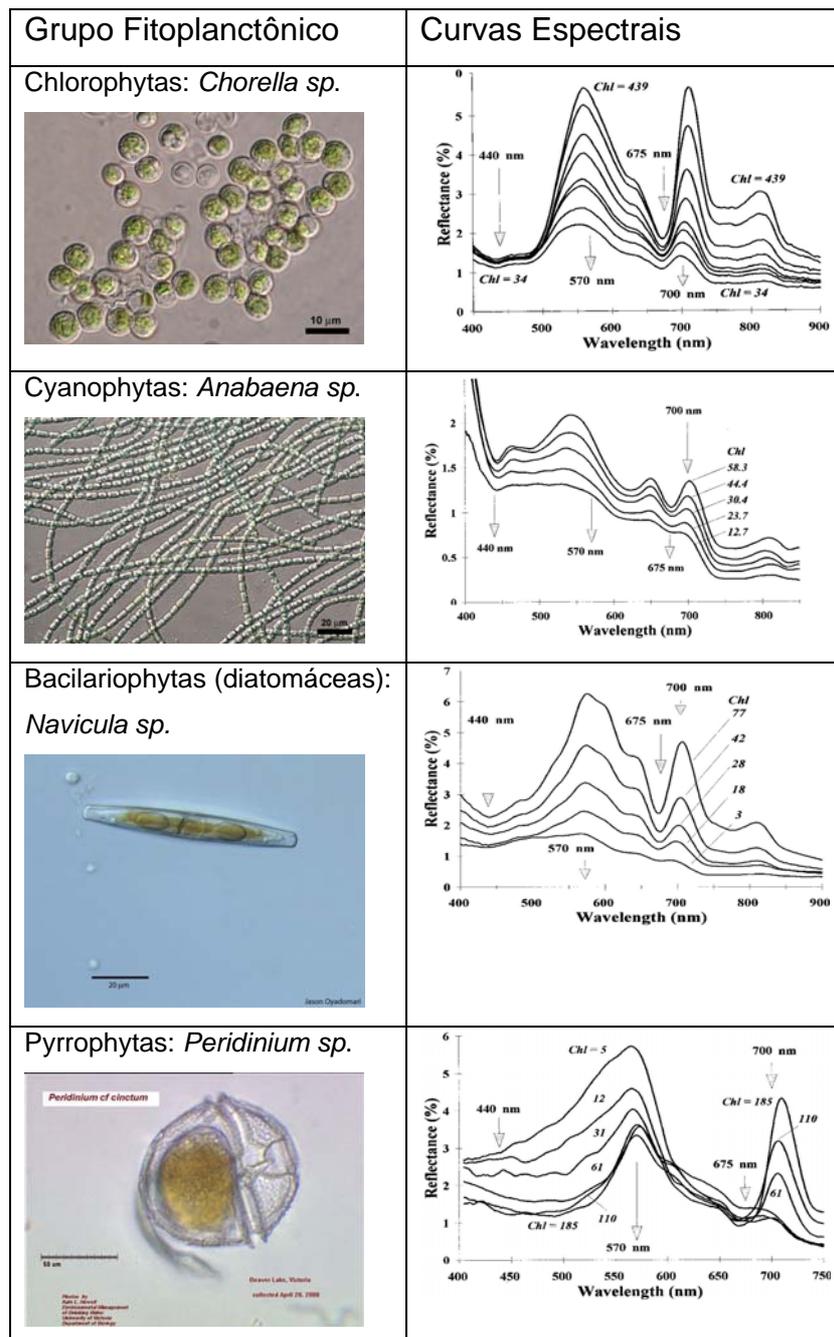


Figura 2.2 - Comportamento espectral de grupos principais fitoplanctônicos presentes em águas continentais. Fonte Adaptada de Gitelson et al. (1999). Fontes das imagens: *Chorella sp* e *Anabaena sp.* (www.butbn.cas.cz); *Navicula sp.* (www.bgsu.edu); e *Peridinium sp.* (www.glerl.noaa.gov).

De modo geral, verifica-se pela Figura 2.2 que todos os grupos apresentaram crescente reflectância na região do verde com o aumento da concentração de Chl-a devido à baixa absorção pelos pigmentos naquela região e ao processo de espalhamento interno nas células do fitoplâncton. Han (2005), Thiemann e Kaufmann (2000) e Gitelson et al. (1999) apontam os comprimentos de onda 440 e 680 nm como diagnósticos a presença de Chl-a estabelecendo-se relações proporcionais de profundidade dessas bandas de absorção com a concentração de Chl-a. Percebe-se, ainda, um sistemático aumento do espalhamento no IVP com o aumento da concentração de células em todos os grupos. Essa feição deve-se ao espalhamento da radiação pelas paredes celulares, em fenômeno similar ao elevado espalhamento de plantas no IVP devido ao espalhamento múltiplo no mesófilo, em decorrência da trajetória da radiação através de meios com índices de refração variáveis. Além disso se nota (Chlorophytas e Bacillariophytas na Figura 2.2) pequena elevação da reflectância em 810 nm devido ao espalhamento pelo material em suspensão, no caso, as células fitoplanctônicas.

No caso do fitoplâncton quanto maior o adensamento celular, por volume d'água, maior o espalhamento múltiplo pelas paredes celulares no IVP, uma vez que aumenta a probabilidade de que os fótons incidentes interajam com as células antes de interagir com a água já nos primeiros centímetros da coluna de água. Na medida em que aumenta a concentração, o fitoplâncton tende a migrar para superfície em busca de condições ótimas de luz, pois o aumento de densidade de células aumenta o sombreamento mútuo e a também disputa interna pela radiação disponível para a fotossíntese (KIRK, 1994).

2.1.3 Sólidos Inorgânicos em Suspensão

A presença de SIS é responsável pelo aumento da reflectância na região do visível e do IVP (Figura 2.3) conferindo um sinal que, muitas vezes, apresenta dominância em relação aos outros COA. Além de interferir no sinal refletido, a presença de SIS é fundamental para toda cadeia trófica, pois carrega consigo grande quantidade de material orgânico adsorvido em suas partículas como fonte de energia e nutrientes para todo sistema aquático.

Por essas características as águas com altas concentrações de SIS são atribuídas às do Caso II, enquanto, águas com baixa ou ausência de SIS são conhecidas por Caso I (KAMPEL e NOVO, 2005). Nessa divisão, as águas das AAA apresentam águas dos dois casos com misturas entre eles: no caso I, águas dos rios Tapajós e Trombetas; no caso II águas ricas em sedimento dos rios Solimões e Madeira.

A porcentagem de energia refletida na região entre 570 e 700 nm aumenta com o aumento da concentração de SIS na água e apresenta também uma elevação pronunciada em 810 nm pelo espalhamento por SIS. Outra característica marcante é que o máximo de energia refletida migra para comprimentos de onda mais longos, na medida em que há um aumento na concentração deste constituinte (Figura 2.3). Além disso, sedimentos siltosos (Figura 2.3.b) conferem maior porcentagem de reflectância ($\approx 12\%$) quando comparados com sedimentos argilosos em suspensão ($R\% \approx 5\%$), de menor granulometria (Figura 2.3.a). Diversos autores relacionam a concentração de SIS com picos de reflectância obtidos por sensores orbitais multi-espectrais (LATHROP et al., 1991; FERRARI et al., 1996) e por espectro-radiômetros de campo (HAN, 2005; e JIAO et al., 2006).

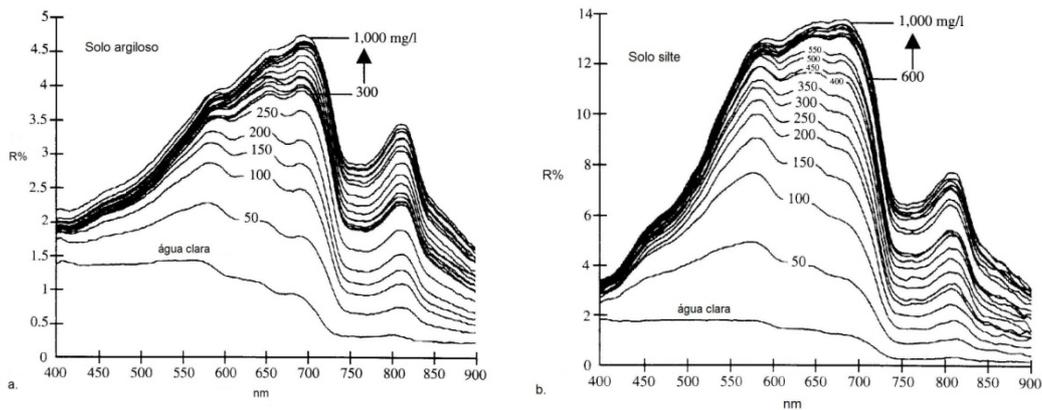


Figura 2.3 - Reflectância espectral medida *in situ* de águas claras com concentrações variáveis de 0 a 1000 mg/l de argila (gráfico a) e silte (gráfico b).

Fonte: Adaptado de Jensen (2000).

2.1.4 Material Orgânico Dissolvido

As substâncias húmicas, representantes da matéria orgânica dissolvida, são provenientes do processo de decomposição e ciclo de nutrientes de material alóctone e, freqüentemente, conferem coloração amarelada na coluna d'água. São, por isso, denominadas na literatura por CDOM (Colour Dissolved Organic Matter) e podem ser quantificadas pela presença de Carbono Orgânico Dissolvido (COD).

Enquanto a água pura apresenta um espalhamento mais intenso na faixa do azul, a presença de matéria orgânica dissolvida acarreta em absorção da radiação na faixa espectral compreendida entre 390 e 550 nm (BRICAUD et al., 1981). Este fato é notado em termos visuais no rio Negro, por exemplo, onde massas de água com concentrações elevadas de matéria orgânica dissolvida apresentam coloração mais escura e amarelada decorrente do processo de absorção do azul (restando as faixas do verde e do vermelho as quais somadas resultam visualmente em amarelo) (BRICAUD et al., 1981).

2.1.5 Interação entre COA

Os modelos de predição dos COA em águas continentais (Caso II), ao contrário do que ocorre em águas Caso I, têm encontrado dificuldade pelo fato desses corpos d'água apresentarem além Chl-a, elevadas concentrações de sólidos inorgânicos em suspensão (SIS), os quais exercem influências significativas sobre as propriedades ópticas da água (RANDOLPH, 2007; HELLWENGER et al., 2004). Na Figura 2.4 são representados espectros de águas ricas em Chl-a com variadas concentrações de SIS (de 0 a 500 mg/l). Em função do aumento da concentração de SIS observa-se elevação da reflectância entre 550 e 650 nm com o pico de máxima reflexão migrando da região do verde (560 nm) para o IVP (710 nm). Nota-se ainda que a banda de absorção típica de Chl-a se mantém em 675 nm mas há aumento de contraste em relação ao espalhamento máximo em 705 nm.

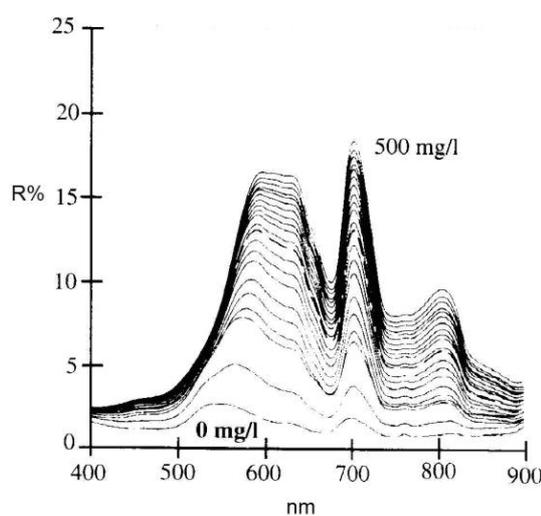


Figura 2.4 - Porcentagem de reflectância de água rica em CHL-a com variável concentração de SIS (0 a 500 mg/l).

Fonte: Adaptado de Jensen (2000).

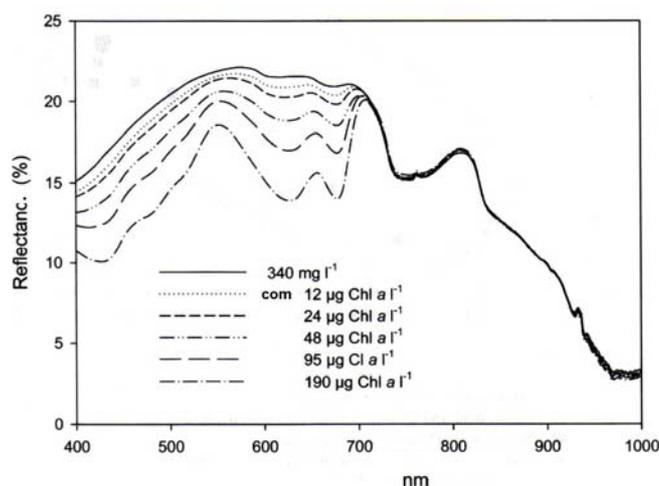


Figura 2.5 - Curvas espectrais de água rica em SIS (340 mg/L) e variável concentração de Chl-a (0 a 190 µg/L).

Fonte: Adaptado de Svàb et al, 2005.

Na situação em que se manteve alta a concentração de SIS (340 mg/L) aumentando-se progressivamente a Chl-a (Figura 2.5) observa-se que a presença de SIS eleva a porcentagem de reflectância na região do visível como um todo, e mascara a feição de Chl-a nas concentrações mais baixas (<25 µg/L). Isso demonstra a dificuldade em se identificar as feições de Chl-a quando ocorre em massas d'água com altas concentrações de SIS. Além disso, é possível verificar que o pico de espalhamento em 810 nm não é alterado indicando que a saturação do espalhamento nesse comprimento de onda foi saturada pela presença de SIS.

2.2 Aquisição de Dados Hiperespectrais

2.2.1 Sensores de campo (*in situ*)

Para se obter a porcentagem de reflectância do alvo aquático, a partir de sensores remotos manuais, mede-se o total de energia refletida do corpo d'água (radiância do alvo) e divide-se pelo total de energia incidida no corpo d'água (irradiância). Segundo Milton (1987) o cálculo do fator de reflectância de superfície (R) é efetuado, para cada comprimento de onda do sensor, ao se dividir a radiância medida do alvo (L_t) pela irradiância (E), dado os ângulos azimutais (ϕ) e zenitais (Θ). No entanto, como alternativa a medida direta da irradiância no alvo, mede-se a radiância de uma placa de referência (L_p), cujo comportamento espectral é conhecido. Dessa forma, o fator de reflectância (R) também denominado porcentagem de reflectância (R%) é calculado (Equação 2.1).

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_t(\theta_r, \phi_r)}{dL_p(\theta_r, \phi_r)} k(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \quad (2.1)$$

A radiância medida do alvo (L_t) é composta não só da radiância proveniente do corpo d'água que carrega consigo informações dos COA (letras A, B, C e E da Figura 2.6), mas também de interferências provenientes de radiância atmosférica difusa, reflexão especular da superfície da água e em casos de águas rasas, radiância de fundo (letra D da Figura 2.6). Assim, os procedimentos de aquisição das curvas espectrais – reflectância em cada banda espectral - devem ser padronizados de forma a minimizar ao máximo as influências de radiação de outras origens.

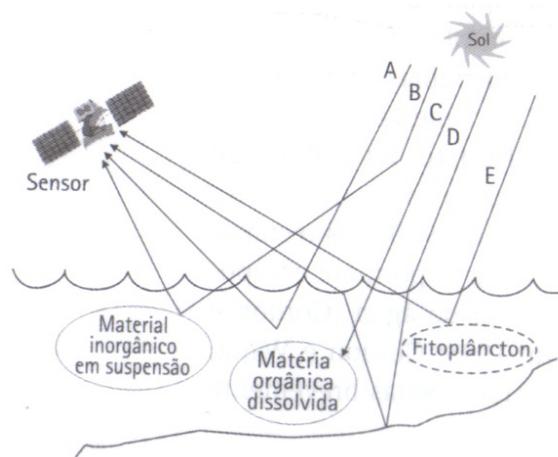


Figura 2.6 - Fatores que influenciam a luz emergente ascendente do corpo d'água: A) retroespalhamento pelas moléculas de água; B) retroespalhamento pelo material inorgânico em suspensão; C) absorção pela matéria orgânica dissolvida; D) reflexão de fundo; E) retroespalhamento pelo fitoplâncton.

Fonte: Adaptado de Kampel e Novo, 2005.

Como se trata de uma propriedade óptica aparente (POA), a reflectância é dependente, portanto, das condições de iluminação – ângulos azimutais (φ) e zenitais (Θ) - e visada do sensor no ato de coleta da informação. O que pode levar a resultados diferentes registros de um mesmo corpo d'água efetuados sob diferentes condições de iluminação e geometria de aquisição de dados. Por isso, alguns fatores ambientais são determinantes na radiância do alvo (L_t) medida. Por exemplo, Jiao et al.(2006) considerou a velocidade do vento na modelagem da reflectância calculada, sendo que sob regimes de ventos mais intensos a contribuição da reflexão especular da superfície da água é maior. Han (2005) ressalta a importância das condições do tempo (climático), isto é, coberturas de nuvens, sombras e outros.

Outro fator importante é a geometria de aquisição de dados que deve sempre evitar sombreamento da embarcação sobre a coluna d'água a ser medida, e com correta dos ângulos zenital (45°) e azimutal (90° em relação ao sol) de modo a minimizar as contribuições de reflexão especular. Além disso, o horário

de tomada das medidas bem como o dia do ano deve ser anotado, pois fornecem valiosas informações a respeito das condições de iluminação.

2.2.2 Sensores Orbitais

No caso de sensores hiperespectrais a bordo de satélites orbitais a interferência atmosférica é praticamente a mesma em toda imagem, já que a aquisição dos espectros em cada pixel é instantânea, com exceção às regiões da imagem com presença de nuvens. Isso garante a padronização de aquisição dos espectros da imagem, o que dificilmente se consegue com sensores manuais (de campo). Por outro lado, as interferências da atmosfera como espalhamento difuso e absorção seletiva da radiação pelo vapor de água, é maior do que em sensores manuais, pois a radiação atravessa duas vezes atmosfera em seu trajeto fonte-alvo-sensor.

Além disso, o cálculo da reflectância de superfície em imagens, processo denominado correção atmosférica, envolve o cálculo da irradiância (E), a partir da informação de hora e data do imageamento, e não a medição indireta como nos sensores manuais (JIAO et al., 2006).

2.3 Métodos de Estimativas de COA Utilizando Dados Hiperespectrais

Diversos métodos e abordagens vêm sendo aplicados a dados hiperespectrais para a predição qualitativa e quantitativa das concentrações de COA. Em geral, esses métodos visam, em última instância, a classificação de massas de água em função de intervalos de concentrações de COA, como em índices de eutrofização (CARLSON, 1977). Por apresentarem essa finalidade em comum eles podem ser considerados diferentes meios de se alcançar o objetivo comum de classificação de tipos de água. Dessa forma, os métodos que utilizam dados hiperespectrais para estimar tanto qualitativa como quantitativamente são apresentados nesta Seção.

2.3.1 Modelos Empíricos

Um método de estimativa quantitativa de COA bastante difundido na literatura se refere ao uso de regressões lineares que correlacionam comprimentos de onda específicos, razões de bandas ou análises derivativas de dados hiperespectrais com concentrações dos COA (LATHROP et al., 1991). Por exemplo, Han e Rundquist (1997) estimaram a concentração de Chl-a em um reservatório de Nebraska a partir de duas regressões empíricas. A primeira, utilizando a razão de bandas entre 705/670 nm gerou algoritmo com coeficiente de determinação igual a 95%, e a segunda, utilizando a primeira derivada em 690 nm gerou algoritmo de estimativa de Chl-a com $r^2=0.93$. Rudorff et al. (2007) estabeleceram algoritmo, a partir da análise derivativa em 691 nm, que estima a Chl-a em águas das AAA com $r^2=0,73$. Já para a concentração de SIS os autores utilizaram a derivativa em 711 nm e geraram algoritmo que explica 86% da variação de SIS.

Esta abordagem empírica é muito utilizada, mas quantitativamente, os coeficientes dos modelos gerados são significativos somente para o conjunto de dados para os quais eles foram derivados. Isto significa que estes coeficientes não podem ser extrapolados para outras regiões de estudo. Quando este for o caso, uma calibração se faz necessária para este novo conjunto de dados. Rudorff et al. (2007) conclui que os algoritmos empíricos determinados a partir da primeira derivada espectral para estimar SIS ou Chl-a nas AAA com dados do período de cheia não poderiam ser usados para produzir estimativas confiáveis para o período de vazante.

2.3.2 Modelos Semi-Analíticos

Modelos semi-analíticos, por sua vez, relacionam os coeficientes de absorção (α) e retro-espalhamento (β), descritos anteriormente (seção 2.1), com a reflectância de subsuperfície (***RO-***) obtida por sensores imersos na coluna

d'água. Gordon e Morel (1983), utilizando-se desses conceitos, realizaram simulações de Monte Carlo e chegando à seguinte relação (Equação 2.2).

$$R(0;\lambda) = C \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (2.2)$$

Onde $R(0-)$ é a reflectância de subsuperfície no comprimento de onda λ ; $a(\lambda)$ coeficiente de absorção total e $b_b(\lambda)$, coeficiente de retroespalhamento; C é um coeficiente que varia com as condições de iluminação.

A reflectância de subsuperfície $R(0-)$ é um parâmetro chave na ligação entre as propriedades da água e a radiância medida pelo sensor, pelo fato de se relacionar diretamente com as propriedades físicas do meio aquático, de não conter a reflectância especular, e de ser independente das variações de irradiância (BARBOSA, 2005). Por isso, esses modelos que são baseados em $R(0-)$ são válidos não só para o momento e local da coleta, mas podem ser também relacionados com todo o ambiente aquático em estudo (BRANDO e DEKKER, 2003; FERRARI et al., 1996)

Essa abordagem de estimativa quantitativa de COA necessita, no entanto, de medidas específicas das propriedades de absorção e espalhamento de cada um dos COA presente no corpo d'água em estudo, conhecidas como Propriedades Ópticas Inerentes (POI). Ao contrário das POA, as POI não são dependentes das condições de iluminação e geometria de aquisição dos dados e, por isso, podem ser mantidas fixas. Por outro lado, essas POI não podem ser generalizadas a qualquer ambiente aquático e, especificamente, para as AAA os primeiros trabalhos utilizando esta abordagem estão sendo realizados por Costa et al. (2008) e Valério (2009).

2.3.3 Métodos de Classificação que Utilizam Espectros de Referência – Biblioteca Espectral

Alguns métodos de estimativa qualitativa de COA, ou mesmo de classificação de alvos terrestres, são realizados a partir de curvas espectrais de referência, as quais podem ser obtidas em laboratório, no campo e na própria imagem digital. Um conjunto de curvas espectrais de referência que representem alvos, materiais ou estados dos materiais é denominado biblioteca espectral.

Qualquer método de classificação que utilize uma biblioteca espectral é por sua vez um método supervisionado. Cooley et al. (2003) define métodos de classificação derivados de bibliotecas espectrais como, essencialmente, uma versão moderna de classificação supervisionada.

As primeiras aplicações de bibliotecas espectrais foram feitas em estudos de laboratórios para identificação de bandas de absorção específicas de materiais de química analítica utilizando espectroscopia de laboratório (STEIN, 1995).

Por sua vez, a construção de uma biblioteca espectral em estudos de sensoriamento remoto abre a possibilidade de integração de dados hiper-espectrais *in situ* com dados hiper-espectrais orbitais para direta identificação e discriminação de classes dos alvos em estudo (van de MEER, 2004). Uma maneira de realizar essa integração é obter uma biblioteca espectral que retrate as diferentes características dos alvos quanto ao formato da curva espectral, bandas de absorção específicas, variabilidade e similaridade das curvas espectrais.

Diversas bibliotecas espectrais de alvos naturais ou antrópicos estão disponíveis para uso público (BALDRIDGE et al., 2009; MOREIRA, 2008). Elas são fonte de espectros de referências que auxiliam interpretações de imagens multi e hiperespectrais. Em geral, estão disponíveis em aplicativos comerciais usados para análise de imagens hiper-espectrais na identificação de minerais,

solos e vegetação (KRUSE et al., 1993), mas não existem, atualmente, bibliotecas espectrais para ambientes aquáticos. Além disso, uma biblioteca espectral bem representativa do alvo que se deseja identificar e quantificar deve conter membros de referência suficientes para acomodar uma alta variabilidade do material em estudo, neste caso, a variação da concentração dos COA presentes nos corpos d'água continentais.

De modo a preencher essas lacunas, alguns autores como Kutser et al. (2006), criaram uma biblioteca espectral para distinguir tipos de algas bentônicas na costa da Estônia. As medidas de espectro das macroalgas de espécies de 3 grandes grupos de algas - verdes, marrons e vermelhas - foram realizadas fora da embarcação após coleta de alguns indivíduos. Seus resultados indicaram a viabilidade de distinção de três grupos de macroalgas bentônicas, vermelhas, marrons e verdes. Em nível de espécie, no entanto, não houve distinção clara indicando que o método é viável mais apresenta algumas limitações de identificação correta dos alvos e materiais. Os autores sugerem que apenas sensores hiperespectrais com razão sinal-ruído (RSR) acima de 1000:1 são aplicáveis à distinção espectral de alvos em ambientes aquáticos.

2.4 Spectral Angle Mapper (SAM)

O mapeamento por ângulo espectral (SAM em inglês) é um algoritmo que determina a similaridade espectral entre dois espectros calculando o ângulo entre eles em todas as bandas espectrais (Figura 2.7), tratando os espectros como vetores em um espaço de dimensionalidade igual ao número de bandas espectrais. Este processo pode ser descrito pela Equação 2.3 (apud BARBOSA, 2005).

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{1/2}} \right) \quad (2.3)$$

onde nb é o número de bandas; t o espectro em teste; r o espectro de referência, e α o grau de similaridade entre os espectros.

A implementação desta equação para comparar dois espectros é a seguinte: 1) define-se um espectro de referência (r); 2) seleciona-se um espectro teste (t), a ser comparado; 3) faz-se o somatório do produto de cada banda espectral (t_i) por cada banda espectral (r_i), obtendo-se o numerador; 4) faz-se o somatório do valor ao quadrado de cada banda (t_i), e extrai a raiz quadrada deste somatório; 5) faz-se o somatório do valor ao quadrado de cada banda (r_i), e extrai a raiz quadrada deste somatório; 6) multiplica-se o resultado de 4 pelo resultado de 5; 7) divide-se o resultado de 3 pelo resultado de 6; 8) calcula-se o arco-coseno do resultado obtido em 7, obtendo-se um número entre zero e um, que quantifica o grau de similaridade ou correlação entre o espectro t e o espectro r . Valores próximos de zero indicam maior similaridade.

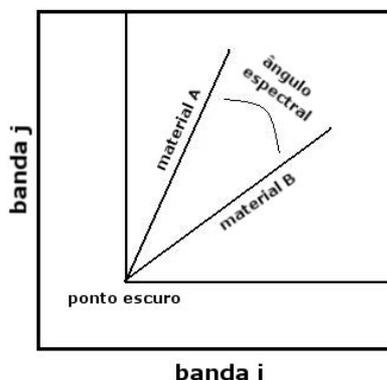


Figura 2.7 - Representação do funcionamento do classificador por ângulos espectrais

Fonte: Adaptada de Sohn e Rebello, 2002.

Uma característica importante desta medida, é que ela não é sensível a diferenças de amplitude entre os espectros, ela está relacionada somente com a forma do espectro. Além disso, pelo fato deste classificador estar implementado em diferentes softwares (Microsoft Excel e ENVI), é possível realizar comparações entre dados espectrais de radiômetros manuais e de

imagens hiperespectrais utilizando o mesmo algoritmo. Contudo, como geralmente ocorre com as técnicas supervisionadas, o algoritmo é bastante sensível a escolha do conjunto de treinamento (espectros de referência). Daí a necessidade de se formar uma biblioteca espectral que seja o mais representativa possível das diferentes feições espectrais presentes no conjunto de dados que se deseja classificar.

Um levantamento sobre o uso da técnica de mapeamento por ângulo espectral, aplicada aos dados de sensoriamento remoto, mostra que a partir de 1993, vários trabalhos foram realizados. Esta técnica que vem sendo aplicada principalmente na área mineralogia (KRUSE et al., 1993) para identificação de minerais, utilizando para isto uma biblioteca de assinaturas espectrais, e em aplicações que envolvem estudo de vegetação. O software ENVI, por exemplo, contém uma biblioteca com assinatura espectral de 160 minerais, no intervalo de 0.4 a 2.5 nm. O Jet Propulsion Laboratory da NASA possui uma biblioteca espectral com quase 2000 espectros de materiais naturais e artificiais, para suporte na utilização de dados do sensor ASTER. Moreira (2008) estabeleceu curvas de referência de alvos urbanos de diferentes materiais, tais como, alvos de aço galvanizado, alumínio, PVC e cerâmica de argila, os quais apresentam diferentes respostas espectrais. O autor utilizou essas curvas como referência para classificar imagens hiperespectrais através dos classificadores SFF e SAM. Ele conclui que, em geral, para alvos urbanos o classificador SAM é mais eficiente.

Poucos são os trabalhos que aplicaram o classificador SAM utilizando uma biblioteca espectral em ambientes aquáticos. Kutser et al. (2006) utilizou uma biblioteca espectral de 10 ER com concentrações crescentes de CHI-a em cianobactérias para mapear e quantificar uma floração de cianobactérias em imagem Hyperion do mar Báltico. Os ER foram calculados pelo modelo semi-analítico, cujas POI de entrada do modelo foram obtidas em florações de cianobactérias no próprio Báltico. Lobo et al. (2009) identificaram e classificaram florações de cianobactérias em imagem Hyperion da Lagos dos

Patos (Rio Grande do Sul) utilizando dois conjuntos de ER: um empírico, em que os ER foram obtidos por radiômetro num reservatório submetido à florações de cianobactéria; e o outro teórico semi-analítico (KUTSER et al., 2006). A precisão de similaridade entre os dois conjuntos foi de 81%, o que indica a grande semelhança entre as bibliotecas testadas e aplicabilidade de bibliotecas espectrais a ecossistemas aquáticos.

Ambos os trabalhos sugerem que é possível criar, a partir de uma coleção de espectros representativos de diferentes tipos de água, um conjunto de espectros de referência – denominado biblioteca espectral - que permita classificar os corpos de água em termos das concentrações e tipos de componentes opticamente ativos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A região de estudo compreende o conjunto de sistemas lóticos e lênticos das Áreas Alagáveis da Amazônia (Figura 3.1), uma região com cerca de 1 000 000 km² (HESS et al., 2003) e mais de 10 000 lagos (SIPPEL et al., 1994) e que está sujeita ao processo de inundação sazonal, conhecido como pulso de inundação (JUNK et al., 1997). Esse processo confere à região uma complexa interação de águas com diferentes propriedades físicas, químicas e biológicas provenientes de bacias hidrográficas que drenam regiões com diferentes características geomorfológicas. O principal rio, o Amazonas, é formado pela confluência do rio Solimões, originário dos Andes peruanos, com o rio Negro vindo do escudo das Guianas. Atravessa uma extensa planície com baixo desnível altimétrico e com vastas coberturas florestais.

Duzentos quilômetros à jusante do Rio Negro, o rio Amazonas se encontra com o rio Madeira, vindo dos Andes bolivianos. Os tributários que encontram o rio no médio Amazonas, Trombetas, Tapajós e Xingu são oriundos do escudo brasileiro. Os tributários são classificados, segundo Sioli (1984) de acordo com a presença de matéria orgânica dissolvida e material em suspensão. O rio Negro e outros tributários de águas pretas são caracterizados por alto nível de substâncias húmicas dissolvidas e baixa concentração de material particulado em suspensão. Os rios de águas brancas, como o Solimões e o Madeira, apresentam alta concentração de sólidos inorgânicos em suspensão devido ao processo erosivo intenso nas cordilheiras dos Andes. Os rios de águas claras como o Xingu, Tapajós e Trombetas são caracterizados por uma alta produção fitoplanctônica, comparável com os lagos da várzea, e baixa concentração de SIS.

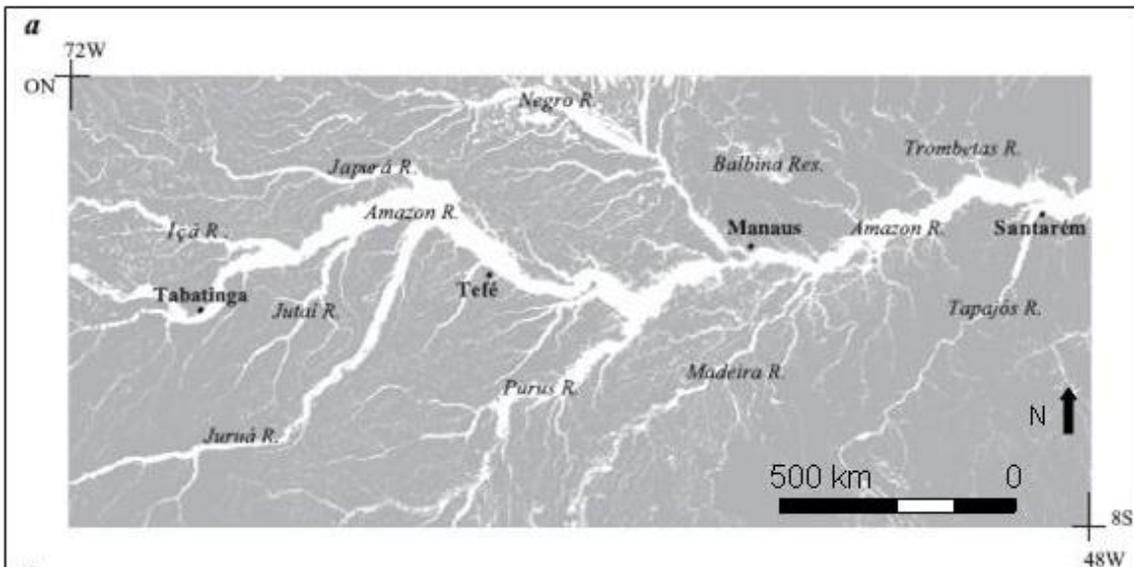


Figura 3.1 - Mapa da região de estudo (em branco) referente às Áreas Alagáveis da Amazônia.

Fonte: Adaptada de Hess et al., (2003).

3.2 Metodologia

O procedimento do trabalho pode ser subdividido em quatro etapas. A primeira consistiu em alimentar o banco de dados SIMA (já existente e depositado em servidor do SERE/INPE) a partir de dados obtidos em 9 campanhas de campo para amostragem da água de sistemas aquáticos das áreas alagáveis da Amazônia entre 2000 e 2006. A segunda etapa do trabalho consistiu na definição e caracterização das curvas espectrais de referência da biblioteca espectral. Em seguida a biblioteca foi validada com os pontos previamente separados. Por fim, a biblioteca espectral foi utilizada para a classificação de imagens digitais dos sensores orbitais Hyperion e MERIS.

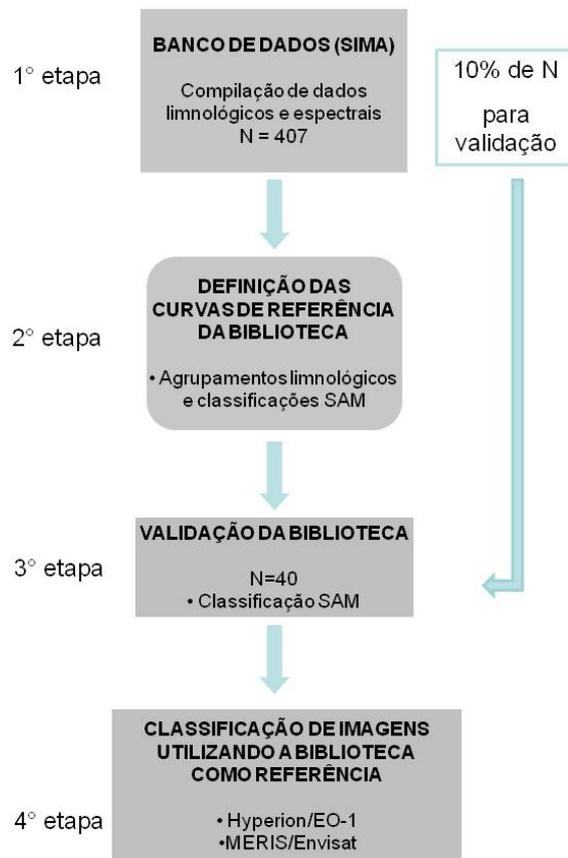


Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia dividida em quatro etapas.

3.2.1 Banco de Dados e Campanhas

Inicialmente foram compilados dados de espectros radiométricos, bem como, dados limnológicos de 9 campanhas realizadas nas AAA no período compreendido entre 2000 e 2006. As campanhas de A a E foram realizadas no Lago Grande do Curuai (LGC), no âmbito da tese de Barbosa (2005), nas quais se amostrou elevado número de amostras com diversas medidas de variáveis limnológicas e de maneira padronizada, ou seja, alta comparabilidade entre elas. Na campanha F foram realizadas, em 2000, coletas em lagos adjacentes aos principais rios (Solimões e Amazonas) com predomínio de matéria orgânica dissolvida, isto é, coloração escura da água (NÓBREGA, 2005). As

campanhas G e H tiveram por objetivo definir propriedades ópticas inerentes (POI) dos principais rios das AAA (COSTA et al., 2008). A nona e última campanha compilada foi realizada em junho de 2005 no âmbito da dissertação de Rudorff (2006). Nesta campanha (I) foram amostradas 44 estações de coleta em corpos d'água com diferentes características limnológicas localizados próximos Santarém/PA. Maiores informações sobre as campanhas podem ser encontradas no Apêndice A.

Para facilitar a manipulação e processamento de um grande número (N) de dados espectrais e limnológicos de massas d'água, as informações compiladas foram depositadas em um BD (Banco de Dados) SIMA (Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental). O BD SIMA foi criado com objetivo de centralizar e organizar os dados obtidos em corpos d'água continentais obtidos no âmbito dos programas FURNAS, Rede GEOMA, LBA e outros. Dentre as informações contidas no banco estão: coordenadas dos pontos; variáveis limnológicas e dados espectrais em porcentagem de reflectância (R%) da faixa entre 390 a 900 nm. Além disso, constam também informações relevantes sobre as condições atmosféricas e ambientais tais como, presença de nuvens, ventos e horário de amostragens. A Tabela 3.1 resume as características das propriedades limnológicas do conjunto de dados organizados para essa pesquisa.

Tabela 3.1 - Variáveis limnológicas compiladas para essa pesquisa provenientes das 9 campanhas. Indicação do número amostral total, média, mínimo, máximo e desvio padrão (DP) de cada variável.

Variável	Abreviação	Unidade	N	média	mínimo	máximo	SD
Sólidos Orgânicos em Suspensão	SOS	mg/L	292	24,6	1,3	130,7	29,5
Sólidos Inorgânicos em Suspensão	SIS	mg/L	292	147,2	0,0	1007,1	218,0
Sólidos Totais em Suspensão	STS	mg/L	400	135,1	1,4	1137,8	221,1
Clorofila-a	Chl-a	µg/L	400	20,1	0,2	204,3	25,1
Feofitina	Feo	µg/L	57	2,4	0,5	5,4	1,2
Absorção em 440 nm	a440		57	1,3	0,0	10,6	2,4
Carbono Inorgânico Dissolvido	CID	ppm	283	7,8	0,2	22,0	6,7
Carbono Orgânico Dissolvido	COD	ppm	283	5,5	1,0	11,4	1,6
Carbono Total Dissolvido	CTD	ppm	44	8,0	2,9	12,0	2,0
Nitrogênio Total	NT	µg/L	61	472,8	47,6	1787,1	389,5
Fósforo Total	PT	µg/L	61	38,1	7,8	86,9	15,5
Profundidade		m	269	4,4	0,4	23,5	4,2
Profundidade de Secchi	Secchi	m	404	0,6	0,0	4,0	0,7
Temperatura da água	Temperatura	°C	379	26,6	23,0	30,7	10,4
Potencial hidrogeniônico	pH		379	7,0	4,7	9,7	0,8
Condutividade Elétrica	CE	mS/cm	379	45,3	2,0	105,0	19,6
Oxigênio Dissolvido	OD	mg/L	311	5,9	0,6	11,3	1,7
Turbidez		NTU	311	271,5	2,0	999,0	328,0

É importante ressaltar que os dados compilados foram adquiridos em campanhas realizadas com diferentes objetivos, por diferentes pesquisadores, e com protocolos de aquisição de dados não uniformes. Dessa forma, há algumas diferenças quanto às variáveis amostradas e ao procedimento de análises das mesmas. No entanto, as principais variáveis – Chl-a, SIS, COD - que estão relacionadas com os COA foram amostradas em quase todas campanhas e os métodos aplicados para a determinação da concentração desses COA são comuns a todas.

Os dados espectrais foram obtidos, na maioria das estações amostrais, com auxílio do espectrorradiômetro manual Spectron SE-590®. Este sensor

apresenta 160 bandas de 3 nm de largura entre 400 e 900 nm com RSR (razão sinal:ruído) elevada (STEFFEN, 1996). Apenas nas campanhas G e H foi utilizado o espectrorradiômetro FieldSpec HandHeld® que apresenta características semelhantes ao primeiro e, por isso, suas medidas radiométricas são comparáveis às medidas realizadas pelo Spectron SE-590.

3.2.2 Análise de Consistência dos Dados

Uma vez compilados no BD SIMA os dados espectrais e limnológicos das 9 campanhas supracitadas, totalizando 407 pontos amostrais, realizou-se a triagem dos dados visando eliminar inconsistências que pudessem comprometer o desenvolvimento das etapas posteriores. A partir da análise de consistência dos dados foram eliminadas 25 amostras (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Número amostral total e número de pontos eliminados por inconsistência em cada campanha.

Campanha	pontos amostrais	pontos eliminados por inconsistência	Resultado
A	25	4	21
B	72	2	70
C	71	0	71
D	74	5	69
E	19	0	19
F	61	14	47
G	12	0	12
H	29	0	29
I	44	0	44
total	407	25	382

As inconsistências se devem a fatores que interferem na resposta espectral no ato da medição. Por exemplo, na campanha F, da qual foram eliminadas 14 curvas espectrais, identificou-se que estas apresentavam espectros contaminados pela reflexão especular da radiação difusa (sky reflectance ilustrada na Figura 3.3 b) com alta reflectância na região espectral do azul em ambientes lênticos com baixa incidência de ventos (Figura 3.3 a).

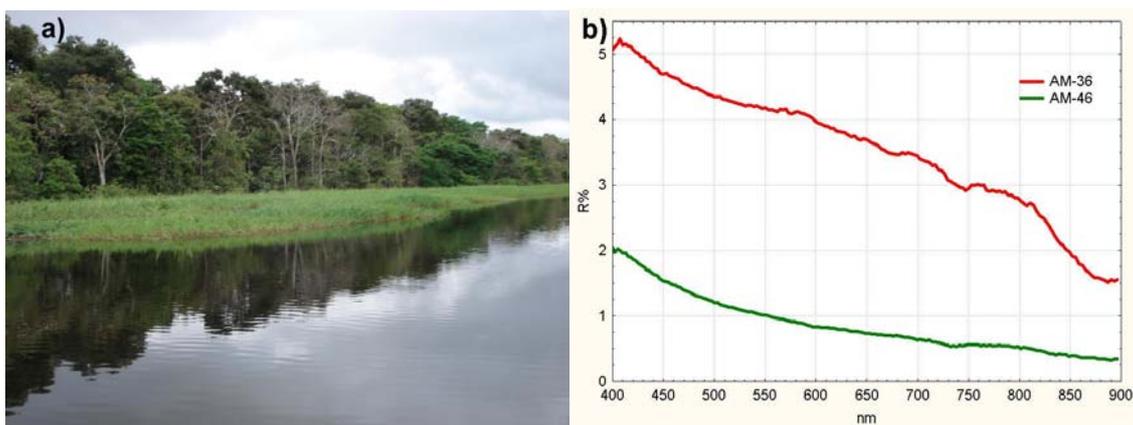


Figura 3.3 - Massa d'água com predomínio de matéria orgânica dissolvida e com forte componente de reflexão especular (a), que pode contaminar a medida espectral na região do azul entre 400 a 500 nm (b).

Além disso, variações da radiação incidente, devido a nuvens e ao espalhamento atmosférico, no momento da aquisição das curvas espectrais condicionam respostas espectrais inconsistentes como observadas nas campanhas A, ponto PCS37, e D, pontos PCJ81 e 91 (Figura 3.4). Essas variações permitem que o sinal registrado pelo sensor receba maior contribuição da radiação atmosférica, principalmente nos comprimentos de onda da região do azul. A interferência atmosférica também pode ser notada na região do vermelho, provocando variações no espectro decorrentes de mudanças, às vezes instantâneas, no momento da amostragem como ventos e nebulosidades.

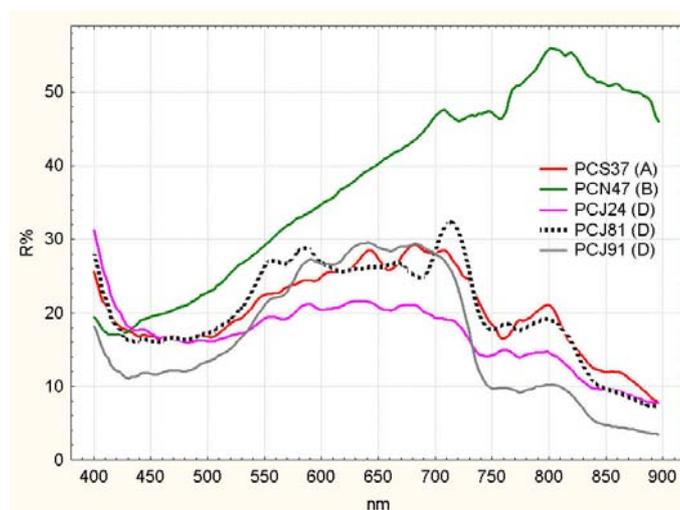


Figura 3.4 - Exemplos de dados espectrais inconsistentes das campanhas A, B e D.

Outra inconsistência dos dados espectrais verificada é referente às curvas que apresentam reflectância superiores a 25% (ponto PCN47, da campanha B), o que não é condizente com a resposta espectral de corpos d'água (JENSEN, 2000). Dessa forma, os espectros que apresentaram em qualquer região do espectro valores superiores a 25% foram eliminados, situação encontrada em espectros da campanha B e D, que indicam contaminação do sinal emergente da água com sinais do ambiente (barco, plantas das margens, plantas submersas e flutuantes).

3.2.3 Definição das Classes de Água

Após a eliminação dos dados inconsistentes foram sorteados, aleatoriamente, mas garantindo a participação de amostras das 9 campanhas, 40 pontos amostrais para posterior validação da biblioteca definida. Em seguida iniciou-se o processo de definição dos tipos de água integrantes da biblioteca espectral (Figura 3.5) através de agrupamentos das amostras em categorias limnológicas.

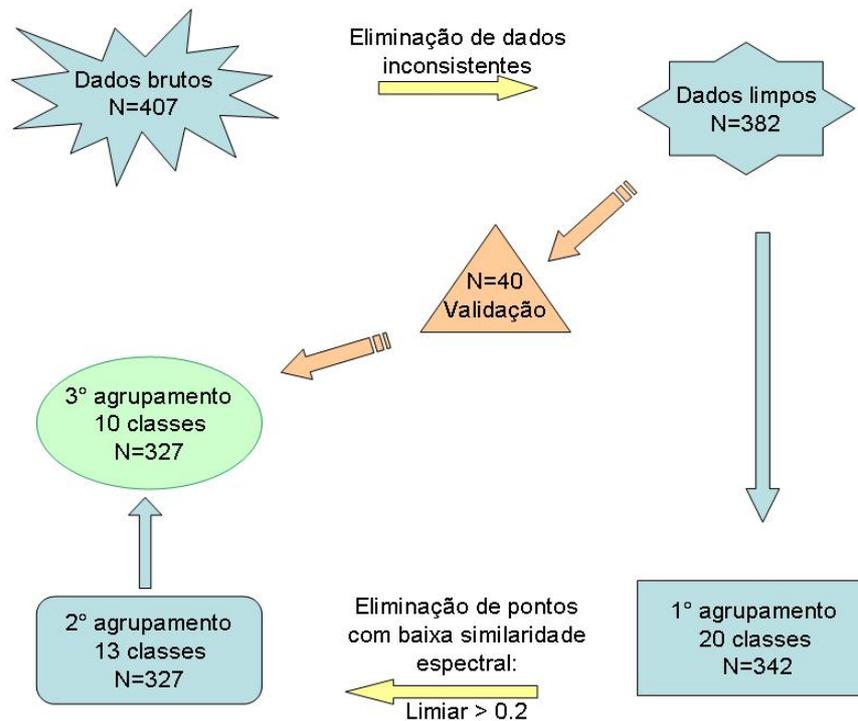


Figura 3.5 - Seqüência de tratamento do conjunto de dados até a definição das classes da biblioteca espectral.

O processo de definição dos tipos de água foi feito de modo iterativo, buscando estabelecer a correspondência entre as propriedades limnológicas e espectrais das massas de água.

Para isso definiram-se intervalos equitativos de concentrações de Chl-a, SIS e COD, de tal modo que apresentassem um número semelhante de amostras para garantir a representatividade dos três COA. Em seguida, os intervalos criados para cada uma dos 3 COA foram combinados para gerar categorias ou classes de água com diferentes propriedades limnológicas.

Definiram-se, inicialmente, 6 intervalos de concentração de Chl-a (de 0 a 5; de 6 a 10 $\mu\text{g/L}$; 11 a 25; 26 a 50; 51 a 75; e 76 a 150 $\mu\text{g/L}$) e 6 intervalos de concentração de SIS (até 10 mg/L ; 11 a 50; 51 a 100; 101 a 300; 301 a 500; e

acima de 500 mg/L) ilustrados esquematicamente na Figura 3.6.a. Devido à escassez de dados, foram definidos apenas 2 intervalos para a concentração de COD que representam, basicamente, ausência (até 3 ppm de COD) e presença (superior a 3 ppm) de COD, sendo que o primeiro intervalo só foi atribuído à uma classe. Combinando os intervalos propostos e considerando a falta de pontos amostrais para representar todas as classes possíveis dos cruzamentos foram geradas inicialmente 20 classes de água (Figura 3.5). Nem todas as combinações possíveis dos intervalos dos três COA possuem amostras (Figura 3.6a), por exemplo, a classe resultante da combinação da concentração mínima de COD e máxima de SIS não possuíam amostras e, portanto, foi descartada.

Para avaliar se as classes definidas limnologicamente eram representadas adequadamente por um dado espectro de referência, ou seja, se era possível discriminá-las quanto à resposta espectral, foi gerada a curva espectral média de cada categoria (Figura 3.6.b). Essas curvas médias serviram de referência para classificar cada uma das 327 curvas (Figura 3.6.c) e verificar o desempenho da classificação, ou seja, verificar se havia distinção espectral entre as classes limnológicas pré-definidas. Essa verificação foi realizada pela análise da matriz de confusão, tendo como verdade de campo as classes limnológicas anteriormente definidas (Figura 3.6.d). O intervalo espectral utilizado nesse processo foi de 400 a 900 nm e o limiar de aceitação do classificador SAM foi de 0,125 radianos. Procurou-se utilizar um limiar rigoroso quando comparado com o limiar de 0,5 (KUTSER, 2006) para garantir uma alta coerência e precisão da classificação.

Ao término de cada iteração de treinamento (processo de agrupamento seguido de classificação SAM), se classes limnológicas distintas estivessem representadas por espectros semelhantes, estas seriam re-agrupadas mantendo-se as propriedades das massas de água. Por exemplo, se uma categoria com concentração de SIS acima de 500 mg/L e concentração de Chl-

a < 10 µg/L fosse atribuída espectralmente à categoria SIS>500 e 10<Chl-a<30 µg/L ela seria re-agrupada numa nova classe SIS>500 e Chl-a<30 µg/L, o que implicitamente significa que o comportamento espectral da água com concentrações de SIS superiores a 500 mg/L não permitia distinguir diferenças de concentração de clorofilas entre 10 e 30 µg/L.

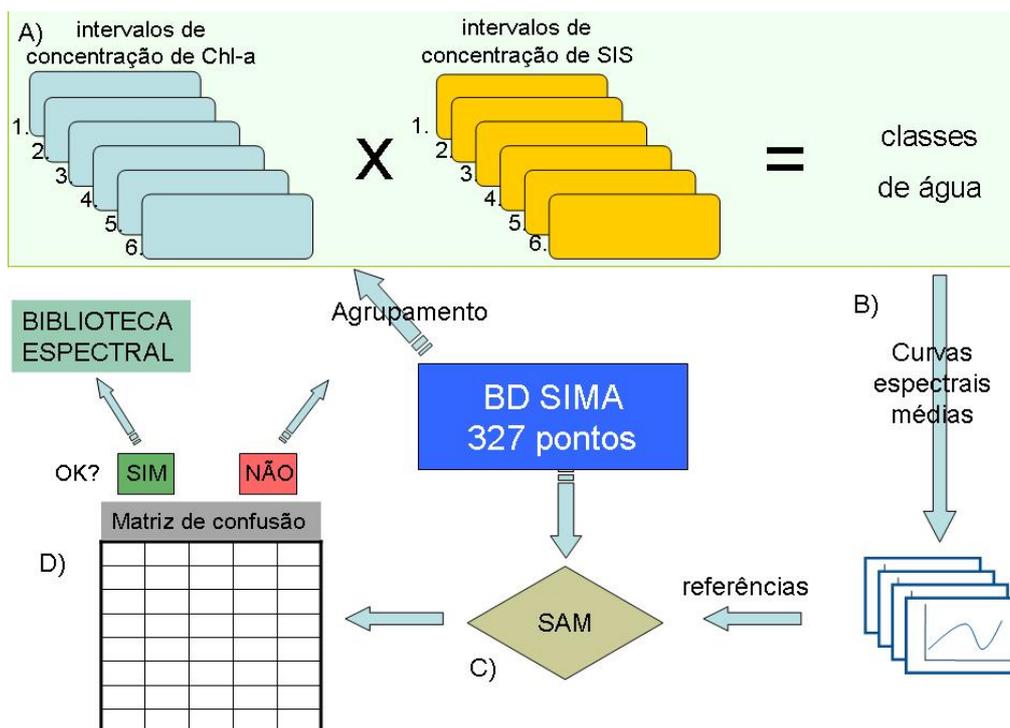


Figura 3.6 - Processo iterativo de agrupamento (A) e teste das curvas espectrais médias (B e C) para a definição das referências constituintes da biblioteca espectral de águas para as Áreas Alagáveis da Amazônia (D).

Esse processo foi iterado até se atingir os grupamentos em que havia correspondência biunívoca entre as classes limnológicas e espectrais, caracterizando, por fim, a biblioteca espectral de tipos de água. Vale ressaltar que, após o primeiro agrupamento, 15 amostras que apresentaram limiares superiores a 0.2 radianos, em relação às curvas de referência iniciais, foram eliminadas do processo de definição das classes, resultando em conjunto amostral de 327 amostras (Figura 3.5). Nas iterações subseqüentes, embora

algumas amostras tenham apresentado limiares acima de 0,2 radianos, elas não foram descartadas por duas razões: 1) porque a primeira iteração comprovou sua pertinência ao conjunto de amostras; 2) porque sua remoção continuada reduziria a variabilidade das classes da região de estudo. As 20 classes iniciais foram re-agrupadas desse modo em 10 classes (Figura 3.5).

A separabilidade das classes limnológicas foi avaliada a partir do Teste-t pareado das variáveis opticamente ativas, ou seja, realizaram-se testes estatísticos com o objetivo de verificar se havia diferenças significativas ($\alpha < 0.05$) entre as concentrações dos COA de cada classe.

3.2.4 Validação da Biblioteca Espectral

A validação da biblioteca foi feita a partir da classificação de 40 amostras de espectros separados inicialmente e não incluídos no processo de treinamento (Figuras 3.2 e 3.5). Foram obtidos aleatoriamente ao menos 3 pontos amostrais de cada campanha. O teste foi realizado utilizando o classificador SAM da mesma forma que na etapa anterior, ou seja, classificaram-se as curvas reservadas para a validação tendo como referência as curvas da biblioteca espectral. A avaliação da validação também foi realizada pela análise da matriz de confusão tendo como limiar de aceitação de 0,125 radianos.

3.2.5 Variabilidade Angular das Curvas de Referência

Para cada classe definida na biblioteca espectral foi calculada, no intervalo entre 400 e 900 nm, a diferença angular média entre as curvas das amostras que constituem a classe e a curva de referência. Esse procedimento foi realizado para verificar quais regiões do espectro eletromagnético apresentam maiores variações angulares em comparação às curvas de referências propostas. São essas regiões que mais contribuem para a soma angular total e que é o limiar do classificador SAM. O mesmo procedimento foi realizado para

as curvas espectrais das imagens (Seção 3.2.7) em comparação com as referências da biblioteca.

3.2.6 Simulação de Bandas Espectrais de Sensores Orbitais

Com o objetivo de verificar a eficácia da biblioteca espectral para classificar corpos d'água em imagens de sensores orbitais foram simuladas, nas 327 curvas obtidas por radiômetros de campo, a largura e o número de bandas espectrais dos sensores orbitais Hyperion/EO-1 e MERIS/Envisat (ver Apêndice B). Em seguida, os mesmos processos de classificação por SAM e avaliação da matriz de confusão, descritos anteriormente, foram repetidos para os dois sensores simulados.

3.2.7 Aplicação da Biblioteca às Imagens Orbitais

Após as simulações, utilizou-se a biblioteca espectral para classificar duas imagens, uma do sensor Hyperion e outra do MERIS, utilizando o classificador SAM em ambiente ENVI (ENVI, 1999). As imagens foram adquiridas concomitantemente à realização de campanhas de campo aqui compiladas. Assim, tendo como verdade de campo os pontos amostrados por essas campanhas, é possível avaliar o desempenho das classificações.

A imagem Hyperion utilizada neste estudo foi adquirida em 23 de junho de 2005 da região de Santarém (Figura 3.7), concomitantemente a realização da Campanha I no âmbito da dissertação de Rudorff (2006), onde se encontram mais detalhes da correção atmosférica e tratamento da imagem. No processo de tratamento da imagem eliminaram-se as bandas que apresentam RSR menor do que 50 para minimizar os erros de classificação (Figura 3.8). Assim, o intervalo utilizado pra o mapeamento SAM tendo a biblioteca construída como referência é de 480 a 895 nm.

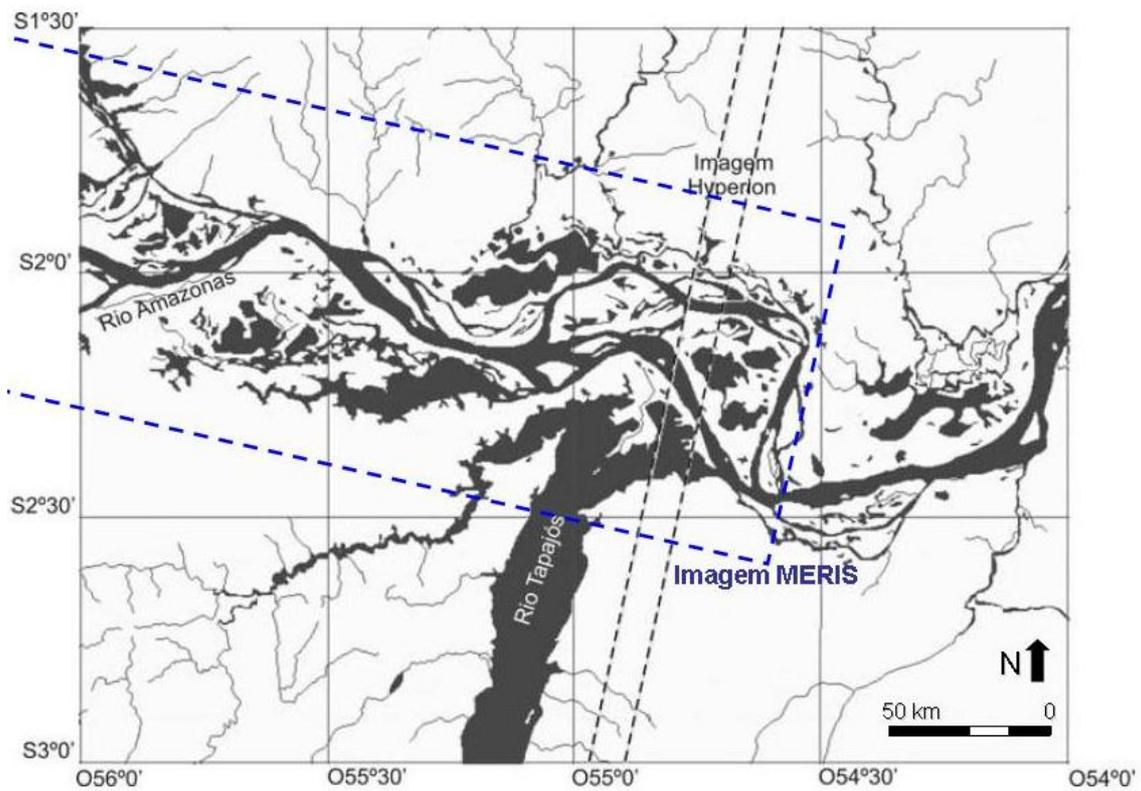


Figura 3.7 - Localização da faixa de imageamento dos sensores orbitais utilizados para classificação: Hyperion e MERIS.

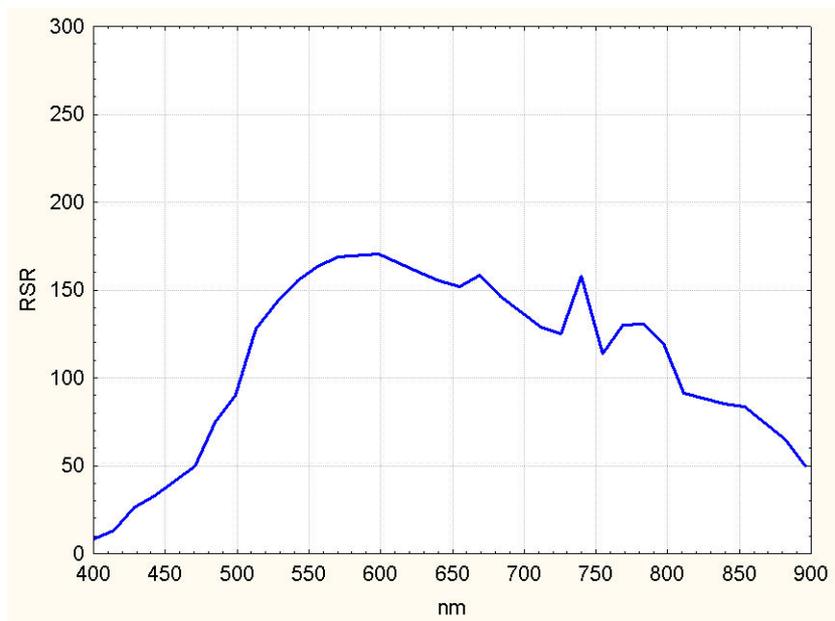


Figura 3.8 - Razão sinal ruído (RSR) do sensor Hyperion entre 400 e 900 nm.

FONTE: Pearlman et al., 1999.

A segunda imagem classificada foi uma imagem do sensor MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), a bordo do satélite Envisat, do dia 13/06/2004 adquirida na mesma semana da Campanha D. Maiores informações sobre as características dos sensores no Apêndice B. Como o sensor MERIS apresenta alta RSR (1700:1) em suas bandas do visível (ESA, 2009), não foi necessário eliminar nenhuma das 14 bandas entre 412 e 885 nm no processo de tratamento da imagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Biblioteca Espectral de Tipos de Água

Como resultado do processo de agrupamento e validação das curvas de referência foram definidas 10 classes com diferentes características limnológicas e cujas curvas espectrais médias estão ilustradas na Figura 4.1.

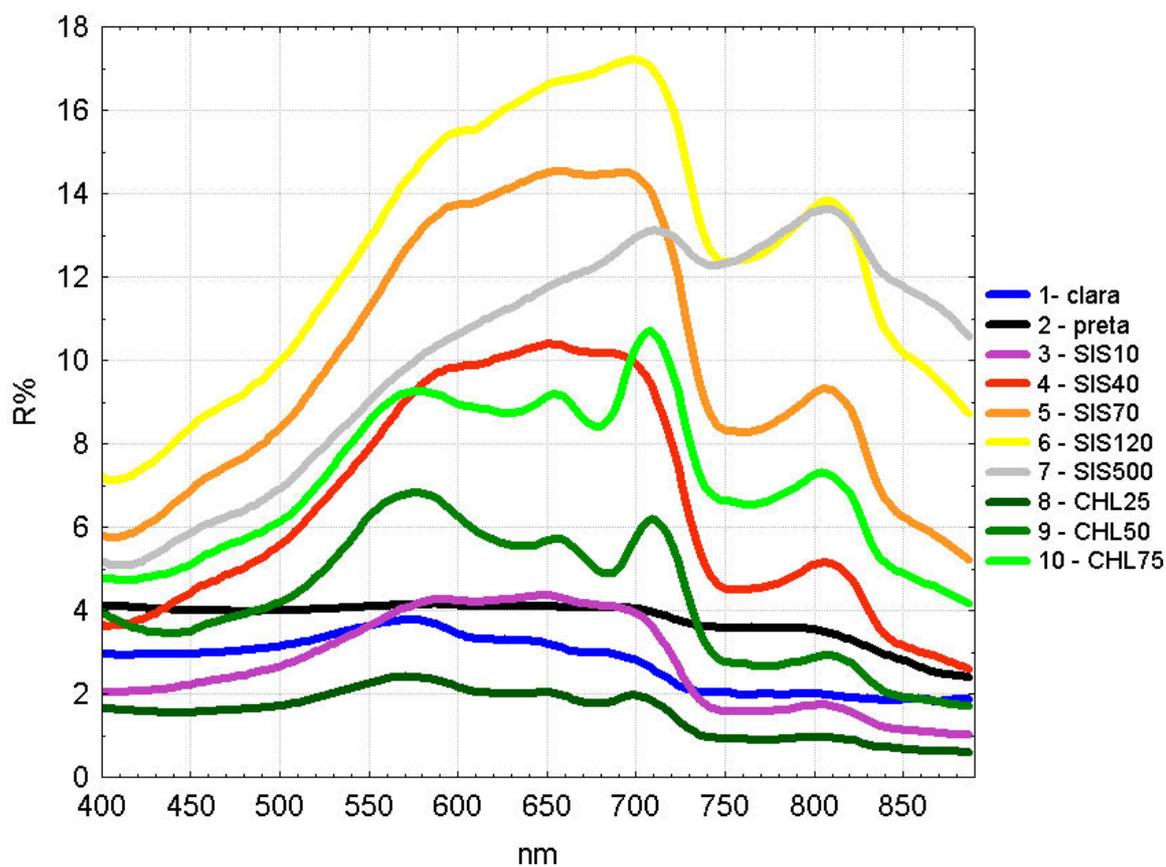


Figura 4.1 - Espectros das classes de águas constituintes da biblioteca espectral de tipos de água nas AAA.

Tabela 4.1 - Características limnológicas das classes de água da biblioteca espectral.

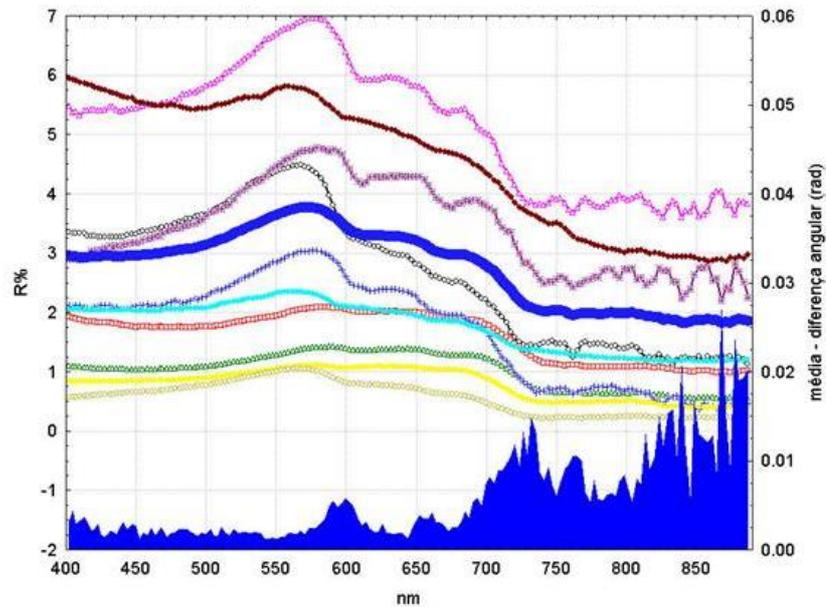
Classe	Chl-a (µg/l)		SIS (mg/l)		SOS (mg/l)		STS (mg/l)		CID (ppm)		COD (ppm)		Secchi (m)	
	media	DP	media	DP	media	DP	media	DP	media	DP	media	DP	media	DP
1-clara	3,6	1,3	0,6	0,3	2,3	1,5	3,2	1,5	1,9	1,1	2,2	0,9	3,1	0,8
2-preta	5,9	4,5	0,7	1,0	4,2	2,0	11,0	4,9	0,9	1,3	5,9	1,4	1,4	0,4
3-SIS10	8,2	7,1	7,9	3,1	5,0	1,1	13,6	4,4	2,7	1,9	4,6	2,3	0,6	0,2
4-SIS40	5,3	4,2	41,3	12,6	7,4	2,0	43,5	16,5	11,4	8,5	4,9	1,8	0,2	0,1
5-SIS70	6,9	6,4	70,8	24,3	11,2	2,5	86,7	34,8	16,8	6,6	5,1	1,8	0,2	0,2
6-SIS120	8,5	8,7	123,6	40,7	20,3	5,2	151,1	44,1	13,7	4,8	5,8	1,8	0,2	0,2
7-SIS500	31,9	14,3	506,3	191,0	73,7	25,1	580,0	214,2	7,6	3,8	6,4	1,4	0,1	0,0
8-CHL25	25,6	13,4	2,2	1,8	5,4	2,3	7,2	3,4	4,1	2,4	5,2	2,8	1,5	0,9
9-CHL50	45,1	25,4	7,9	4,7	9,2	3,4	17,1	7,0	7,5	2,8	4,7	1,7	0,5	0,1
10-CHL75	72,8	41,1	61,6	36,2	18,7	7,4	80,3	42,1	8,9	5,0	5,3	2,1	0,2	0,1

4.1.1 Classe 1 – Clara

A primeira classe, denominada 1-Clara, é composta por 15 amostras adquiridas em rios de água clara, como Tapajós e Trombetas, e provenientes de 4 campanhas distintas (Figura 4.2). Apresenta baixas concentrações de Chl-a, sólidos em suspensão e COD (< 3ppm) caracterizando um tipo de água limpa com ampla zona fótica (Secchi de 3m em média). A curva espectral dessa classe (em azul) é constituída de curvas de baixa reflectância média (entre 2 e 4%) com ligeira elevação do espalhamento na região do verde entre 550 e 600 nm, seguida de queda até o IVP onde há as maiores variações da reflectância e, conseqüentemente, maiores diferenças angulares das 15 curvas em relação à curva de referência (média).

A alta freqüência de ruídos na região do IVP deve-se ao fato de que águas claras retornam sinal baixo ao sensor, assim a medida torna-se mais vulnerável a interferências do espalhamento atmosférico e de outros alvos nessa região espectral. Percebe-se em algumas amostras (UAT2 e TROMB1) feições de absorção de Chl-a em 675 nm apesar das baixas concentrações desse COA, o

que confere a água coloração esverdeada. De fato Sioli (1984), ao definir o tipo de água clara, destaca a presença de fitoplâncton e, conseqüente, coloração esverdeada dessas massas de água.

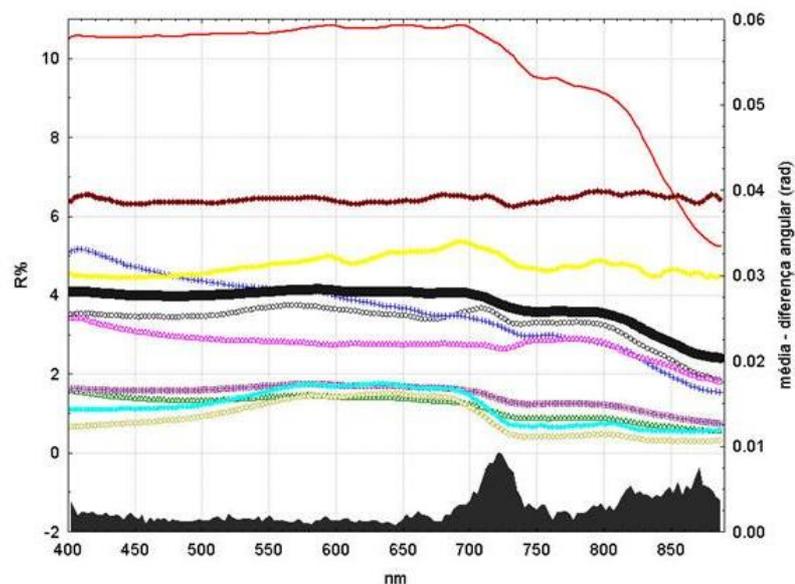


ponto amostral	Campa nha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
Tapajós	E	V	16:30							4.0	8.3	2.0
P-18 Trom	G	C		4.7			4.3					
P-19 Trom	G	C		5.0			1.9					
TROMB1	H	S		1.4			2.9			4.0		
TROMB2	H	S		2.0			3.8			4.0		
UAT2	H	S		4.0			5.3			3.5		
PC12	I	C	11:45	1.6	1.1	5.6	6.8	4.4	4.1	1.5	1.0	5.8
PC39	I	C	11:34	4.0	0.6	1.9	2.5	1.5	2.0	3.0	6.5	3.0
PC40	I	C	10:00	3.4	0.3	1.4	1.7	1.5	2.1	2.9	6.3	2.4
PC42	I	C	13:40	2.2	0.5	1.3	1.8	1.5	1.4	3.0	6.1	2.2
MEDIA (N = 15)				3.6	0.6	2.3	3.2	1.9	2.2	3.1	6.0	3.1
DP				1.3	0.3	1.5	1.5	1.1	0.9	0.8	2.1	1.2

Figura 4.2 - Curva de referência da Classe 1-Clara com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 15 curvas em comparação com a referência. Representação das curvas e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.2 Classe 2 – Preta

Caracterizou-se apenas uma classe de água preta, cujas amostras (n=19) localizadas em lagos adjacentes ao rio Solimões e águas do rio Negro apresentam significativa concentração de matéria orgânica e COD (Figura 4.3). As concentrações de Chl-a (média = 6 µg/L) e SIS foram baixas o que indica o predomínio do COD como COA no sinal obtido dessas amostras. Dessa maneira, observa-se um sinal baixo e sem variações abruptas da reflectância, na região do visível, o que confere a cor escura e negra a essas massas d'água. Variações angulares foram observadas na região do IVP onde há o aumento da absorção da radiação pela água (Figura 4.3).

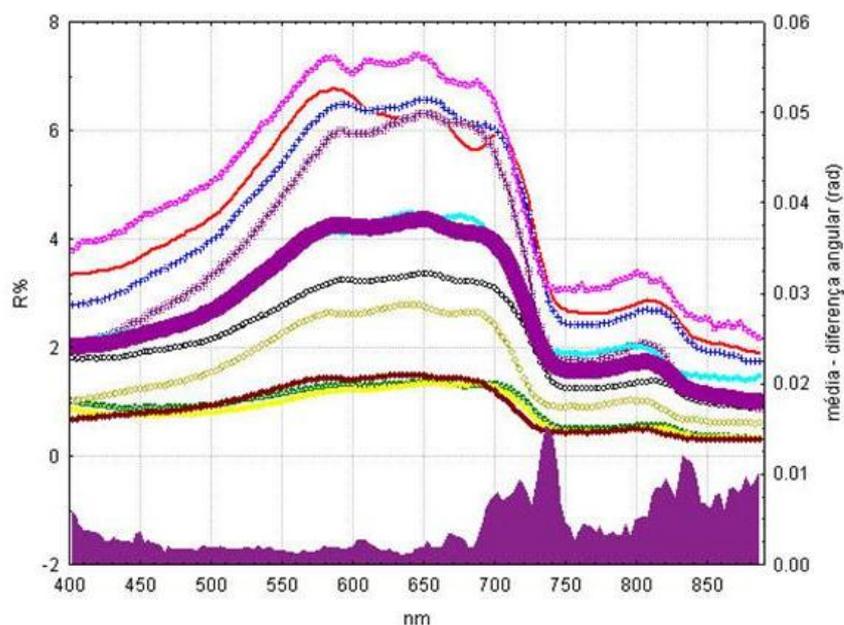


ponto amostral	Campa nha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
AM-14	F	C	10:47	7.4			8.2	0.3	6.5	1.0		
AM-23	F	C	12:58	6.0			17.2	0.3	3.8	1.2		
AM-30	F	C	12:30	12.9			14.2	0.3	7.7	2.0		
AM-40	F	C	13:40	2.3			11.3	0.3	5.4	1.8		
AM-54	F	C	10:40	12.0			11.3	0.3	6.2	1.5		
AM-63	F	C	12:05	4.6			14.8	0.4	4.6	1.9		
NEG1	H	S		0.8			4.1			1.0		
NEG3	H	S		0.5			4.1			0.7		
PC32	I	C	13:40	9.2	1.5	5.6	7.1	4.6	4.6	1.1	3.1	9.2
PC47	I	C	13:37	0.9	0.0	2.7	2.7	4.3	4.0	1.3	0.6	8.3
MEDIA (N = 19)				5.9	0.7	4.2	11.0	0.9	5.9	1.4	1.8	8.7
DP				4.5	1.0	2.0	4.9	1.3	1.4	0.4	1.8	0.7

Figura 4.3 - Curva de referência da Classe 2-Preta com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 19 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.3 Classe 3 – SIS10

A partir dessa classe até a Classe-7, se inicia a apresentação das classes denominadas de “águas brancas” por Sioli (1984), as quais neste estudo foram agrupadas em 5 classes em função da concentração de SIS. A Classe-3 apresenta em média concentração de SIS em 7,9 mg/L, concentração de Chl-a média igual a 8,2 µg/L e profundidade de Secchi média de 60 cm. É uma classe composta de 59 amostras provenientes de 5 campanhas adquiridas, em geral, em ambientes limítrofes de massas d’água com diferentes características e que, por isso, apresenta certo equilíbrio da composição do sinal entre Chl-a e SIS. Esse equilíbrio das concentrações também é notado nos espectros dos pontos dessa classe, nos quais se observa feição sutil de absorção pela Chl-a - pontos S11 e PCJ115 - conferindo diferenças angulares no IVP e também na região espectral do vermelho. Por outro lado, é nítida a elevação da reflectância por espalhamento provocado por SIS na maioria dos pontos ilustrados na Figura 4.4. Nota-se que a maioria das amostras é do período de cheia, período em que há menor contribuição do espalhamento por SIS devido à sua deposição no fundo de lagos da várzea, como no LGC (Lago Grande do Curuai). As maiores variações angulares são entre 700 e 750 nm e entre 820 e 850 nm, ambas decorrentes da absorção pela água após espalhamento pelos SIS em 600 a 690 nm e 810 nm, respectivamente. Isso significa que o contraste entre espalhamento por SIS e absorção por água condiciona as principais variações angulares nas classes dominadas por SIS (classes 3 a 7).

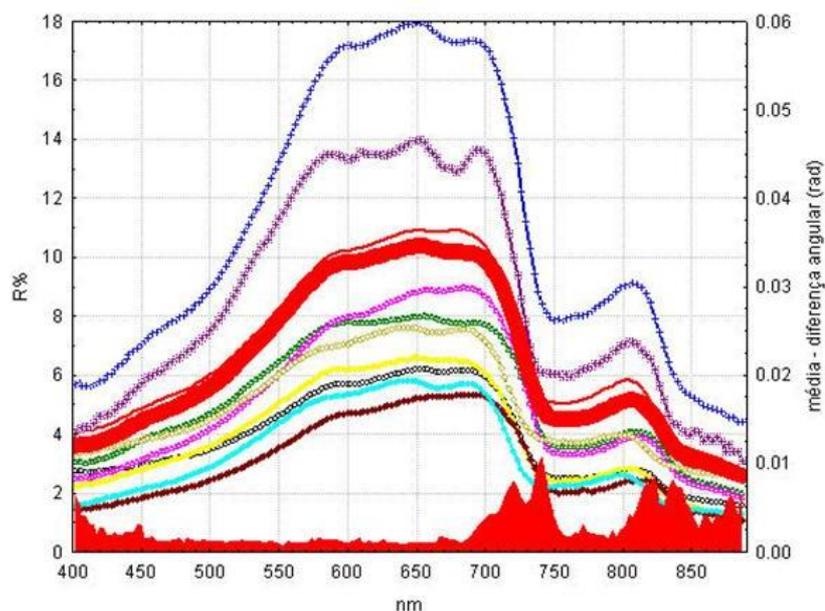


ponto amostral	Campinha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCJ03	D	C	11:05	5.7	12.6	5.8	18.4			0.4	4.4	41.0
PCJ115	D	C	13:25	19.6	7.0	5.5	12.4	4.2	4.8	0.7	6.8	28.0
PCJ38	D	C	12:25	11.7	3.5	3.4	6.8			0.8	5.8	11.0
PCJ72	D	C	10:30	9.9	9.5	4.2	13.6			0.5	6.8	35.0
S11	E	V	13:30							0.7	7.1	12.0
AM-3	F	C	11:12	1.4			25.4	0.8	4.5	0.4		
P-15 Uatur	G	C		2.5			11.9					
PC13	I	C	11:22	2.0	2.2	4.8	7.0	4.1	4.2	1.4	1.7	7.6
PC21	I	C	11:45	2.6	9.3	5.1	14.4	4.2	4.3	0.6	3.9	21.5
PC33	I	C	14:00	9.2	6.1	5.5	11.6	4.1	4.0	0.7	4.6	17.8
MEDIA (N = 59)				8.2	7.9	5.0	13.6	2.7	4.6	0.6	5.5	26.0
DP				7.1	3.1	1.1	4.4	1.9	2.3	0.2	1.9	12.4

Figura 4.4 - Curva de referência da Classe 3-SIS10 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 59 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.4 Classe 4 – SIS40

A reflectância média na Classe 4-SIS40 alcança 10% na região espectral do vermelho, 6% a mais do que na Classe 3-SIS10, em função do aumento do espalhamento da radiação pela elevação significativa da concentração média de SIS, de 7,9 na Classe-3 para 41,3 mg/L na Classe-4. Isso condiciona à curva da Classe-4 (Figura 4.5), feições de espalhamento mais acentuadas entre 600 e 700 nm e em 810 nm produzindo curvas espectrais significativamente distintas da Classe-3. Já a contribuição de Chl-a no sinal registrado é mínima assim como na Classe 3-SIS10. Dessa forma, as variações angulares das amostras em relação à curva média seguem os mesmos padrões e explicações da classe anterior com picos de diferenças angulares em 740 e 820 nm.

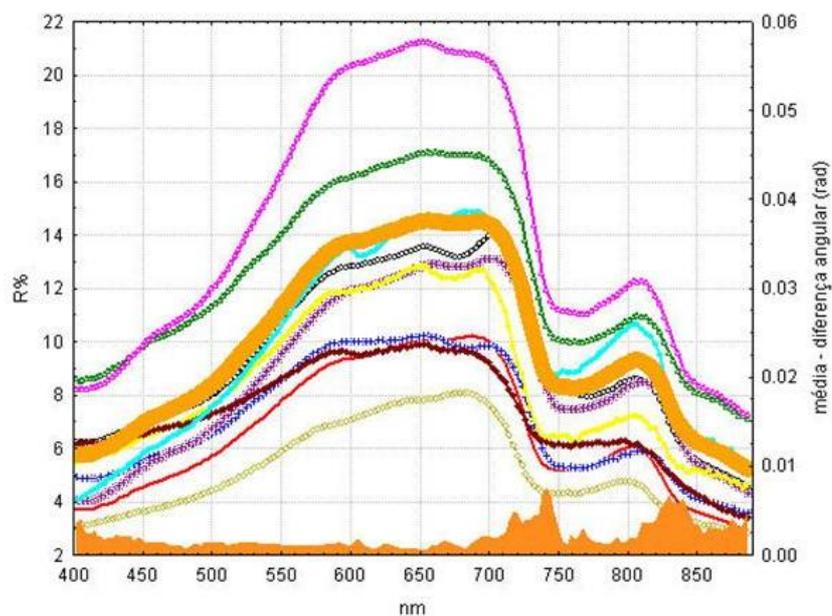


ponto amostral	Camp	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCS51	A	V	13:44	4.2	23.8	3.7	27.5	12.3	4.5	0.4	4.0	59.0
PCN73	B	S	13:40	1.6	48.9	5.0	53.9	15.2		0.2	4.4	197.0
PCF27	C	E	12:07	9.1	46.9	5.9	52.8	17.0	4.5	0.1	6.0	142.0
PCF57	C	E	13:30	10.1	53.0	10.6	63.6	19.9	4.3	0.1	6.8	198.0
PCJ32	D	C	10:41	1.2	28.2	6.4	34.6			0.3	3.7	107.0
S13	E	V	11:35	9.7						0.3	7.4	113.0
AM-39	F	C	13:40	1.4			12.6	0.3	4.1	0.4		
P-06 Slim	G	C		1.4			44.9					
PC24	I	C	14:05	10.0	18.4	7.5	25.8	3.9	4.7	0.5	4.5	41.2
PC29	I	C	11:46	8.7	23.1	9.9	33.0	4.5	4.6	0.3	2.0	42.4
MEDIA (N = 23)				5.3	41.3	7.4	43.5	11.4	4.9	0.2	5.4	125.0
DP				4.2	12.6	2.0	16.5	8.5	1.8	0.1	1.3	60.4

Figura 4.5 - Curva de referência da Classe 4-SIS40 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 23 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.5 Classe 5 – SIS70

As amostras da Classe-5, a exemplo da Classe-4, também são dominadas por SIS como principal COA. Por sua vez, apresentam média de 70 mg/L (DP=24 mg/l) de SIS e reflectância máxima de 14% entre 650 e 700 nm (Figura 4.6). Além disso, nota-se que as amostras são, principalmente, dos períodos hidrológicos de transição, enchente e vazante, períodos nos quais há maior participação dos SIS no sinal medido do que no período de cheia. Enquanto na cheia ocorre o processo de deposição de SIS nos lagos da várzea devido à perda de energia cinética das massas de água, nos períodos de transição há aumento da energia cinética dos rios, e conseqüente re-suspensão (vazante) ou carreamento (enchente) de SIS (BARBOSA, 2005). Para as demais variáveis limnológicas não há diferenças significativas com a Classe-4, mesmo as diferenças angulares também são similares à Classe-4, apesar de menos intensas (Figura 4.6).



ponto amostral	Campa nha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCS25	A	V	12:50	29.5	78.9	13.8	92.7	11.4	4.9	0.2	5.0	224.0
PCN30	B	S	13:18	4.9	75.3	10.5	85.8	11.8	5.0	0.1	4.7	201.0
PCF11	C	E	10:40	6.7	35.9	9.3	45.2	20.5	4.9	0.2	5.7	126.0
PCF33	C	E	10:05	12.7	40.7	7.3	48.0	22.0	8.6	0.2	5.8	135.0
PCF44	C	E	12:22	5.3	66.9	10.8	77.7	17.9	3.8	0.1	6.9	208.0
PCF75	C	E	10:53	11.1	70.0	14.9	84.9	17.2	6.0	0.1	6.1	216.0
S32A	E	V	11:10							0.3	7.3	121.0
AM-64	F	C	14:47	1.8			15.0	0.7	4.6	0.8		
AM3-2	H	S		0.3			127.3			0.5		
PC31	I	C	10:29	1.0	69.4	10.5	79.9	3.9	4.7	0.3	3.1	70.9
MEDIA (N = 47)				6.9	70.8	11.2	86.7	16.8	5.1	0.2	5.9	199.2
DP				6.4	24.3	2.5	34.8	6.6	1.8	0.2	1.2	64.0

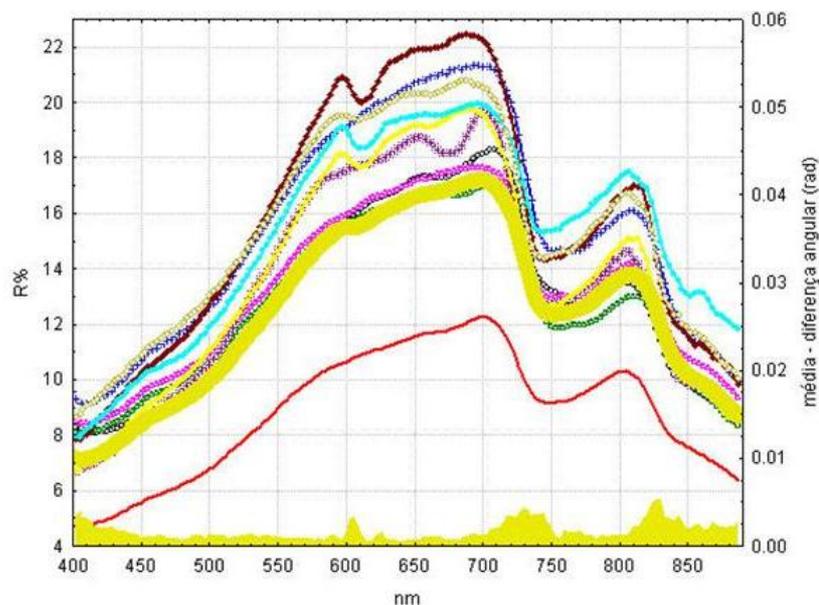
Figura 4.6 - Curva de referência da Classe 5-SIS70 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 47 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.6 Classe 6 – SIS120

As curvas que definem a média desta classe são, em sua maioria, adquiridas nas estações hidrológicas de transição e de seca que apresentam elevado predomínio de SIS, principalmente no Lago do Curuai, como explicado anteriormente (Seção 4.1.5). No período da seca, por sua vez, há aumento da concentração de SIS em função da perda de água.

O amplo predomínio de SIS no sinal registrado confere maior homogeneidade espectral às amostras, fato que pode ser verificado pela variação angular que é menor quando comparada com as classes anteriores (Figura 4.7). Percebe-se elevação da reflectância na região entre 680 e 700 nm, alcançado o máximo de 17% em 700 nm e também da região em torno de 810 nm devido à alta concentração média de SIS (120 mg/L). Ou seja, com o aumento de SIS o espalhamento da radiação no IVP aumenta progressivamente, superando a alta absorção pela água e aumentando o sinal radiométrico. Esses fatores levam à maior homogeneização das curvas e a menores variações angulares (Figura 4.7).

Para as concentrações de Chl-a e COD não há diferenças significativas em comparação com as classes 4 e 5, apesar de haver amostras com altas concentrações de Chl-a, como a PCS56 com 37 µg/L. As feições características da Chl-a nessa amostra foram, por sua vez, mascaradas pelo sinal de SIS.

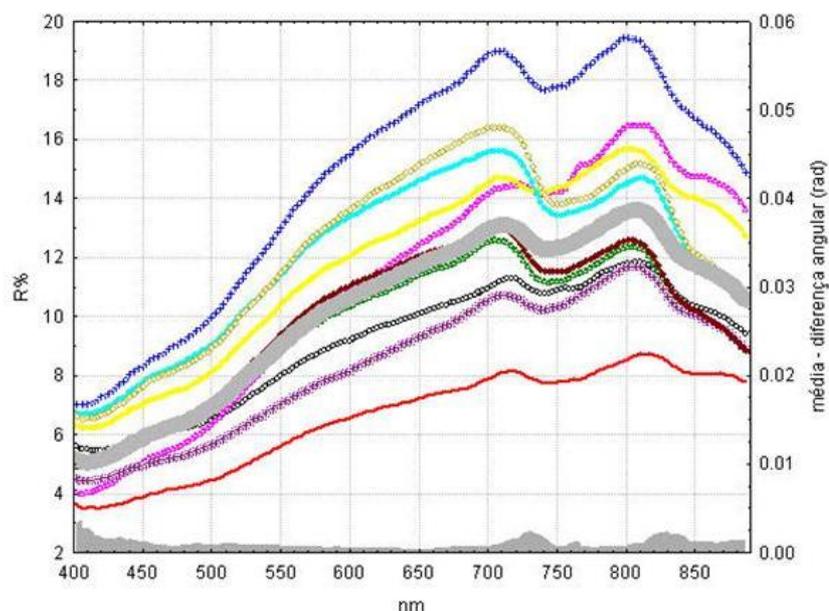


ponto amostral	Campa nha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCS56	A	V	13:24	37.8	132.5	23.7	156.2		5.6	0.1	6.7	355.0
PCN29	B	S	10:35	18.2	200.8	22.1	222.9	13.1	3.9	0.1	5.1	436.0
PCF14	C	E	10:00	17.8	79.4	18.6	98.0	19.6	5.9	0.1	4.2	212.0
PCF31	C	E	13:54	6.5	79.2	18.3	97.5	19.4	5.1	0.1	5.9	257.0
PCF53	C	E	12:42	11.7	116.2	22.7	138.8	10.6	6.5	0.1	6.4	273.0
S32D	E	V	12:55							0.1		
AM3-1	H	S		0.3			139.8			0.5		
AM5-1	H	S		0.4			136.9			0.5		
MAD3	H	S		0.7			231.6			0.6		
SOL3	H	S		0.3			163.5			0.5		
MEDIA (N= 35)				8.5	123.6	20.3	151.1	13.7	5.8	0.2	5.7	306.5
DP				8.7	40.7	5.2	44.1	4.8	1.8	0.2	0.7	72.2

Figura 4.7 - Curva de referência da Classe 6-SIS120 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 35 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.7 Classe 7 – SIS500

O último nível de concentração de SIS é atribuído à Classe-7 com concentração média de 500 mg/L cujas amostras foram adquiridas, em sua maioria, no Lago Grande do Curuai no período de seca (Campanha B). Esse altíssimo nível de concentração confere à água sinal elevado no IVP entre 700 e 850 nm. O pico máximo de reflectância é em torno de 810 nm e as variações angulares são mínimas, devido ao completo domínio do sinal pelo espalhamento de SIS. Houve diferença significativa entre o conjunto amostral de Chl-a (média de 31.9 µg/L) desta classe com as classes anteriores (Seção 4.2). Mesmo assim, as amostras com altas concentrações de Chl-a (40 µg/L) não apresentaram qualquer feição de absorção por pigmentos fotossintetizantes porque seu sinal foi suprimido pelo sinal de espalhamento por SIS. Dessa forma, essa classe inclui as massas d'água que apresentam SIS em torno de 500 mg/L e que podem apresentar Chl-a de até 40 µg/L. Verifica-se, portanto, que há uma limitação na identificação precisa da Chl-a nessa classe pelo método proposto. Na prática, um espectro classificado nessa classe pode ter Chl-a até 40 µg/L, assim o que define limnologicamente a Classe-7 é concentração de SIS acima de 300 mg/L.



ponto amostral	Campa nha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCN02	B	S	10:42	35.1	486.7	75.6	562.3	7.9	5.1	0.1	5.2	995.0
PCN07	B	S	13:34	32.7	565.0	77.6	642.7	7.3	5.2	0.1	5.1	999.0
PCN14	B	S	14:57	23.4	293.6	50.1	343.7	5.3	6.3	0.1	4.7	626.0
PCN26	B	S	11:18	31.3	621.2	45.1	666.3	9.8	4.9	0.1	4.8	999.0
PCN41	B	S	11:57	29.2	629.0	88.2	717.2	4.4	8.6	0.1	4.3	999.0
PCN57	B	S	13:37	20.8	405.8	69.9	475.7	0.9	4.7	0.1	3.6	795.0
PCN64	B	S	12:12	45.6	633.7	102.6	736.3	7.3	6.4	0.1	4.9	999.0
PCN69	B	S	10:24	23.2	346.2	47.9	394.1	8.6	8.3	0.1	4.3	733.0
PCF06	C	E	9:10	8.2	247.9	32.1	280.0	12.4	5.3	0.1	5.6	452.0
PCF85	C	E	12:10	5.5	133.3	27.8	161.1	11.3	7.8	0.1	5.5	368.0
MEDIA (N = 58)				31.9	506.3	73.7	580.0	7.6	6.4	0.1	4.8	849.9
DP				14.3	191.0	25.1	214.2	3.8	1.4	0.0	0.4	190.7

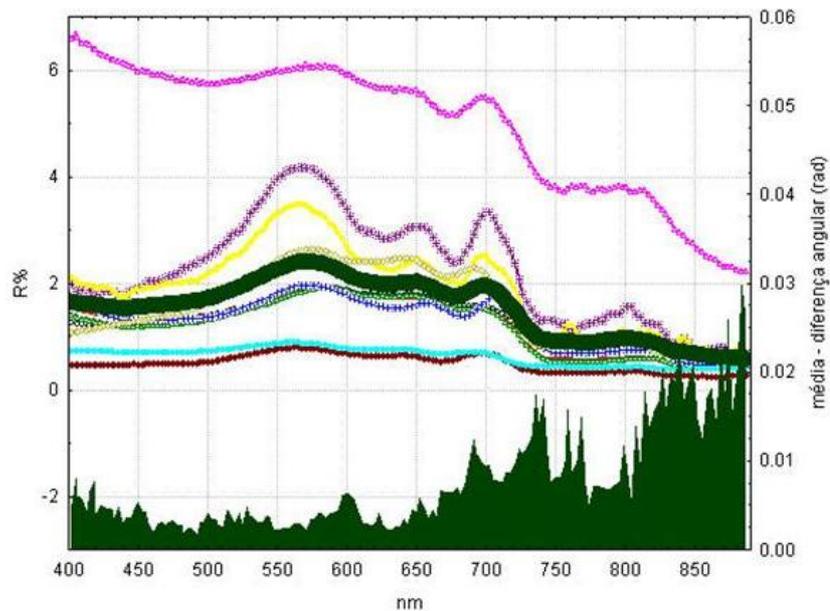
Figura 4.8 - Curva de referência da Classe 7-SIS500 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 58 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.8 Classe 8 – CHL25

A Classe-8 apresenta concentração média de Chl-a de 25 µg/L (DP = 13 µg/L), baixa concentração de SIS (2 mg/L) e profundidade de Secchi em torno de 1,5 m. O sinal de reflectância é baixo e semelhante ao espectro de referência da Classe 1-clara, no que diz respeito às feições das curvas e às variações angulares das amostras. Apresenta, no entanto, feições de Chl-a mais pronunciada do que na Classe-1, devido à maior concentração média desse COA. Nota-se que há grande variação espectral entre as curvas, principalmente em relação às feições de absorção de pigmentos, tão pronunciadas em algumas amostras (TAP1) e em outras não (PC02). Tais diferenças podem ser atribuídas a vários fatores como: a) horário de obtenção das medidas, tendo em vista que o fitoplâncton muda de posição na coluna d'água, e com isso altera a probabilidade de interação do pigmento com a radiação; b) estado da superfície da água que em situações de agitação e turbulência também promovem a distribuição do fitoplâncton na coluna d'água, c) estado fisiológico do fitoplâncton considerando o ciclo de vida da comunidade fitoplanctônica amostrada, ou seja, diferentes estágios do ciclo condicionam maior ou menor produtividade fotossintética e concentração de Chl-a (KIRK, 1994).

Identifica-se, na Figura 4.9, a feição de absorção por ficocianina em 620 nm, indicando haver presença de cianobactérias (ver Seção 2.1.2) na maioria das amostras dessa classe; a mesma observação pode ser feita para a Classe-9 (Seção 4.1.9). De fato, esse grupo é bastante representativo da comunidade de fitoplâncton nas águas das AAA e em águas continentais (RANDOLPH, 2007), por apresentar importantes características fisio-ecológicas que lhes permitem migrar na coluna d'água e aproveitar ao máximo a energia luminosa para a fotossíntese. Assim, além de ser espectralmente uma feição diagnóstica de cianobactérias, a ficocianina confere uma vantagem adaptativa e de grande competitividade em relação a outros grupos fitoplanctônicos.

Quanto às diferenças angulares percebe-se que os picos de variações angulares acompanham as feições de absorção e espalhamento por fitoplâncton e é mais alto na região do IVP (800 a 900 nm) em função da absorção pela água.



ponto amostral	Campinha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCJ04	D	C	10:25	10.9	2.7	3.0	5.7			1.2	6.5	6.0
PCJ111	D	C	12:25	15.1	3.5	3.9	7.3			0.9	7.4	15.0
PCJ112	D	C	13:10	10.6	3.5	3.0	6.5			1.2	6.6	11.0
PCJ12	D	C	12:25	37.6	3.2	6.1	9.3			0.8	7.0	21.0
AM-15	F	C	11:13	40.4			13.3	2.5	6.6	1.4		
TAP1	H	S		36.4			4.7			2.4		
TAP2	H	S		16.8			3.6			3.0		
PC01	I	C	10:29	48.8	0.0	6.2	6.2	6.0	5.3	1.1	5.2	6.0
PC02	I	C	10:06	23.9	0.0	2.5	2.5	6.2	5.8	1.9	3.4	3.1
PC36	I	C	14:45	16.8	0.2	4.7	4.9	3.3	4.4		7.0	11.3
MEDIA (N = 13)				25.6	2.2	5.4	7.2	4.1	5.2	1.5	6.2	12.3
DP				13.4	1.8	2.3	3.4	2.4	2.8	0.9	1.8	5.6

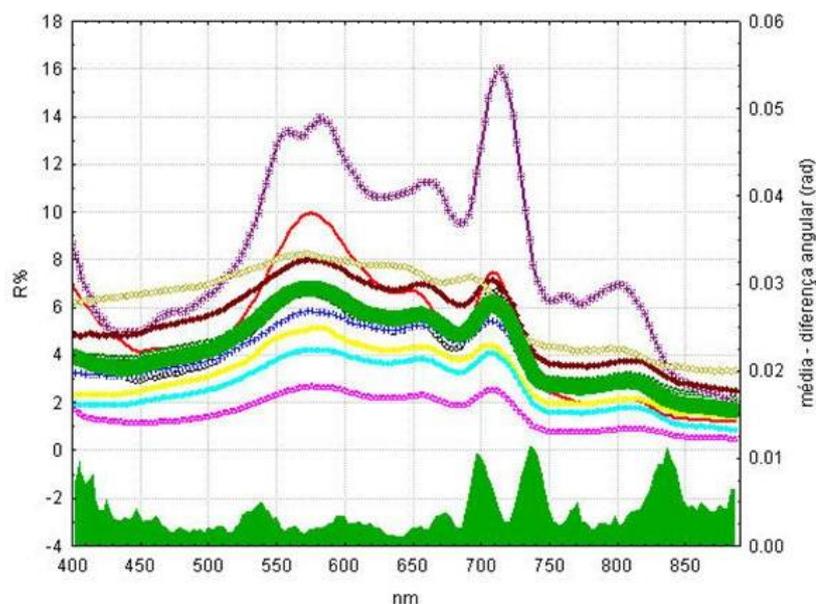
Figura 4.9 - Curva de referência da Classe 8-CHL25 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 13 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.9 Classe 9 – CHL50

Com concentração média de Chl-a em 45 $\mu\text{g/L}$ (DP = 25 $\mu\text{g/L}$), esta classe apresenta predomínio deste COA no sinal da curva espectral de referência. Engloba ainda, o nível de SIS da Classe 3-SIS10 porque apresenta média 7,9 mg/L (DP = 4,7 mg/L), o que é estatisticamente igual à distribuição do conjunto amostral da Classe-3 com média 8 mg/L e DP=7 mg/L (ver Seção 4.2). As diferenças angulares são baixas nos picos de absorção em 680 nm e espalhamento por fitoplâncton em 720 nm, o que indica que, no conjunto amostral da classe, os máximos e mínimos de reflectância são fixos e não migram no EEM, corroborando a hipótese de presença de altas concentrações de fitoplâncton nessas massas d'águas.

Verifica-se, na Figura 4.10, que o espalhamento em 810 nm, recorrente nas classes com domínio de SIS (classes 4 a 7) é presente também quando em predomínio do fitoplâncton como principal material em suspensão (Classe-9). Isso sugere que essa feição resulta tanto do espalhamento de SIS como de fitoplâncton em suspensão.

Além disso, nota-se que as amostras ricas em Chl-a (classes 8 e 9) são, em sua maioria, do período de cheia do LGC, situação que garante maior disponibilidade de luz para a fotossíntese em função da deposição dos SIS carregados pelo rio Amazonas aos lagos da várzea durante a enchente. Nessa época os lagos estão mais profundos e menos sujeitos à ação dos ventos e à re-suspensão. Enquanto isso a clorofila na classe 7-SIS 500 que é tão alta quanto a Classe-8 (Seca 4.2), mas porque ocorre no período de seca e instabilidade do nível da água, não é detectável por sensoriamento remoto.



ponto amostral	Campa nha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCS49	A	V	10:43	68.0	10.5	11.5	22.0	10.5	4.9	0.5	6.9	65.0
PCS53	A	V	12:34	135.3	33.6	20.6	54.1	8.4	4.5	0.2	7.6	137.0
PCJ105	D	C	11:33	45.2	5.9	8.9	14.8			0.6	7.1	32.0
PCJ109	D	C	11:57	38.2	7.6	9.0	16.6			0.5	7.8	28.0
PCJ41	D	C	13:40	33.7	5.7	8.1	13.8			0.6	8.4	22.0
PCJ44	D	C	9:27	52.4	6.6	11.5	18.1			0.6	7.7	29.0
PCJ52	D	C	13:01	27.0	7.4	6.9	14.3			0.6	7.7	37.0
PCJ63	D	C	10:34	34.3	5.9	7.6	13.5			0.6	8.2	32.0
PCJ68	D	C	12:27	40.5	8.2	8.9	17.1			0.5	8.7	34.0
PC04	I	C	11:13	21.4	8.2	6.0	14.2	4.8	5.0	0.8	5.4	14.1
MEDIA (N = 36)				45.1	7.9	9.2	17.1	7.5	4.7	0.5	8.1	36.8
DP				25.4	4.7	3.4	7.0	2.8	1.7	0.1	1.1	21.0

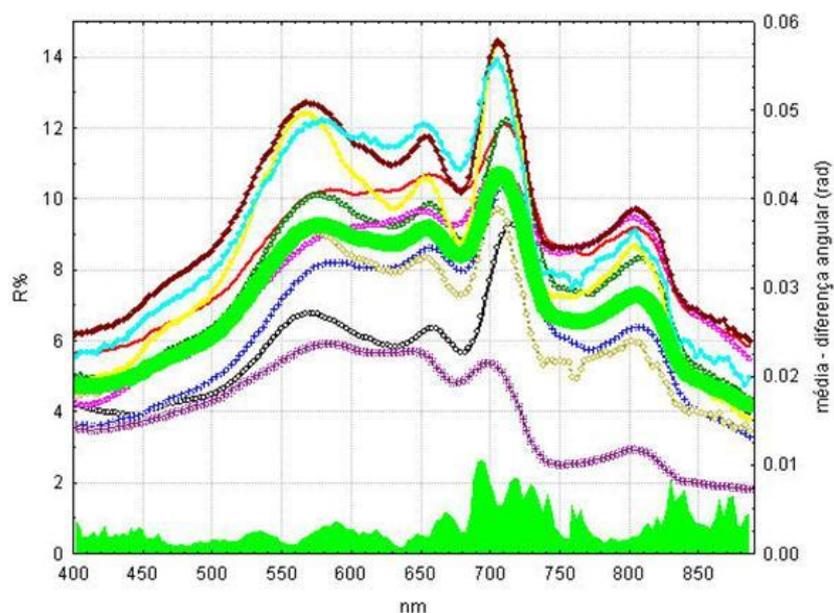
Figura 4.10 - Curva de referência da Classe 9-CHL50 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 36 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.1.10 Classe 10 – CHL75

A décima e última classe de água caracterizada na biblioteca espectral de águas apresenta concentração média de Chl-a igual a 73 $\mu\text{g/L}$ (DP=41 $\mu\text{g/L}$) e 61mg/l (DP=36) de SIS. O alto valor do DP da Chl-a é devido, principalmente, aos valores extremos de amostras como PCS33 e S14 decorrentes dos processos ecológicos e fisiológicos discutidos na Seção 4.1.8.

Na análise espectral dos COA, percebe-se um equilíbrio na participação do sinal registrado entre Chl-a e SIS, a exemplo da Classe-3, só que aqui em níveis de concentrações mais elevados e com certo predomínio de Chl-a. De fato, as feições de Chl-a são nítidas, mas também é notável a elevação da reflectância na região do vermelho (600 a 700 nm) como um todo, em função do espalhamento por SIS. Ao contrário da Classe-9, onde o pico de espalhamento por fitoplâncton está posicionado e fixo em 720 nm, a variação espectral na região entre 700 e 750 nm foi elevada e praticamente constante na Classe-10. Isso indica que as amostras da Classe-10 apresentaram picos máximos de espalhamento em comprimentos de onda diferentes entre elas devido, principalmente, à alta variação da Chl- e à presença de concentrações significativas de SIS que tendem a espalhar a radiação nesses comprimentos de ondas. Assim, o pico de espalhamento entre 700 e 750 nm pode ser atribuído à somatória do espalhamento por células do fitoplâncton e por SIS, por isso as altas diferenças angulares observadas nesse intervalo.

Em geral, as amostras dessa classe são do período de vazante no qual as altas concentrações de Chl-a do período de cheia são enriquecidas por SIS pela re-suspensão de sedimentos. Essa dinâmica hidrológica explica, em parte, a mistura de altas concentrações de Chl-a e SIS, identificadas pelas curvas espectrais dessa classe.



ponto amostral	Campinha	Período hidro.	horário	Chl-a (µg/l)	SIS (mg/l)	SOS (mg/l)	STS (mg/l)	CID (ppm)	COD (ppm)	Secchi (m)	OD (mg/l)	Turbidez (NTU)
PCS33	A	V	10:13	204.3	56.7	30.8	87.5	15.0	6.6	0.2	5.9	200.0
PCS41	A	V	9:52	77.5	75.2	20.3	95.5	12.4	7.8	0.2	5.2	175.0
PCS44	A	V	13:15	80.8	48.1	17.6	65.7	12.6	6.8	0.2	6.9	161.0
PCS52	A	V	9:50	79.6	42.9	16.2	59.1	8.2	5.1	0.2	7.1	119.0
PCN43	B	S	12:12	86.3	126.5	31.9	158.4	2.9	4.9	0.1	4.1	267.0
PCN46	B	S	13:00	14.9	24.1	8.5	32.5	1.1	2.7	0.4	5.9	58.0
S14	E	V		114.5						0,20	4.8	110.0
SA2	E	V	10:35							0.3	8.5	117.0
SA7	E	V	12:10							0.3	8.4	138.0
SA8	E	V	12:25							0.4	8.8	96.0
MEDIA (N= 22)				72.8	61.6	18.7	80.3	8.9	5.3	0.2	6.6	151.4
DP				41.1	36.2	7.4	42.1	5.0	2.1	0.1	1.6	60.7

Figura 4.11 - Curva de referência da Classe 10-CHL75 com indicação da diferença angular média (área: eixo Y da direita) das 22 curvas em comparação com a referência. Representação e características limnológicas somente de 10 exemplares para melhor visualização. Período Hidrológico: C – cheia, V – vazante, E – enchente, S – seca.

4.2 Separabilidade Limnológica das Classes

Após a definição das curvas espectrais médias das classes pelo processo iterativo descrito anteriormente (Seção 3.2.3), a separabilidade limnológica dessas classes foi avaliada através de Testes-t (com nível de significância de 5%). Foi possível identificar 4 níveis de concentração de Chl-a, aos quais as classes foram atribuídos (Tabela 4.2). O primeiro nível, com Chl-a até 15 µg/L, engloba as classes 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Ou seja, não há diferença significativa da concentração de Chl-a entre essas 6 classes, por isso, foram todas inseridas nesse primeiro nível. No segundo nível, com Chl-a média de 30 µg/L está a Classe-8. As classes 7 e 9 apresentaram variabilidade da concentração em torno de 50 µg/L, e assim, constituem o terceiro nível de concentração de Chl-a identificado. Por fim, no quarto e último nível, está a Classe-10 que apresenta Chl-a média de 72 µg/L e cuja distribuição de concentração é significativamente diferente das demais classes (Figura 4.12).

Tabela 4.2 - Enquadramento das classes em níveis de concentração de Chl-a (nível de significância de 5%).

nível	Chl-a (µg/L)	classes
1	até 15	1, 2, 3, 4, 5 e 6
2	30 (±12)	7, 8
3	50 (±15)	9
4	> 70	10

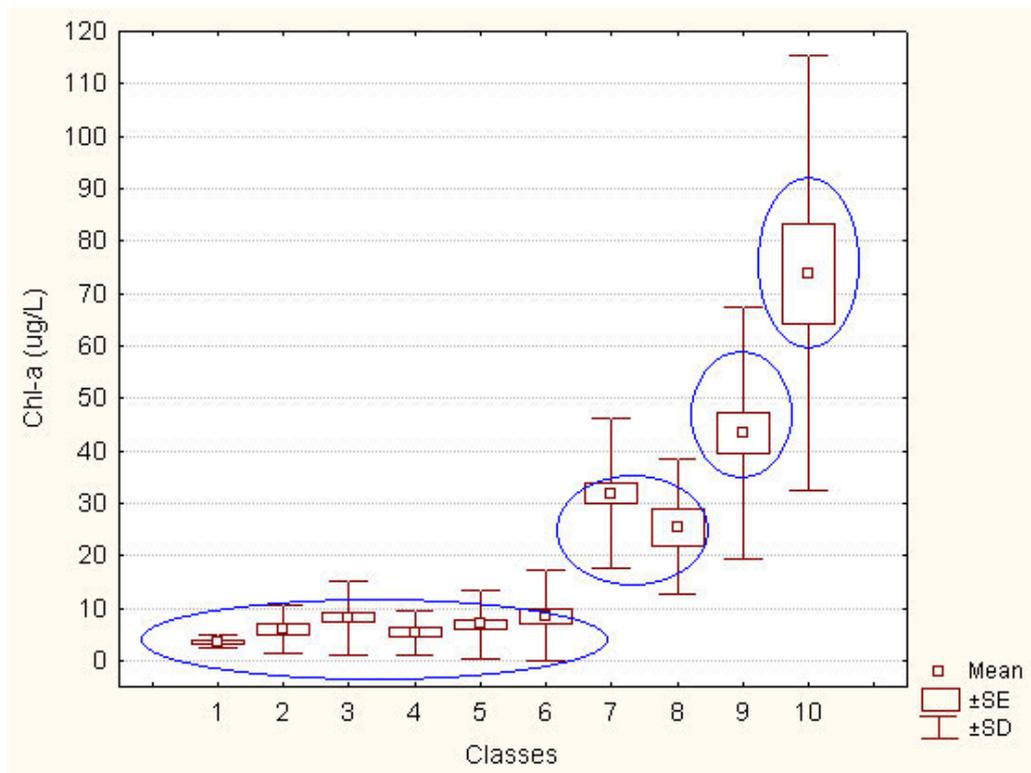


Figura 4.12 - Gráfico Box-plot da distribuição de Chl-a em função das classes de água propostas. Destacam-se, nos enquadramentos em azul, os níveis diferentes estatisticamente (Teste-t com nível significância de 5%).

Para a variável SIS, 6 níveis de concentração foram identificados (Tabela 4.3). O primeiro deles engloba as classes 1, 2 e 8 que apresentam concentrações de SIS pouco variáveis e não superiores a 5 mg/L, e por isso, não apresentam diferença significativa entre elas. No segundo nível, com concentrações médias em torno de 10 mg/L estão as classes 3 e 9. No nível seguinte, com média de 41,3 mg/L e distribuição estatisticamente distintas das outras classes, está a Classe-4. As classes 5 e 10 estão inseridas no quarto nível de concentração de SIS com concentrações em torno de 70 mg/L. A Classe-6 apresenta concentrações de SIS em torno de 120 mg/L e está inserida no quinto nível. Por fim, no sexto e último nível, está a Classe-7 que apresenta SIS média de 500 mg/L com distribuição de concentração significativamente diferente das demais classes (Figura 4.13).

Tabela 4.3 - Enquadramento das classes em níveis de concentração de SIS (nível de significância de 5%).

nível	SIS (mg/L)	classes
1	até 5	1, 2, 8
2	10 (± 5)	3, 9
3	40 (± 12)	4
4	70 (± 15)	5, 10
5	120 (± 30)	6
6	> 250	7

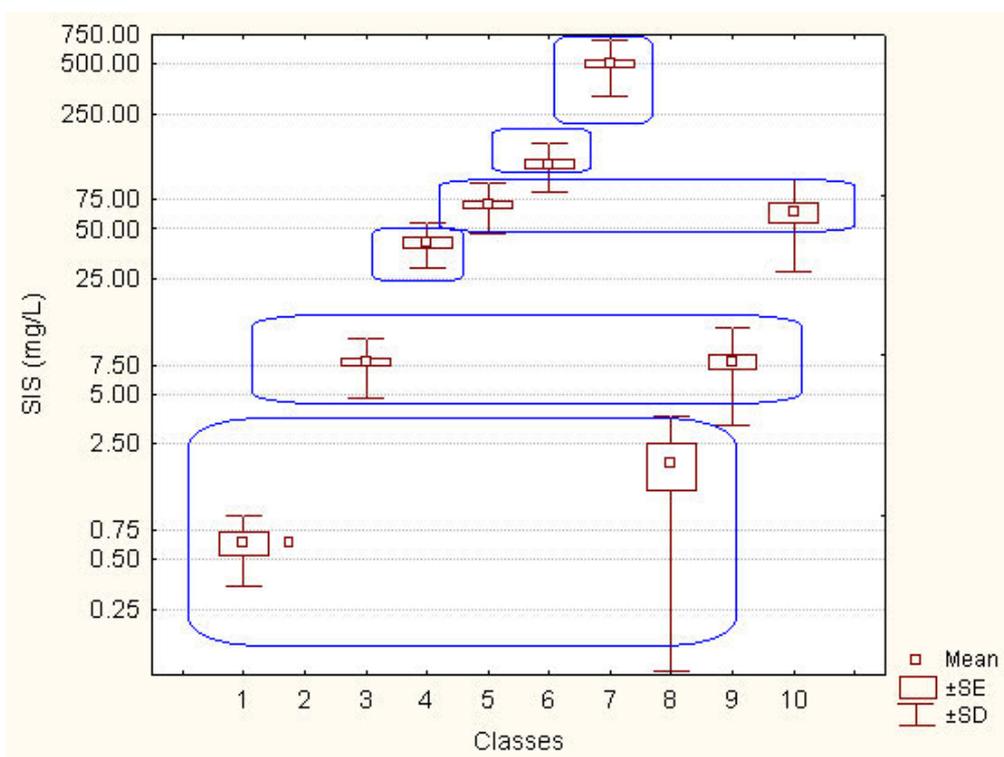


Figura 4.13 - Gráfico Box-plot da distribuição de SIS (escala logarítmica) em função das classes de água propostas. Destacam-se, nos enquadramentos em azul, os níveis diferentes estatisticamente (Teste-t com nível significância de 5%).

Apenas dois níveis de COD foram identificados. No primeiro com concentrações até 3 ppm está a Classe-1, cuja distribuição é estatisticamente diferente das demais classes que apresentam concentrações entre 3 e 10 ppm de COD. Esses resultados indicam que, com exceção a Classe-1, todas apresentam níveis consideráveis de COD em suas amostras sugerindo que

mesmo as classes com altas concentrações de SIS apresentam matéria orgânica dissolvida. Isso pode ser explicado pelo fato de que no processo de lixiviação e drenagem há carreamento de matéria orgânica, proveniente de material alóctone, nas classes ricas em Chl-a, bem como, de material orgânico adsorvido às partículas de argila e de granulometria fina nas classes ricas em SIS.

Tabela 4.4- Enquadramento das classes em níveis de concentração de COD (nível de significância de 5%).

nível	COD (ppm)	classes
1	até 3	1
2	3 a 10	demais classes

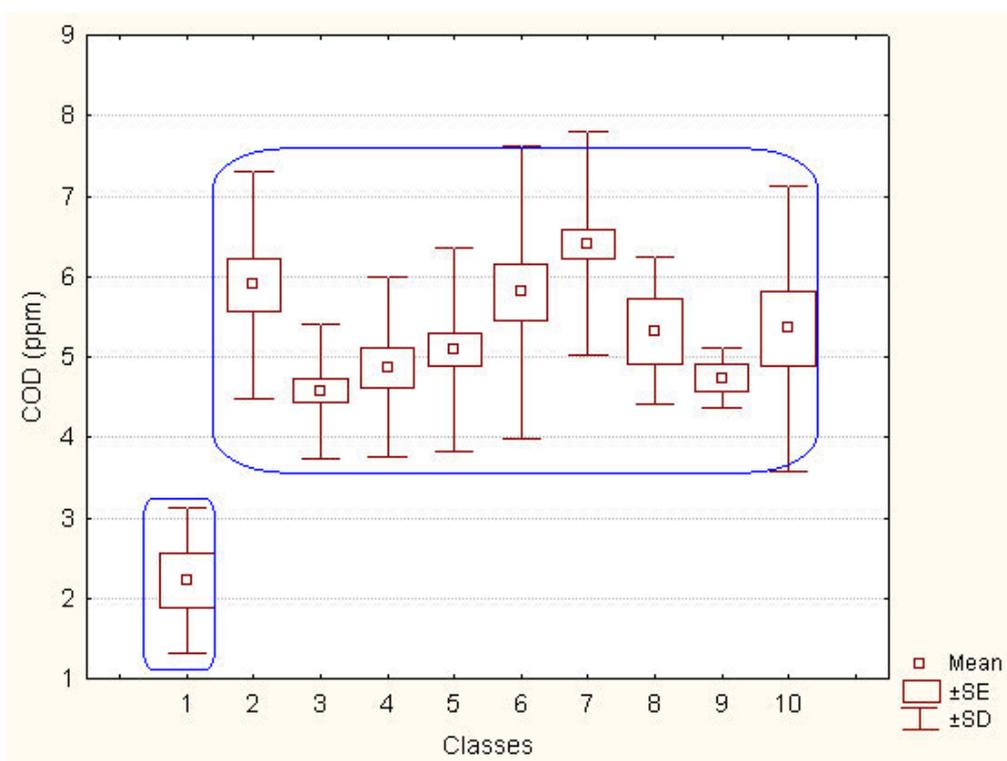


Figura 4.14 - Gráfico Box-plot da distribuição de COD em função das classes de água propostas. Destacam-se, nos enquadramentos em azul, os níveis diferentes estatisticamente (Teste-t com nível significância de 5%).

A divisão em níveis de concentração de COA permite separar as classes em diferentes tipos de água, de modo que cada uma apresenta características limnológicas singulares. Por exemplo, as classes 1-clara e 2-preta estão enquadradas nos primeiros níveis de Chl- e SIS, mas em níveis diferentes de COD. O mesmo raciocínio pode ser realizado para a separação de cada uma das classes. Esse enquadramento é ilustrado de forma esquemática na Figura 4.15, a partir das médias de COA de cada. Percebe-se que não há sobreposição dos pontos o que indica alta separabilidade limnológica entre classes da biblioteca.

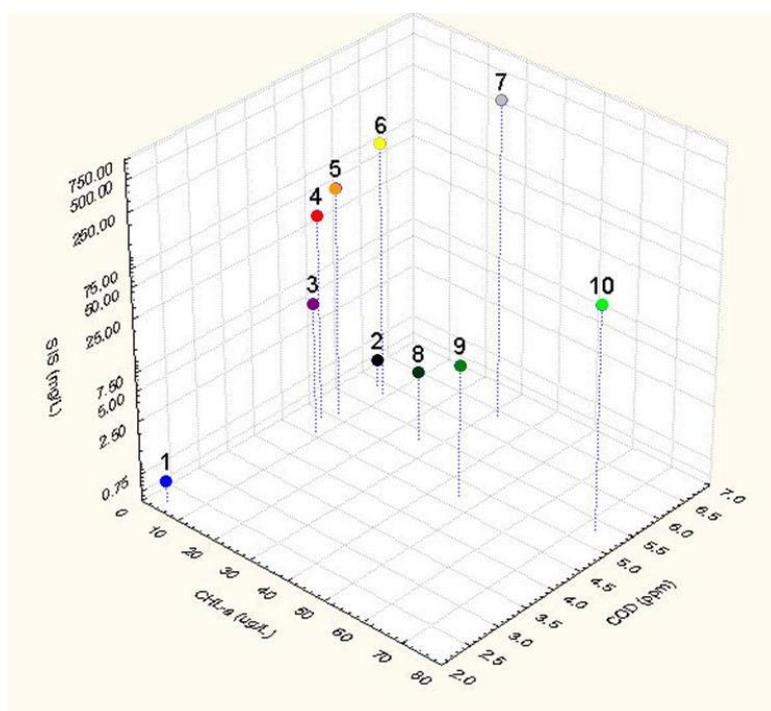


Figura 4.15 - Distribuição das classes da biblioteca função das concentrações médias de COD (eixo X), Chl-a (eixo Y) e SIS (eixo Z, escala logarítmica).

Apesar dos Testes-t confirmarem a separabilidade dos níveis propostos é possível verificar que há sobreposição dos desvios padrões das concentrações médias de Chl-a entre as classes 8, 9 e 10 (Figura 4.12). Isso ocorre pela presença de amostras que são semelhantes espectralmente à classe a que foram atribuídas no processo iterativo, mas que apresentam valores de Chl-a

extremos, contribuindo para a amplitude do desvio padrão. A alta variabilidade da concentração de Chl-a intra-classe pode ser atribuída em parte a não uniformidade do processo de coleta e análise do pigmento, que por serem organismos vivos estão sujeitos ao processo de degradação à feofitina. A falta de dados de feofitina, entretanto, impossibilita análises mais avançadas sobre a degradação de Chl-a e influências nas concentrações determinadas em laboratório.

Já os níveis de SIS foram mais consistentes (Figura 4.13) porque: 1) sua determinação em laboratório é mais precisa do que a de Chl-a ; 2) é menos sujeito ao tipo de degradação sofrida pelos pigmentos; 3) a contribuição do espalhamento pelo SIS domina o sinal dos demais COA; 4) o espalhamento do SIS aumenta a RSR (Razão Sinal Ruído). Dessa forma, os agrupamentos com dominância de SIS foram mais homogêneos espectralmente e também limnologicamente.

4.3 Separabilidade Espectral das Classes

De modo a verificar a coerência espectral interna das 10 classes propostas, isto é, verificar se as curvas médias são representativas das classes, foi realizada a classificação SAM das 327 curvas espectrais tendo como referências as próprias 10 curvas médias. Essa avaliação, entretanto, é tendenciosa, pois usa as mesmas amostras aplicadas na geração da biblioteca de espectros de referência das 10 classes de água. Idealmente, se os espectros de referência fossem exclusivos das classes, o desempenho seria 100 % para todas as classes.

A acurácia total dessa classificação foi de 86%. O desempenho, no entanto, não foi o mesmo para todas as classes (Tabela 4.5). Vale ressaltar que pelo limiar de 0.125 radianos, 14 amostras não foram classificadas e, portanto, foram considerados erros de classificação.

Tabela 4.5 - Matriz de confusão da classificação das 327 amostras obtidas *in situ*, tendo como verdade de campo as próprias classes à que cada curva foi atribuída no processo de definição de suas médias.

classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Não-class	n total	% acerto
1	47%	7%						13%			33%	15	47%
2	11%	63%	11%								16%	19	63%
3			92%	2%	2%			2%	3%			59	92%
4			4%	96%								23	96%
5				9%	85%	4%				2%		47	85%
6						97%	3%					35	97%
7							100%					58	100%
8	15%		8%					69%			8%	13	69%
9	3%		3%					3%	81%		11%	36	81%
10					5%	9%		5%	5%	73%	5%	22	73%
n total	12	13	59	27	42	38	59	14	32	17	14	327	86%

A classe com a menor acurácia foi a Classe 1-Clara com 47% de acerto em 10 amostras classificadas. Nota-se que 13% amostras da Classe-1 foram classificadas na Classe-8 porque essas apresentam feições espectrais de Chl-a, que embora sutis, permitem que sejam confundidas. Além disso, como discutido na Seção 4.1.1, as amostras da Classe-1 apresentam alta diferença angular média na faixa do IVP o que contribui para a não classificação de 5 (33%) amostras dessa classe, pois seus limiares (em radianos) foram superiores a 0,125. A mesma explicação pode ser atribuída ao fato de que 9 amostras não foram classificadas na Classe-2, que apesar disso apresenta razoável acurácia (63%).

Já nas classes com domínio de SIS o desempenho foi igual a 92% na Classe-3 e alcançou 100% em 58 pontos classificados na Classe-7. Percebe-se que nas massas de águas com predomínio de SIS há maior uniformidade espectral intra-classe, o que lhes garante melhor desempenho da classificação por SAM e baixo número de amostras não classificadas.

Por sua vez, águas com baixa concentração de SIS e menor turbidez a confusão da classificação é maior (Tabela 4.5). Isso ocorre porque as classes

de baixa turbidez (classes 1, 2 e 8) apresentam baixo sinal médio (em torno de 3% de reflectância) e estão sujeitas a maior interferência de ruídos e espalhamento atmosférico. Dessa forma, as diferenças angulares são maiores resultando em erros de classificação e maior número de amostras não classificadas. Por outro lado, a ausência de SIS no sinal dessas classes permite que o comportamento espectral do COD (Classe-2) e Chl-a (Classe-8), mesmo que em baixas concentrações, seja identificado. O que não ocorre quando essas baixas concentrações de COD e Chl-a ocorrem em amostras ricas em SIS, pelo fato de o espalhamento desse último dominar o sinal medido (SVÄB et al., 2005).

Nas classes ricas em Chl-a houve alta acurácia na classificação da Classe-9 (81%), pois, como verificado na descrição dessa classe (Seção 4.1.9), as feições de Chl-a são bastante pronunciadas com baixa variabilidade angular. No entanto, na Classe-10 houve confusão de alguma de suas amostras com as classes ricas em SIS (classes 5 e 6). Como discutido em 4.1.10 a Classe-10 é caracterizada pela presença espectral marcante de Chl-a e SIS, o que justifica claramente os erros de classificação mencionados já que o SIS apresenta comportamento dominante no sinal radiométrico. Apesar disso, o desempenho foi de 80% de acerto em 20 amostras classificadas.

A análise dos resultados da classificação SAM sugere que a proporção dos COA é determinante para a composição final do sinal espectral medido pelo sensor e que as feições de Chl-a só são espectralmente perceptíveis quando sua proporção em relação ao SIS (em mg/L) é de até 1000 vezes (Classe-10). Acima desse valor dificilmente as feições espectrais de Chl-a são detectadas pelo sensor como ocorre nas classes 4 a 7 (Figura 4.16). Já nas classes em que essa proporção é menor (250 vezes) como nas classes 8 e 9, as feições de Chl-a são mais proeminentes, pois esse COA passa a dominar a composição do sinal medido.

Apesar das baixas concentrações de Chl-a, a Classe 1-clara apresenta proporções semelhantes às classes 8 e 9 (Tabela 4.6), por isso há confusão espectral entre elas (Tabela 4.5) já que as mínimas concentrações de Chl-a podem – em ausência de outros COA - contribuir para o sinal registrado apresentar feições de Chl-a semelhantes à Classe-8.

Tabela 4.6 - Proporção entre as médias de COD e CID, e entre SIS e Chl-a das classes da biblioteca.

	COD (ppm)/ CID (ppm)	SIS(mg/L)/ Chla(mg/L)
Classe 1	1.2	166
Classe 2	6.5	118
Classe 3	1.7	963
Classe 4	0.4	7792
Classe 5	0.3	10260
Classe 6	0.4	14470
Classe 7	0.8	15807
Classe 8	1.2	85
Classe 9	0.6	175
Classe 10	0.6	846

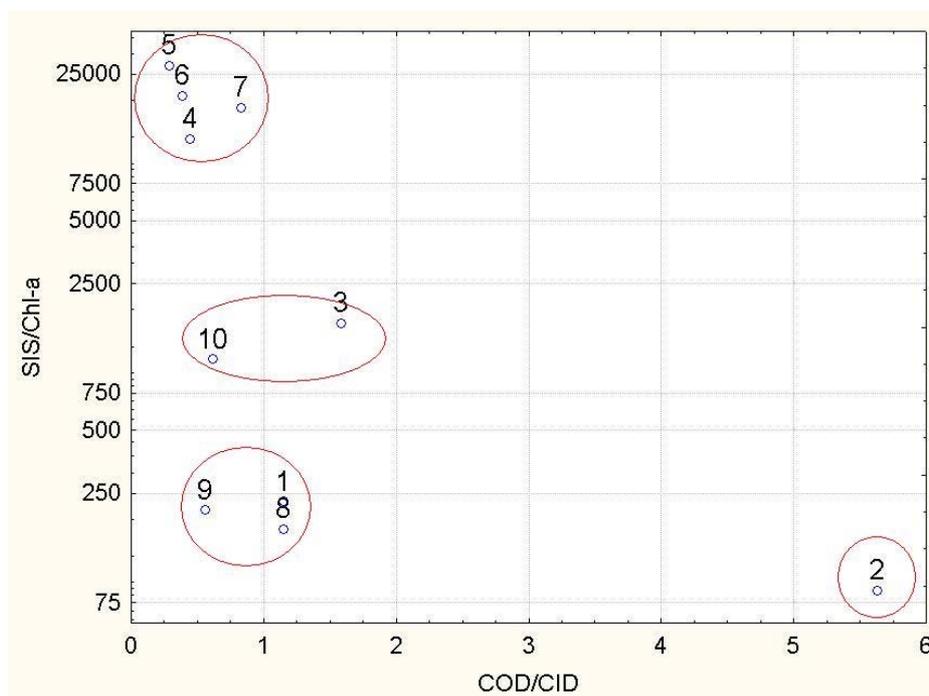


Figura 4.16 - Gráfico da distribuição das 10 classes da biblioteca em função das proporções entre COD e CID (em ppm), e entre SIS e Chl-a (em mg/L). Destaque para os agrupamentos identificados.

Nas classes 3 e 10 há um equilíbrio entre as proporções dos COA em escalas de concentrações diferentes. Enquanto na primeira as concentrações médias de SIS e Chl-a são em torno de 8 unidades (mg/L e $\mu\text{g/L}$, respectivamente), na Classe-10 as concentrações chegam a 200 unidades. Espectralmente, no entanto, ambas apresentam uma curva espectral com influência de SIS e Chl-a (Seções 4.1.3 e 4.1.10 respectivamente). A curva espectral da Classe-3 apresenta sinal com predomínio de SIS e ligeira feição de Chl-a, e na Classe-10 o predomínio é de Chl-a com fortes bandas de absorção em 675 nm, mas com elevação da radiação na região do vermelho em função do espalhamento por SIS.

Nessa relação entre proporções de COA a Classe-2 se destaca (Figura 4.16) por alta relação COD/CID e baixa relação SIS/Chl-a, confirmando o motivo de

seu nome e a hipótese de que as amostras dessa classe são ricas em matéria orgânica dissolvida (ver Seção 4.1.2).

4.4 Validação da Biblioteca

Das 40 amostras reservadas inicialmente para validação da biblioteca espectral, 35 foram classificadas, com limiar de aceitação de 0,125 radianos, das quais 33 foram corretamente classificadas. Percebe-se que os espectros não classificados pertencem às classes de baixo sinal médio, e conseqüentemente, sujeitos a maior variabilidade espectral, principalmente na região do IVP. Além das amostras não classificadas, uma das 4 amostras da Classe-5, foi incluída na Classe-4 e uma das amostras da Classe-3 foi classificada na Classe-8 por apresentar feições de Chl-a mais evidentes que as demais amostras da Classe-3. Como visto anteriormente (Seção 4.3), a Classe-3 apresenta um certo equilíbrio entre Chl-a e SIS no sinal radiométrico, o que faz com que em algumas amostras, a contribuição de Chl-a seja mais evidente do que a de SIS. De qualquer forma, esses resultados corroboram a eficiência da biblioteca (Seção 4.3) na classificação de espectros de campo.

Tabela 4.7- Matriz de confusão da classificação dos 40 pontos amostrais separados previamente para validação da biblioteca.

classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Não-class	n total	% acerto
1	33%										67%	3	33%
2		60%									40%	5	60%
3			67%					17%			17%	6	67%
4				100%								3	100%
5				25%	75%							4	75%
6						100%						4	100%
7							100%					6	100%
8								100%				3	100%
9									100%			2	100%
10										100%		4	100%
n total	1	3	4	4	3	4	6	4	2	4	5	40	83%

4.5 Desempenho da Biblioteca por Campanhas

A análise do desempenho da biblioteca por campanhas demonstra haver consistência dos dados entre elas, já que nenhuma apresentou desempenho significativamente abaixo das demais campanhas. Vale ressaltar que, na Campanha F, 50% das amostras iniciais foram excluídas por inconsistências dos dados espectrais (ver Seção 3.2.2), mas o desempenho geral dessa campanha foi de 75%. Todas as campanhas apresentam 3 ou mais classes em seu conjunto amostral e boa distribuição de amostras entre elas, com exceção à campanha B cuja maioria das amostras foi atribuída à Classe-7.

Tabela 4.8 - Tabela de desempenho da classificação dos 327 pontos amostrais de treinamento separados por campanha.

	total	% acerto
Campanha A	16	88%
B	63	94%
C	65	95%
D	61	84%
E	15	80%
F	32	75%
G	9	67%
H	26	73%
I	40	73%
n total	327	86%

4.6 Simulação de Bandas de Sensores Orbitais

As classificações por SAM utilizando as curvas espectrais do conjunto amostral inicial (n=327) simuladas para as bandas dos sensores Hyperion e MERIS estão representadas na Tabela 4.8. De modo geral, a simulação espectral dos dois sensores apresentou resultados semelhantes aos espectros originais de 160 bandas (obtidos por sensores manuais). Os valores, no entanto, não são constantes para as classes. A Classe 1-Clara, por exemplo, chega a aumentar o desempenho nas simulações com Hyperion e MERIS. A Classe-7, por sua vez, manteve o 100% de acurácia do classificador nas três simulações.

Tabela 4.9 - Resultado da classificação dos espectros radiométricos do BDSIMA (n=327) em simulações dos sensores Hyperion e MERIS.

Classe	Radiômetro	Hyperion	MERIS
1-Clara	47%	50%	50%
2-Preta	63%	58%	62%
3-SIS10	92%	90%	85%
4-SIS40	96%	96%	92%
5-SIS70	85%	80%	83%
6-SIS150	97%	97%	100%
7-SIS500	100%	100%	100%
8-CHL25	69%	67%	69%
9-CHL50	81%	80%	80%
10-CHL75	73%	63%	63%
TOTAL	86%	82%	83%

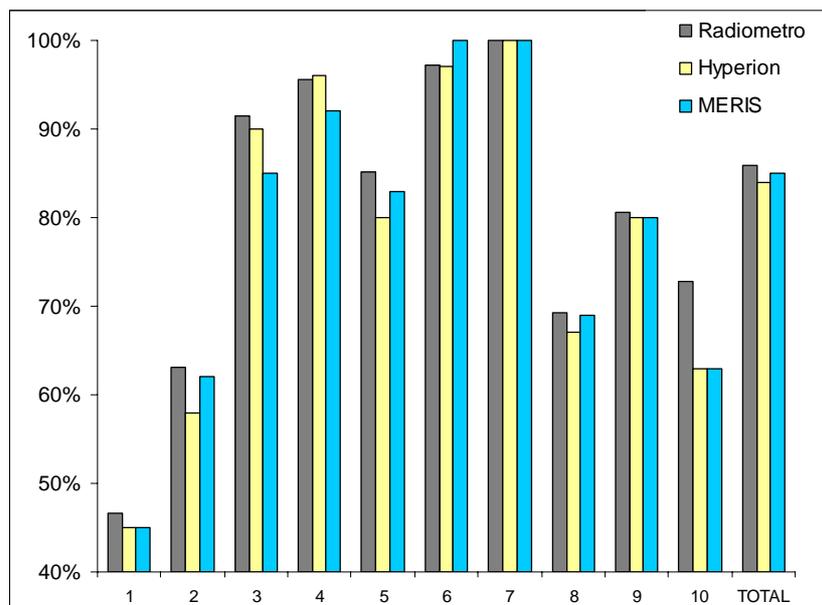


Figura 4.17- Gráfico do resultado da classificação dos pontos do BDSIMA em simulações dos sensores Hyperion e MERIS para cada classe da biblioteca.

Lembrando que nesta seção só são simuladas as resoluções espectrais dos sensores, nada é alterado quanto às resoluções, espaciais e radiométricas, as quais permanecem com as características dos radiômetros de campo.

Conclui-se, portanto, que a diferença da resolução espectral entre sensores Hyperion e MERIS não é limitante para identificação das classes propostas pela classificação SAM, o que viabiliza, do ponto de vista da resolução espectral, a aplicação da biblioteca para classificação de imagens de ambos os sensores.

4.7 Classificação SAM das Imagens Hiperespectrais

4.7.1 Hyperion

Uma vez construída e validada a biblioteca espectral de águas para as AAA é possível utilizá-la como referência para a classificação de imagens hiperespectrais.

A primeira imagem hiperespectral classificada por SAM foi a imagem Hyperion de 23/06/2005, no intervalo espectral entre 480 e 900 nm e com limiar de aceitação de 0,2 radianos. A acurácia total dessa classificação tendo como verdade de campo as 44 amostras da campanha I foi de 48%. O fraco desempenho deve-se à não identificação das classes com predomínio de Chl-a, classes 8 e 9 (0%, n=5 e n=1, respectivamente) e ao baixo desempenho da Classe 3-SIS10 (41%, n=22). Por outro lado verifica-se melhor desempenho das classes com predomínio de SIS, classes 4 (60%) e 5 (100%) no rio Amazonas. E da Classe 1-clara (86%) no rio Tapajós (Tabela 4.9 e Figura 4.18).

Tabela 4.10 - Matriz de confusão da classificação da imagem Hyperion tendo como verdade de campo as 44 amostras da campanha I.

Verdade de campo	Classe											n total	% acerto	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Não-class			
1	86%	14%											7	86%
2		50%					50%						2	50%
3	14%	9%	41%	14%	9%	14%							22	41%
4				60%	40%								5	60%
5					100%								2	100%
6													0	-
7													0	-
8	20%	20%					20%					40%	5	0%
9	100%												1	0%
10													0	-
n total	11	5	9	6	6	3	2	0	0	0	2	44	48%	

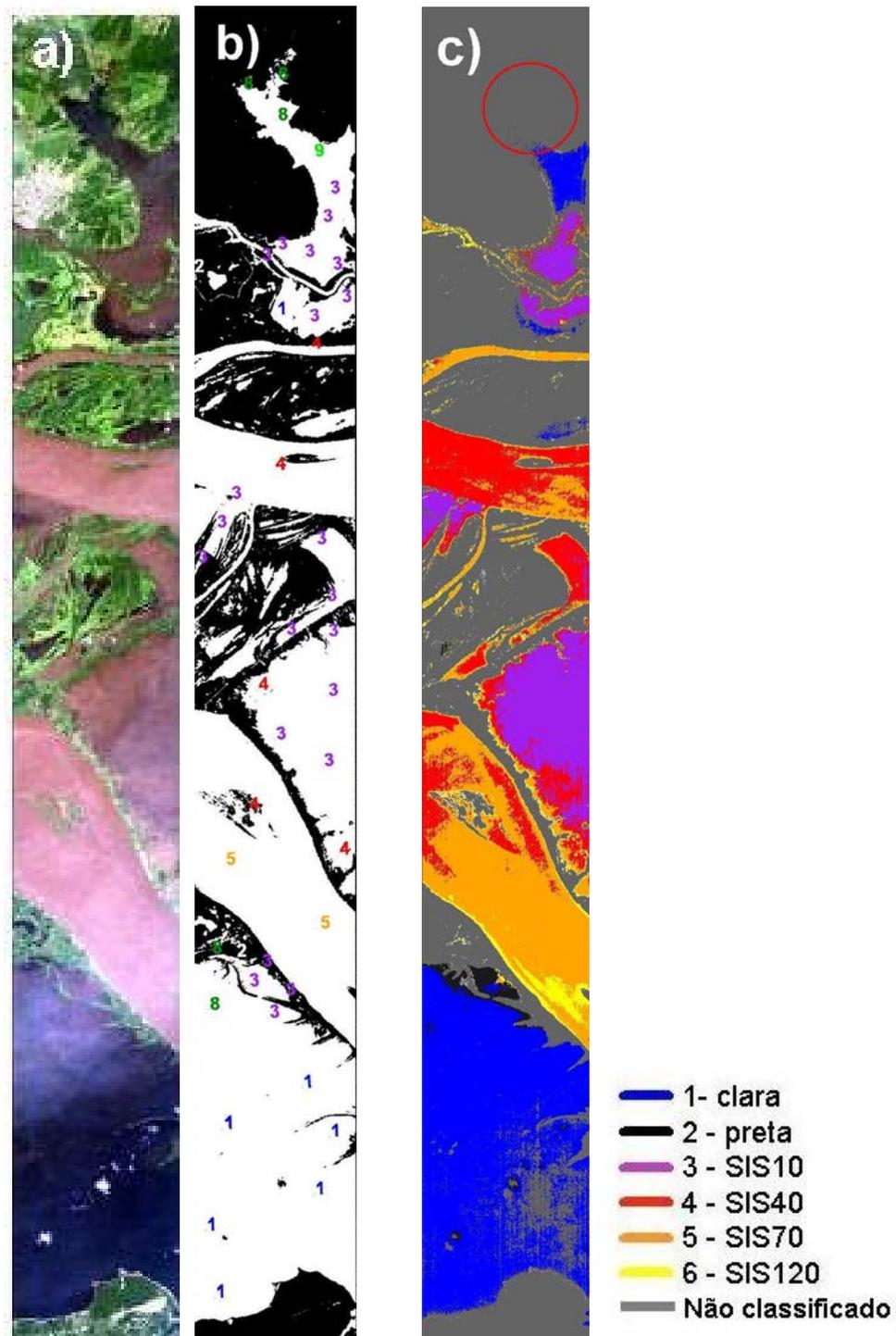


Figura 4.18 - Imagem Hyperion classificada pelo SAM; a) Composição colorida verdadeira (640 – vermelho; 557 – verde; e 468 – azul); b) máscara da água (em branco) contendo verdade terrestre os 44 pontos obtidos na campanha I; c) classificação SAM no intervalo entre 480 e 895 nm, destaque para o Lago Curumuru (topo da figura) não classificado.

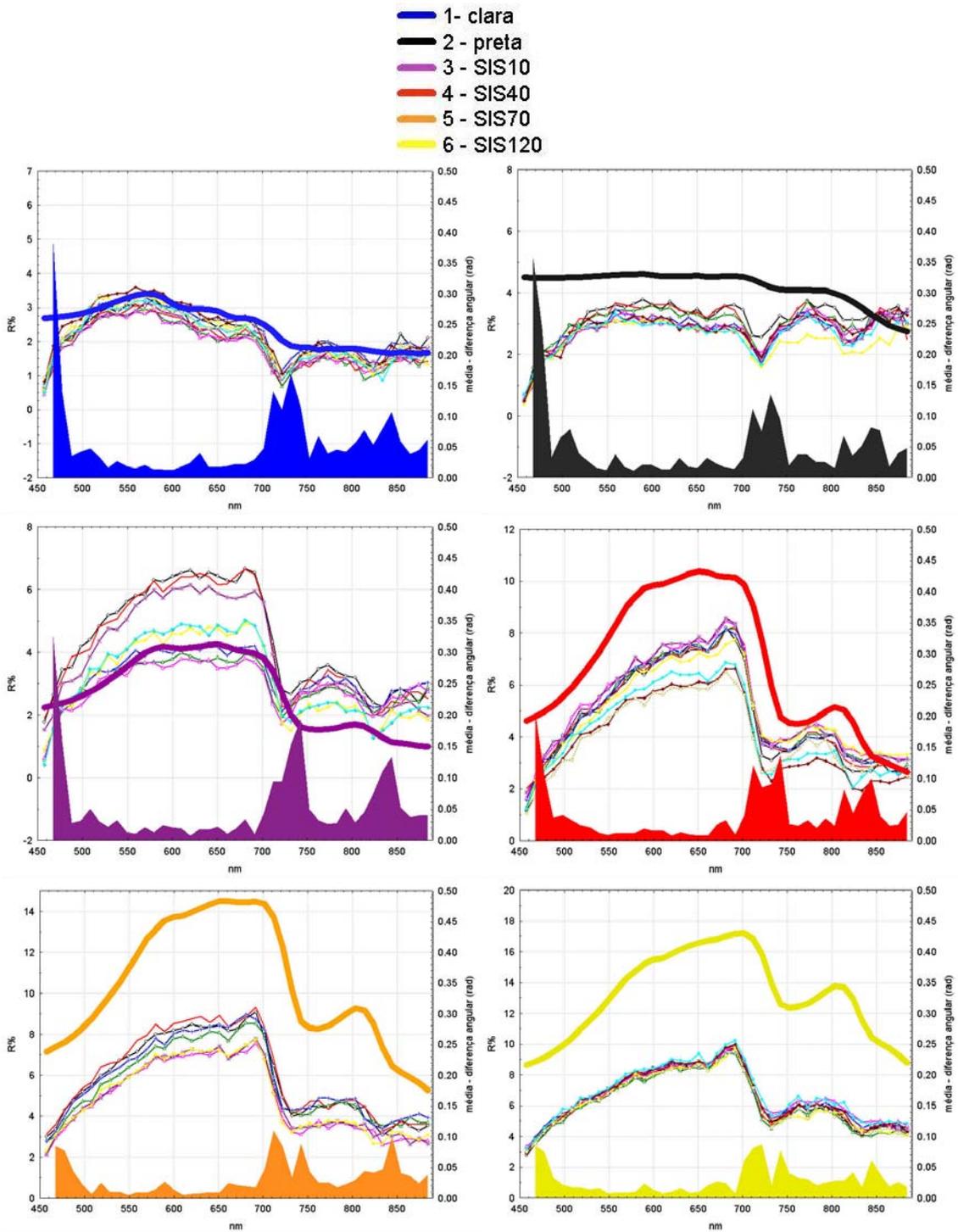


Figura 4.19 - Comparação das curvas de referências da biblioteca com curvas espectrais retiradas da imagem Hyperion. Eixo da esquerda apresenta valores de R% (representação em linhas) e eixo da direita, valores em raios da diferença angular (representação em áreas).

As amostras das classes 8 e 9 (Figura 4.18.b) ou não foram classificadas, como nas amostras do lago Curumuru (destaque da Figura 4.18.c), ou foram classificados erroneamente na Classe-1, por três razões: 1) o baixo sinal de reflectância das massas d'águas ricas em fitoplâncton, devido à absorção pelos pigmentos; 2) baixa RSR do sensor Hyperion entre 480 e 900 nm (em média 140:1); 3) diferenças angulares sutis entre as curvas de referência das classes 1 e 8 (Figura 4.19). Esses fatores resultam em curvas com elevado ruído, alta variabilidade angular, o que dificulta a identificação pelo classificador das feições espectrais da Chl-a, características das classes 8 e 9.

No caso da Classe-3 houve superestimação de algumas amostras dessa classe que foram erroneamente atribuídas à Classe-4 devido, principalmente, à presença de brumas em grande parte da imagem (Figura 4.18.a), elevando a reflectância na região do visível. Essa interferência, ainda que seletiva e não constante ao longo do EEM, faz com que massas d'água com características limnológicas semelhantes à Classe-3 apresentem curvaturas espectrais similares à curva de referência da Classe-4 (Figura 4.19), o que leva ao erro do classificador SAM. A interferência da bruma pode ser verificada em praticamente todos os espectros extraídos da imagem (Figura 4.19). Esse fato pode ser deduzido pela análise da profundidade da banda de absorção pela água em 720 nm também presente em todos os espectros. Classificando a mesma imagem através do MLM, Rudorff (2006) verificou que o efeito das brumas superestimou a concentração de Chl-a e elevou o erro da estimativa de SIS.

É justamente nessa região do espectro que se registra a maior diferença angular entre os espectros da imagem e as referências da biblioteca. Nota-se que a absorção por água nos espectros das curvas de referência da biblioteca é em torno de 750 nm, coerente com literatura (Seção 2.1.1), e nos espectros da imagem a absorção máxima é em torno de 725 nm (Figura 4.19). Esse deslocamento provoca uma grande variação angular nessa região espectral em

todas as classes e pode ser explicado pela queda da RSR do Hyperion nos comprimentos de onda maiores que 730 nm. Conforme pode ser observado na Figura 3.8 (Seção 3.2.7), o RSR não é constante ao longo do EEM caindo de 150 para aproximadamente 80:1, a partir da banda 730 nm o que leva à descaracterização da banda de absorção pela água. Além disso, quando comparado aos espectros de campo que deram origem à biblioteca, o sinal registrado em cada pixel do Hyperion resulta da integração de uma área de 900 m², o que pode levar à maior interferência de outros alvos e massas d'água adjacentes, bem como, à maior interferência da radiação espalhada pela atmosfera no sinal registrado pelo fato de a radiação atravessar a atmosfera duas vezes antes de atingir o sensor.

Todos esses fatores explicam as variações angulares identificadas nos espectros da imagem, dão suporte ao baixo desempenho da classificação SAM da imagem Hyperion e justificam o uso do limiar de 0,2 radianos na classificação da imagem (em comparação ao limiar de 0,125 radianos para a classificação dos espectros de campo).

Rudorff et al. (2007) realizaram classificações da mesma imagem utilizando o método empírico por regressões entre concentração de Chl-a e SIS com a primeira derivada de comprimentos de onda específicos, 691 e 711 nm, respectivamente (Figura 4.20). A distribuição e concentração de SIS foram coerentes entre os dois métodos. As classes de SIS predominantes identificadas na imagem pelo SAM são as classes 4 e 5, com concentrações médias de 40 e 70 mg/L, as quais apresentam concentrações de SIS semelhantes às concentrações estimadas pelo algoritmo ($R^2=0,86$ e EQM = 3,49 mg/L) proposto por Rudorff et al. (2007). A diferença entre os dois métodos no mapeamento da imagem foi referente às massas d'água ricas em Chl-a. Enquanto no algoritmo proposto pelo método da regressão estima a Chl-a com $R^2=0,73$ e EQM = 3,97 µg/L, a classificação SAM não permitiu a identificação das classes 8 e 9, pelas razões discutidas anteriormente.

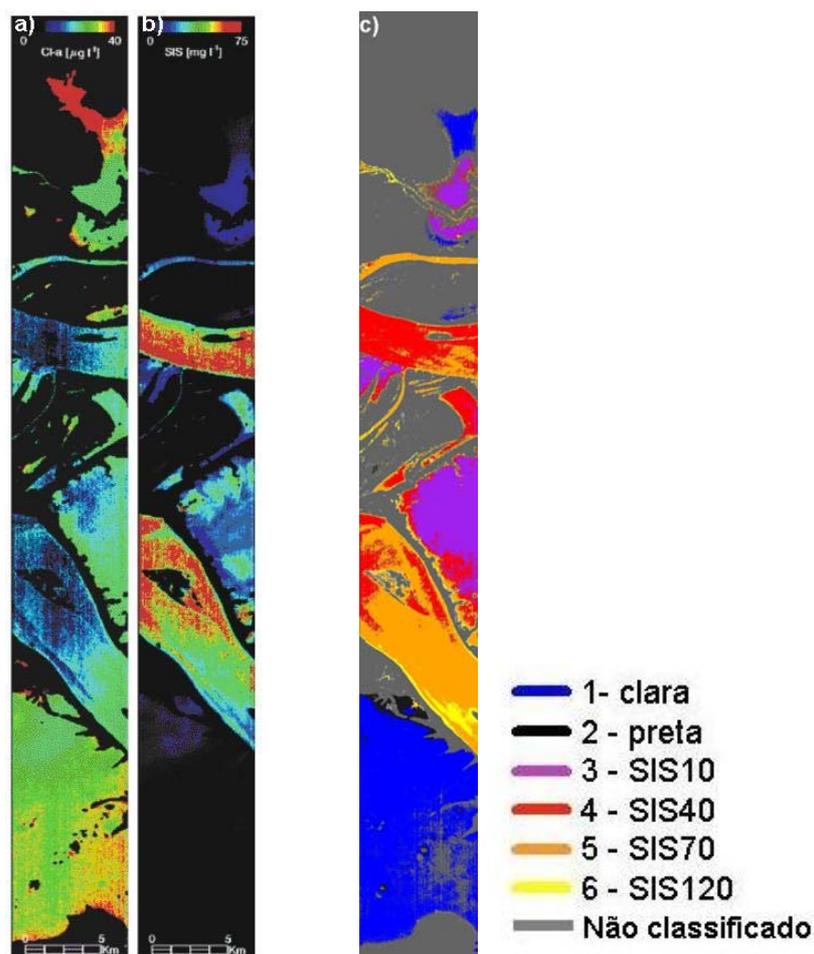


Figura 4.20 - Classificações da imagem Hyperion por métodos empíricos: a) Variações na concentração de Chl-a (em $\mu\text{g/L}$), estimadas a partir da derivativa em 691nm; b) Variações na concentração de SIS (em mg/L), estimadas a partir da derivativa em 711nm, segundo Rudorff et al. (2007). E classificação pelo método SAM (c) resultante deste trabalho (mesma classificação da Figura 4.18.c).

De fato, os modelos de estimativas de Chl-a utilizando dados orbitais são, geralmente, menos precisos do que os modelos de estimativa de SIS (BRANDO e DEKKER, 2003; RUDORFF et al., 2007) pelas seguintes razões: a) a distribuição de fitoplâncton ocorre de forma agrupada e não homogênea no corpo d'água dificultando seu registro pelo sensor orbital, levando em consideração a integração do sinal em pixels; b) variabilidade da concentração de Chl-a na coluna d'água devido às condições ecológicas e fisiológicas do

fitoplâncton (ver Seção 4.1.8); e c) variabilidade da concentração de Chl-a decorrentes dos processos de degradação à feofitina nas etapas de amostragem, estocagem e análise de determinação do pigmento. Além disso, o próprio comportamento espectral da Chl-a é mais complexo (variações de 2° ordem) com feições diagnósticas estreitas e, geralmente, de sinal baixo dificultando ainda mais a sua identificação por sensores orbitais.

4.7.2 MERIS

A segunda imagem classificada, tendo como referência a biblioteca espectral construída, foi a imagem MERIS de 13/06/2004. O limiar da classificação da imagem MERIS foi mantido em 0.2 radiano. O maior valor do limiar nas classificações dos espectros da imagem, quando comparados aos espectros de campo (0,125 radiano), deve-se às elevadas variações angulares em relação às referências pelo fato de que cada pixel na imagem integra um sinal referente a uma área de 90 000 m². Essa característica permite a integração de sinais de alvos menos homogêneos e com maior interferência ambiental, resultando em maior variação angular dos espectros. Assim, a aplicação desse sensor ao monitoramento de ecossistemas aquáticos é limitada a corpos d'águas extensos como os das AAA.

A acurácia total da classificação, baseada nas 73 amostras da campanha D foi de 67%. A maioria dos erros de classificação deve-se à atribuição de amostras da Classe-3 à Classe-4 (destaque na Figura 4.21) em função das feições angulares apresentadas. A principal feição identificada em todos os espectros da imagem atribuídos à Classe-4 é o pico máximo de espalhamento por SIS em 681 nm. Enquanto nos espectros da imagem agrupados na Classe-3 o pico máximo de espalhamento é em 665 nm. Nesse caso, talvez pelo menor número de bandas do sensor MERIS a forma do espectro não é adequadamente caracterizada tornando, nesse caso, um fator limitante a

discriminação das classes usando o classificador SAM cujo algoritmo se baseia essencialmente na forma das curvas (Seção 2.53).

Tabela 4.11 - Matriz de confusão da classificação da imagem MERIS tendo como verdade de campo as 73 amostras da campanha D.

Verdade de campo	Classe											n total	% acerto	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Não-class			
1													0	-
2		100%											1	100%
3			52%	19%	11%	4%			11%			4%	27	52%
4				100%									3	100%
5													0	-
6													0	-
7													0	-
8								20%		60%	20%		5	0%
9			6%							83%	6%	6%	36	83%
10											100%		1	100%
n total	0	1	16	8	3	1	1	0	34	6	3	73	73	67%

A Classe-8 também apresentou baixa acurácia na classificação, uma vez que 3 das 5 amostras foram classificadas na Classe-9, ou seja, os espectros retirados da imagem referentes à Classe-8 apresentam feições de Chl-a bastante pronunciadas e similares à Classe-9 e 10. Isso ocorre porque o espectro dos pixels da imagem MERIS (300 m) integra o sinal de uma massa d'água muito extensa e que, provavelmente, no caso da Classe-8 foi contaminada pela resposta espectral da Classe-9 que é dominante na imagem. Além disso, a própria dinâmica de circulação de água entre a data da imagem e a data em que foram coletadas as amostras de COA, que serviram de base para determinar a acurácia da classificação, podem ter afetado os resultados.

Enquanto a cena do MERIS foi adquirida instantaneamente, as amostras de COA foram coletadas ao longo de 20 dias, simultaneamente aos espectros de campo que deram origem à biblioteca (BARBOSA, 2005), estando, portanto, sujeitas a variações ambientais tais como vento, circulação da água, bem como, ao ciclo da vida do fitoplâncton.

De fato, Barbosa et al. (2008) verifica que há menor precisão da estimativa de COA em amostras coletadas defasadas de 5 dias da passagem do satélite do que em amostras coletadas com até 2 dias de defasagem.

Apesar de o sensor MERIS integrar o sinal de uma área bastante ampla, ele apresenta bandas espectrais estrategicamente posicionadas para a distinção das feições espectrais da água e COA (ESA, 2009). Assim, mesmo com menor número de bandas (15), em relação ao sensor Hyperion (50), esse sensor permite caracterizar tipos de água com feições espectrais estreitas (por ex. Chl-a com absorção em 680 e espalhamento em 710 nm) pelo fato de apresentar alta RSR (1700:1).

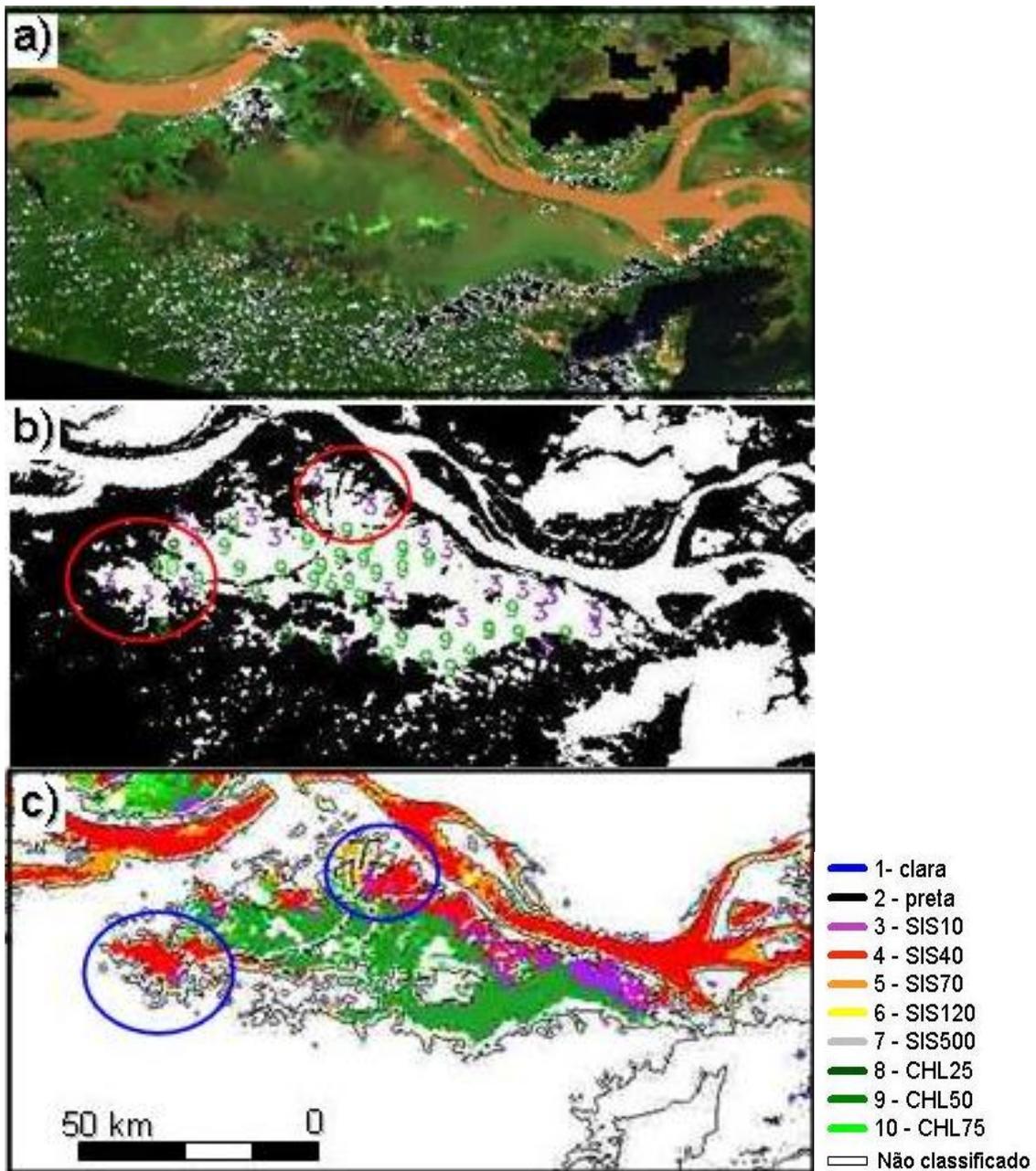


Figura 4.21 - Imagem MERIS classificada pelo SAM; a) Composição colorida verdadeira (640 – vermelho; 557 – verde; e 468 – azul); b) verdade terrestre dos 69 pontos obtidos na campanha D; c) classificação SAM no intervalo entre 412 e 900 nm. Destaque para as regiões da imagem com erro de classificação.

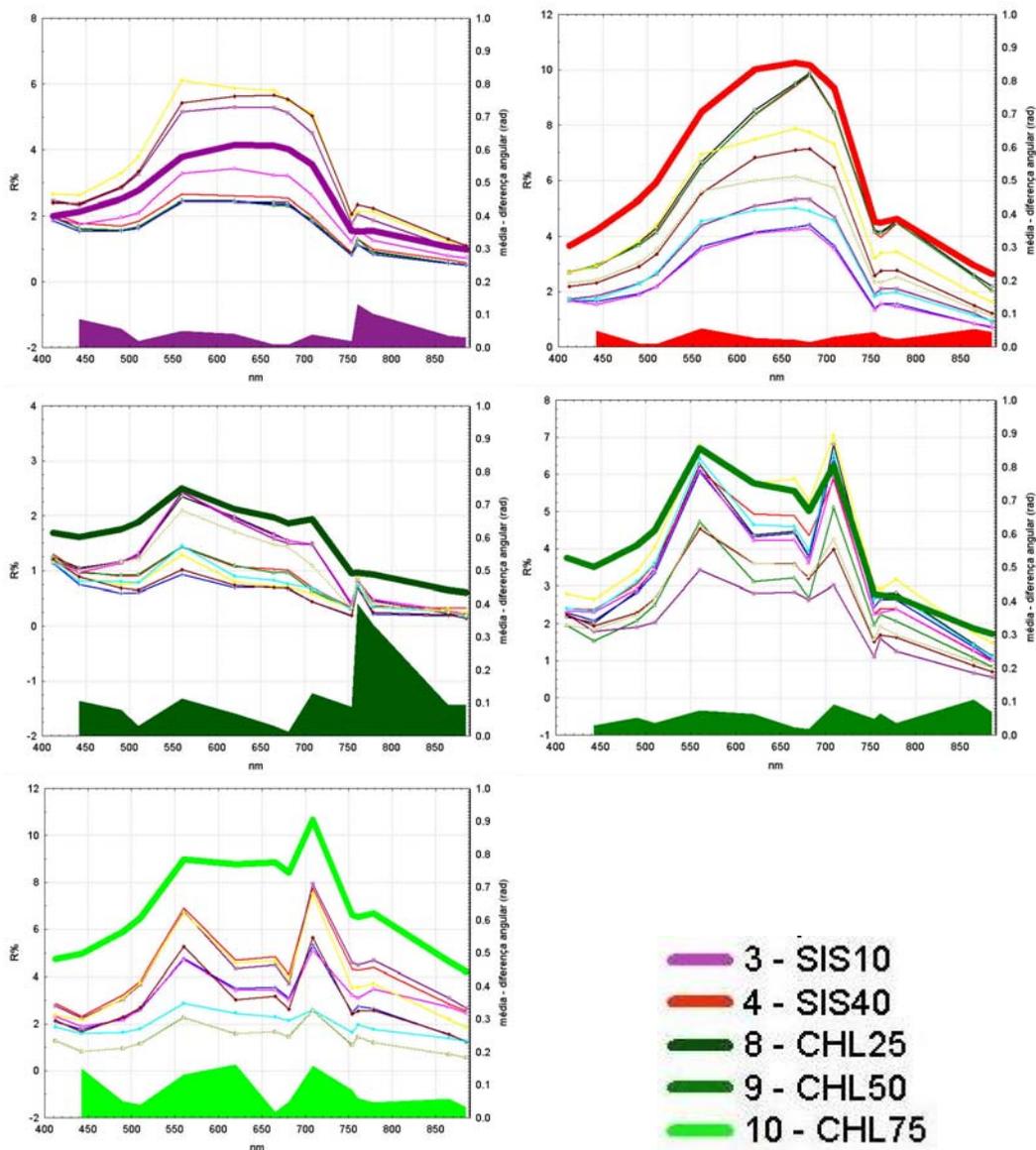


Figura 4.22 - Comparação das curvas de referências da biblioteca com curvas espectrais retiradas da imagem MERIS. Eixo da esquerda apresenta valores de R% e eixo da direita, valores em radianos da diferença angular.

A comparação da acurácia de classificação da imagem Hyperion e da imagem MERIS, 48 e 67%, respectivamente, parece sugerir que para alvos aquáticos complexos, como os deste estudo, o principal fator limitante à discriminação

das classes da biblioteca foi a RSR, já que nas simulações de bandas o desempenho dos dois sensores foi semelhante.

De fato, as diferenças de resolução espectral entre os sensores Hyperion e MERIS são mínimas, e a resolução radiométrica é absolutamente igual (12 bits). As principais diferenças entre os sensores são o número de bandas, o tamanho do pixel, a largura da faixa imageada e a RSR. Teoricamente, a largura da faixa imageada, o tamanho do pixel e o número de bandas favorecem o sensor Hyperion. Portanto, a RSR torna-se a principal característica dos sensores a explicar as diferenças de desempenho da classificação entre eles. Conforme observado anteriormente por (KUTSER et al., 2006) a identificação de alvos aquáticos depende da disponibilidade de sensores com RSR maior ou igual a 1000:1, como é o caso do sensor MERIS e dos sensores radiométricos de campo.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos objetivos propostos e nos resultados alcançados, as principais conclusões do trabalho foram:

- É estabelecida neste trabalho uma nova abordagem de definição de espectros de referência para a classificação de massas d'água. Essa abordagem integra os dados espectrais às características limnológicas de 10 classes de tipos de água para classificação por SAM de quaisquer espectros de campo adquiridos em corpos d'água das AAA.
- Utilizando a biblioteca como referência para a classificação de espectros de campo pode-se estimar intervalos de concentração de COA de massas de água das AAA com 83% de acurácia total sem a necessidade de coletas de dados limnológicos tornando-se uma ferramenta de monitoramento prática que pode reduzir os custos de análises laboratoriais para sua determinação.
- A proporção entre os COA é determinante para a composição do sinal radiométrico. As feições espectrais de Chl-a só são identificáveis em razões (SIS/Chl-a) menores ou iguais a 1000. Em razões superiores, o sinal de espalhamento por SIS suprime as feições espectrais da Chl-a.
- Na aplicação da biblioteca de tipos de água para a classificação por SAM de imagens hiperespectrais, Hyperion e MERIS, conclui-se que é possível identificar e mapear as classes de água propostas. Portanto, se estabelece um método de classificação de corpos d'água em imagens de caráter prático, pois não há a necessidade de coleta de COA *in situ* o que pode reduzir os custos de monitoramento e estimativas da distribuição de COA nas AAA.

- Para que a biblioteca gerada a partir de espectros de campo possa ser aplicada a imagens orbitais são necessários requisitos técnicos rígidos que permitam a correta identificação das feições espectrais da água e seus COA, tais como: RSR elevada; resolução radiométrica de 10 bits ou superior; configuração de número, posição e largura de bandas espectrais que considerem as feições espectrais da água e seus COA; e resolução espacial condizente com o local e o objetivo do estudo.

Em virtude da experiência adquirida, recomenda-se:

- Testar o desempenho da biblioteca espectral utilizando intervalos espectrais que excluam total ou parcialmente a região entre 700 e 900 nm, devido às altas variações angulares observadas em praticamente todas as classes.
- Testar o uso de técnicas de análises de dados espectrais tais como, remoção do contínuo e análise derivativa, tanto nos dados quanto na biblioteca de referência.
- Realizar o procedimento de definição das curvas de referência descrito na Seção 3.2 utilizando de 20 a 30% do número amostral para a validação da biblioteca espectral.
- Utilizar a chave de classificação limnológica proposta no Apêndice C, caso se queira conhecer à qual classe da biblioteca uma amostra de água das AAA pertence e que possa servir de verdade de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKLESON, S.G. Light in shallow waters: A brief research review. **Limnol. Oceanogr.** v.48, n.1, p. 323-328, 2003.

BALDRIDGE, A. M., HOOK, S. J., GROVE, C. I. e RIVERA, G. The ASTER Spectral Library Version 2.0. **Remote Sensing of Environment**, 2009 (In press).

BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curai/Rio Amazonas**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

BARBOSA, C., NOVO, E., RUDORFF, C., MARTINEZ, J. Efeito do intervalo de aquisição entre dados in situ e de satélite sobre a relação entre a reflectância da água e seus componentes opticamente ativos. In: CONFERÊNCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL: AMAZÔNIA EM PERSPECTIVA, 2008, Manaus. **Resumos...**Manaus: INPA, 2008.

BRANDO, V.E. e A.G. DEKKER. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.6, p.1378-1387, 2003.

BRICAUD, A.; MOREL, A.; PRIEUR, L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains; **Limnol. Oceanogr.**, v.26, n.1, p.43-53, 1981.

CARLSON, R. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**. v.22, n.2, 1977.

CLARK, R. N. e ROUSH, T. L., Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications. **Journal of Geophysical Research**. v.89, n.7, p. 6329 – 6340, 1984.

COOLEY, T.; CIPAR, J.; LOCKWOOD, R.; GRIGSBY, P. Terrain Categorization using a Background Spectral Library. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 2003.

COSTA, M.; TELMER, K.; NOVO, E. Spectral composition of the euphotic zone of diverse case 2 Amazonian waters: a baseline for understanding the impacts of land use on the light attenuation in the water. In: OCEAN OPTICS CONFERENCE, 17., 2006, Quebec. **Proceedings...**, Quebec: SPIE, 2006.

COSTA, M. P. F., TELMER, K; NOVO, E.; PEREIRA-FILHO, W. Light in Amazonian waters and human effects on it: a large-scale monitoring approach. In: OCEAN SCIENCES MEETING, March 3-7, 2008, Orlando. **Proceedings...Orlando:ASLO**, 2008.

DEBBA, P., J.A. van RUITENBEEK, F.D. van der MEER, E.J.M. CARRANZA, e A. STEIN. Optimal field sampling for targeting minerals using hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.99, p. 373-386, 2005.

DEKKER, A. G., **Detection of optical water quality parameters of eutrophic waters by high resolution remote sensing**, PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, 1993.

DURAND, D., J. BIJAOU, e F. CAUNEAU. Optical remote sensing of shallow-water environmental parameters: A feasibility study. **Remote Sensing of Environment**, v.73, p.152-161, 2000.

ENVI. **User's guide**. Research Systems Software. 1999.

ESA (European Space Agency). **Earthnet online**. Disponível em: <<http://envisat.esa.int/instruments/meris/>>. Acesso em: 14 fev. 2009.

FERRARI, G.M., HOEPFFNER, N. e MINGAZZINI, M. Optical properties of the water in a deltaic environment: Prospective tool to analyze satellite data in turbid waters. **Remote Sensing of Environment**, V.58. pp. 69-80. 1996.

GALVÃO, L. S.; PEREIRA, W.; ABDON, M. M.; NOVO, E. M. L. M.; SILVA, J. S. V.; PONZONI, F. J. Spectral reflectance characterization of shallow lakes from the brazilian Pantanal wetlands with field and airborne hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n.21, p. 4093-4112, 2003.

GIARDINO, C., V. BRANDO, A. G. DEKKER, N. STROMBECK, e CANDIANI, G. Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion. **Remote Sensing of Environment**, v.109, p. 183-195, 2007.

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

GORDON H. R., e A. MOREL. **Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery, a review**. New York, Springer-Verlag ed., p.114, Lecture notes on Coastal and estuarine studies,1983.

HAN, L. Estimating chlorophyll-a concentration using first-derivative spectra in coastal water. **International Journal of Remote Sensing**, v.26, n.23. p. 5235-5244, 2005.

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

HELLWEGER, F.L., P. SCHLOSSER, U. LALL, e J.K. WEISSELL. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v.61, p. 437-448, 2004.

HEROLD, M., D.A. ROBERTS, M.E. GARDNER, e P.E. DENNISON. Spectrometry for urban area remote sensing - Development and analysis of spectral library from 350 to 2400 nm. **Remote Sensing of Environment**, v.91, p. 304-319, 2004.

HESS, L. L., MELACK, J. M., FILOSO, S., & WANG, Y. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.33, p. 896–904, 1995.

HIRANO, A., M. MADDEN, e R. WELCH. Hyperspectral image data for mapping wetland vegetation. **Wetlands**, v. 23, n.2, p. 436-448, 2003.

JENSEN, J. **Remote sensing of environment: an Earth resource perspective**. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc. , 2000.

JIAO, H.B.; ZHA, Y.; GAO, J.; LI, Y.M.; WEI, Y.C.; HUANG, J.Z.. Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.19, p. 4267–4276, 2006.

JUNK, W.J.; PIEDADE, M.T.F. Plant life in the floodplain with special references to herbaceous plantas. In: JUNK, W. J. (ed.) **The central amazon floodplain: ecology of a pulsing system**, 1997.

LOBO, F.L., BARBOSA, C., NOVO, E.M.L., YUNES, J.S. Mapping potential cyanobacterial bloom in Patos Lagoon, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, 2009 (Submetido).

KAMPEL, M. e NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: R.B. SOUZA (ed.), **Oceanografia por Satélites**, p.179-196, São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

KIRK, J.T.O. **Light and phtosynthesis in aquatic ecosystems**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

KROON, B. M. Variability of photosystem II quantum yield and related processes in *Chlorella pynrenoidosa* (Chlorophyta) acclimated to an oscillating light regime simulating a mixed photic zone. **Journal of Phycology**, v.30, p. 841 – 852, 1994.

KRUSE, F. A., LEFKOFF, A. B., DIETZ, J. B. Expert System-Based Mineral Mapping in Northern Death Valley, California/Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). **Remote Sens Environ.** v.44, p. 309-336, 1993.

KUTSER, T., A. HERLEVI, K. KALLIO, e H. ARST. A hyperspectral model for interpretation of passive optical remote sensing data from turbid lakes. **The Science of Total Environment**, v.268, p. 47-58, 2001.

KUTSER, T., E. VAHTMÄE, e V. METSAMAA. Spectral library of macroalgae and benthic substrates in Estonian coastal waters. **Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol.** v.55, n.4, p. 329-340, 2006.

LATHROP R. G., LILLESAND T. M., YANDELL B. S. Testing the utility of simple multi-date thematic mapper calibration algorithms for monitoring turbid inland waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 10, p. 2045-2063, 1991.

MILTON, E.J. Principles of field spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n 12, p. 1807-1827, 1987.

MOREIRA, R. C. **Estudo espectral de alvos urbanos com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System)**. 2008. 238 p. (INPE-15339-TDI/1375). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.03.20.00>>. Acesso em: 14 maio 2009.

NOVO, E.M., SHIMABUKURO, Y.E. Spectral mixture analysis of inland tropical waters. **International Journal of Remote Sensing**, v. 15, n.6, p.1351-1356, 1994.

NÓBREGA, I. **Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto – INPE, São José dos Campos, pp. 87, 2005.

PEARLMAN, J., CARMAN, S., LEE, P., LIAO, L., e SEGAL, C. **Hyperion imaging spectrometer on the new millennium program Earth orbiter-1 system**. Redondo Beach, CA: Space and Electronics Group. One Space Park, 1999.

RANDOLPH, K.L.. **Remote sensing of cyanobacteria in case II waters using optically active pigments, chlorophyll-a and phycocyanin**. Submitted to the faculty of the University Graduate School for the degree Master of Science in the Department of Geography of Geography, Indiana University, 2007.

RAO, N.R., P. K. GARG, e S. K. GHOSH. Development of an agricultural crops spectral library and classification of crops at cultivar level using hyperspectral data. **Precision Agric** v.8, p. 173-185, 2007.

RUDORFF, C. M., NOVO, E. L. M., GALVÃO, L. S., PEREIRA FILHO, W. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. **Acta Amazonica**. v.37, n.2, p. 269-280, 2007.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de refletância do sensor hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos**. 2006. 140 p. (INPE-14166-TDI/1083). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/06.12.18.14>>. Acesso em: 14 maio 2009.

SIOLI, H. Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region. **Amazoniana**. v.1, p.74-83, 1984.

SIPPEL, S.J., HAMILTON, S.K., MELACK, J.M. e CHOUDHURY, B.J. Determination of inundation area in the Amazon River floodplain using the SMMR 37 GHz polarization difference. **Remote Sensing of Environment** v.48, p.70-76, 1994.

SOHN, Y. e REBELLO, S. Supervised and unsupervised spectral angle classifiers. **Photogrammetric, Engineering and Remote Sensing**. v. 68, n.12, p. 1271-1280, 2002.

STEFFEN, C. A. Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 969-976. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6163-PRE/2252). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.11.01>>. Acesso em: 14 maio 2009.

STEIN, S. E. Chemical substructure identification by mass spectral library searching. **Journal of the American Society for Mass Spectrometry**, v. 6, n.8, p. 644-655, 1995.

SVÁB, E., TYLER, A. N., PRESTON, T., PRÉSING, M., BALOGH, K.V. Characterizing the spectral reflectance of algae in lake waters with high suspended sediment concentrations. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 5, p. 919-928, 2005.

THIEMANN, S., e H. KAUFMANN. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer. **Remote Sensing of Environment**, v.73, p. 227-235, 2000.

VALÉRIO, A. **Estimativa de parâmetros de qualidade da água por sensoriamento remoto: reservatório de Manso, MT, Brasil**. Dissertação de mestrado em Sensoriamento Remoto – INPE, São José dos Campos, SP, 2009. Em desenvolvimento.

van der MEER, F. Analysis of spectral absorption features in hyperspectral imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.5, p. 55-68, 2004.

VERMAAS, W. et al. In vivo hyperspectral confocal fluorescence imaging to determine pigment localization and distribution in cyanobacterial cells. **PNAS**, v.105, n. 10, 2008.

WOODRUFF, D.L., R.P. STUMPF, J.A. SCOPE, e H.W. PAERL. Remote estimation of water clarity in optically complex estuarine waters. **Remote Sensing of Environment**, v.68, p. 41-52, 1999.

APÊNDICE A – Campanhas de amostragens de água nas AAA

A seguir são apresentadas as localizações dos pontos amostrais, as variáveis limnológicas, bem como, o equipamento radiométrico utilizado em cada uma das 9 campanhas compiladas neste estudo.

CAMPANHAS A, B, C, D e E – Lago Grande do Curuai

O primeiro conjunto é formado por 4 campanhas (Barbosa, 2005) no Lago Grande do Curuai em 4 fases do período hidrológico entre novembro de 2003 e junho de 2004. No total foram amostradas 248 estações de coleta em que foram medidos parâmetros limnológicos e radiométricos (Tabela A.1), para as medidas radiométricas utilizou-se o Spectron SE-590. Além dessas 4 campanhas, foi realizada em setembro de 2006 uma nova campanha no Lago Grande do Curuai de forma a complementar as campanhas anteriores. Nessa última, por sua vez, amostrou-se menos variáveis do que as demais como se pode observar na Tabela A.1. Percebe-se que há grande variação sazonal da concentração de SIS ao longo do ciclo hidrológico atingindo máxima concentração no período de seca nos meses de novembro e dezembro durante a campanha B (Figura A.1).

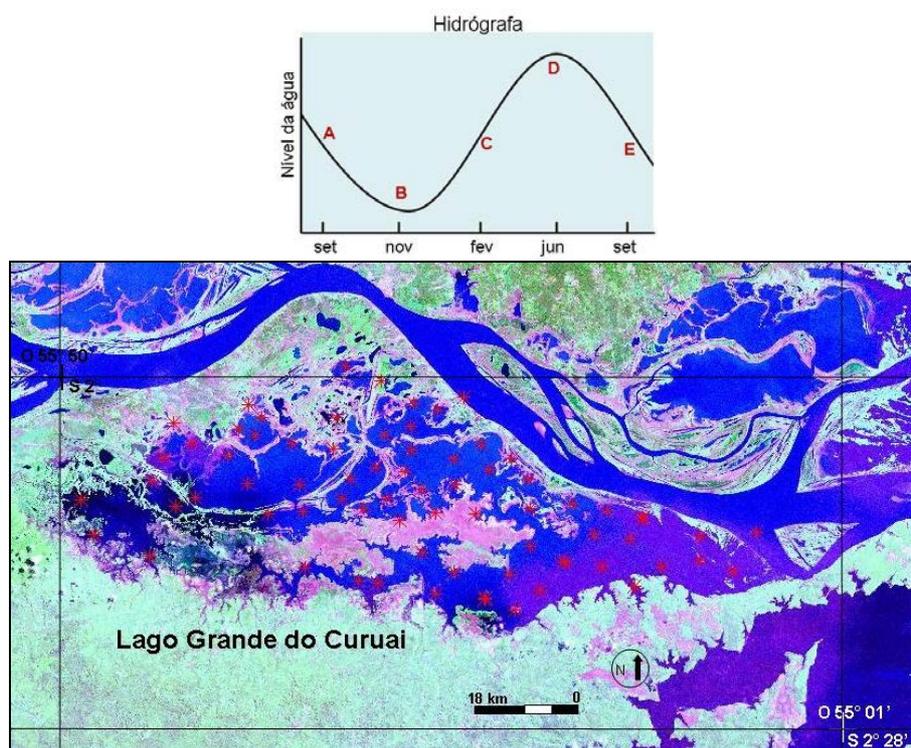


Figura A.1 – Localização dos pontos amostrais das campanhas B, C e D no LCG e indicação do período hidrológico de cada campanha. Nas campanhas A e E foram amostradas menos pontos.

Tabela A.1 – Número amostral, média e desvio padrão (DP) das variáveis limnológicas amostradas nas campanhas de A a E.

variáveis	Campanha A - set/2003			Campanha B - nov/2003			Campanha C - fev/2004			Campanha D - jun/2004			Campanha E - set/2006		
	N	média	DP	N	média	DP	N	média	DP	N	média	DP	N	média	DP
SOS (mg/L)	25	16.7	5.1	72	66.7	30.9	71	15.7	8.5	73	7.1	3.1	0		
SIS (mg/L)	25	55.8	29.7	72	458.7	229.0	71	94.6	56.8	73	8.8	7.9	0		
STS (mg/L)	25	72.5	32.5	72	525.3	258.2	71	110.2	64.7	73	15.8	8.5	0		
Chl-a (ug/L)	25	70.8	39.3	72	32.5	16.6	71	8.2	4.3	74	28.1	21.9	10	54.0	46.6
CID (ppm)	24	11.1	2.3	72	7.5	4.0	71	16.6	4.1	3	3.8	0.6	0		
COD (ppm)	25	5.4	1.3	72	6.0	1.6	71	5.5	1.6	3	4.9	0.1	0		
prof (m)	25	2.4	0.5	71	0.9	0.2	71	2.9	0.4	0			0		
Secchi (m)	25	0.2	0.1	72	0.1	0.0	71	0.1	0.0	73	0.6	0.2	19	0.6	0.9
TempAgua	25	31.3	0.4	72	31.3	0.9	71	30.2	1.3	73	29.8	0.7	19	31.1	0.5
pH	25	7.5	0.6	72	6.7	0.6	71	7.2	0.3	73	7.5	0.8	19	8.2	0.9
CE (mS/cm)	25	31.6	5.1	72	34.6	11.5	71	47.4	7.4	73	32.3	3.6	19	43.5	13.7
OD (mg/L)	25	6.3	1.0	72	4.7	0.4	71	5.9	0.7	73	7.3	1.7	19	8.0	1.5
NTU	25	164.1	69.3	72	775.2	286.7	71	250.0	96.9	73	33.6	20.7	19	96.6	61.1

CAMPANHA F – Rio Solimões e lagos adjacentes

Outro conjunto de dados inserido na base de dados SIMA foi o conjunto descrito em Nóbrega (2005) em que foram amostrados 68 pontos amostrais no rio Solimões e lagos adjacente ao rio (Figura A.2 e Tabela A.2). Nóbrega (2005) identificou águas do tipo preta, com predomínio de MOD, e águas brancas com predomínio de SIS na calha do rio Solimões.

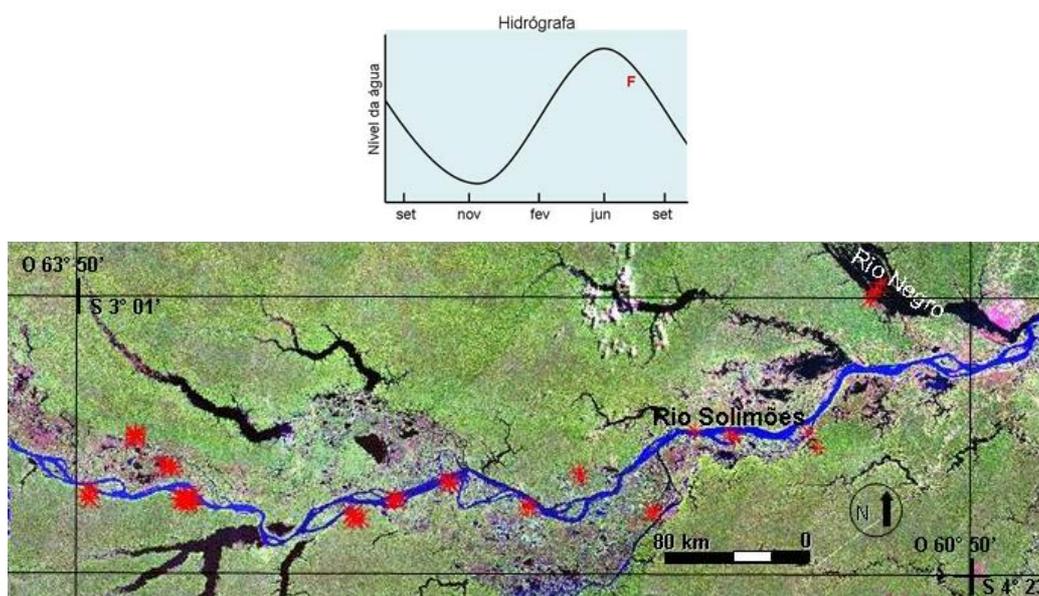


Figura A.2 – Localização dos pontos amostrais no rio Solimões e lagos adjacentes e indicação do período hidrológico da campanha F.

Tabela A.2 – Número amostral, média e desvio padrão (DP) das variáveis limnológicas amostradas na campanha F.

Campanha F - jul/2000					
variáveis	N	média	mínimo	máximo	DP
STS (mg/L)	61	14.1	1.9	27	5.2
CHL-a (ug/L)	61	4.8	0.5	40	5.8
DIC (ppm)	61	0.5	0.2	2	0.4
COD (ppm)	61	5.7	3.4	11	1.6
prof (m)	58	9.9	6.0	23	2.8
Secchi (m)	61	1.2	0.3	2	0.6
TempAgua	61	28.2	26.6	32	1.1
pH	61	6.4	5.0	7	0.5
CE (mS/cm)	61	73.1	18.0	105	24.3

CAMPANHAS G e H – Amazonas e principais Afluentes

Costa et al. (2008) realizaram duas campanhas para se determinar POI dos principais rios que contribuem para as Áreas Alagáveis da Amazônia – rio Solimões, Tapajós, Negro, Uatumã, Trombetas e Madeira (Tabela A.3). A primeira realizada em junho de 2005 (época de cheia), onde foram amostrados 13 pontos, e a segunda em época de seca onde se amostrou 27 pontos de coleta (Figura A.3). Nota-se que foram avaliadas poucas variáveis limnológicas e que, portanto, são campanhas menos informativas do que as anteriores. Apesar disso, as variáveis Chl-a e STS relacionadas aos COA foram amostradas em ambas as campanhas. O espectrorradiômetro utilizado foi o FieldSpec HandHeld.

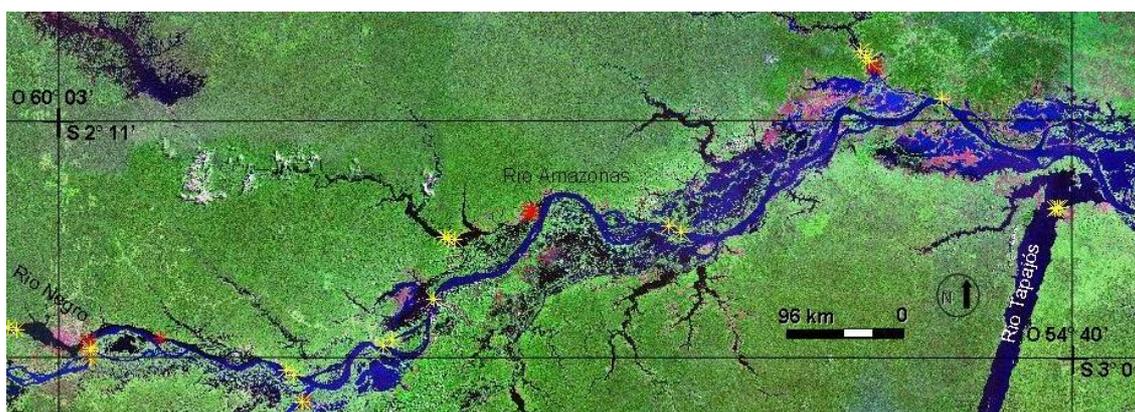
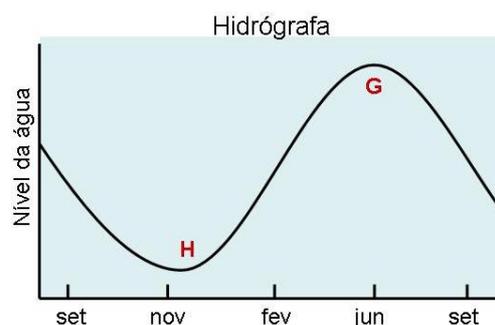


Figura A.3 – Localização dos pontos amostrais e indicação do período hidrológico das campanhas G (pontos vermelhos) e H (pontos amarelos).

Tabela A.3 – Número amostral, média e desvio padrão (DP) das variáveis limnológicas amostradas nas campanhas G e H.

variáveis	Campanha G - jun/2005					Campanha H - dez/2006				
	N	média	mínimo	máximo	DP	N	média	mínimo	máximo	DP
SOS (mg/L)	0					0				
SIS (mg/L)	0					0				
STS (mg/L)	12	28.3	1.4	109.9	31.9	27	93.3	2.9	231.6	81.3
Chl-a (ug/L)	12	2.5	1.0	5.0	1.3	27	3.5	0.3	36.4	7.9
feo (ug/L)	12	1.4	0.8	2.7	0.5	0				
a440	12	5.2	1.6	10.6	2.4	0				
Secchi (m)	0					27	1.4	0.3	4.0	1.4

CAMPANHA I – região de Santarém

O último conjunto de dados compilados para o presente estudo é proveniente da dissertação de Rudorff (2006) em que foi realizada uma campanha concomitante a passagem do satélite Hyperion/EO-1 em junho de 2005 na região de Santarém/PA. Foram 44 estações de coleta distribuídas em corpos d'água com diferentes características limnológicas (Figura A.4). Trata-se de um conjunto de dados bastante informativo sobre as características das águas, pois apresenta 17 variáveis limnológicas (Tabela A.4). A radiometria foi realizada utilizando equipamento Spectron SE-590.

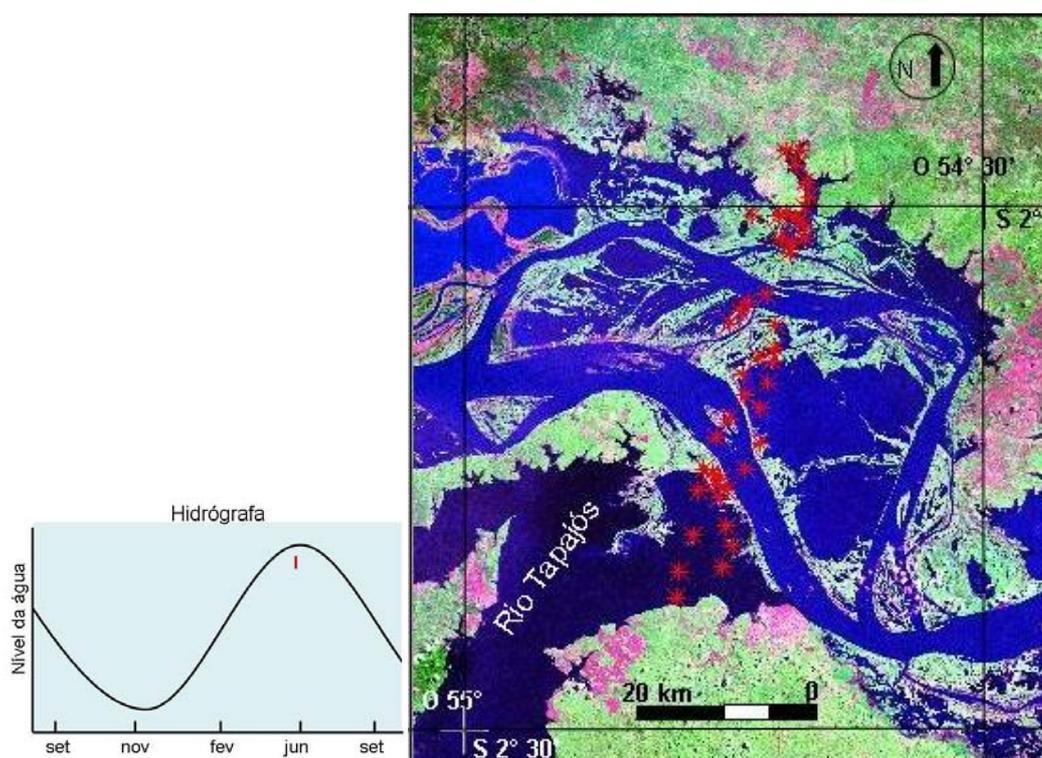


Figura A.4 – Localização dos pontos amostrais e indicação do período hidrológico da campanha I.

Tabela A.4 – Número amostral, média e desvio padrão (DP) das variáveis limnológicas amostradas na campanha I.

Campanha I - jun/2005					
variáveis	N	média	mínimo	máximo	DP
SOS (mg/L)	44	4.8	1.3	10.5	2.1
SIS (mg/L)	44	10.1	0.0	69.4	15.5
STS (mg/L)	44	15.0	1.7	79.9	17.0
Chl-a (ug/L)	44	8.1	0.9	48.8	9.3
feo (ug/L)	44	2.7	0.5	5.4	1.2
a440	44	0.1	0.0	0.2	0.0
DIC (ppm)	44	3.7	1.5	6.2	1.1
COD (ppm)	44	4.3	1.4	5.8	1.0
DTC (ppm)	44	8.0	2.9	12.0	2.0
prof (m)	44	6.2	1.3	23.5	5.5
Secchi (m)	44	1.0	0.3	3.0	0.8
TempAgua	44	34.9	29.4	230.0	30.1
pH	44	6.5	5.6	7.2	0.3
CE (mS/cm)	44	47.8	17.4	77.6	13.8
OD (mg/L)	44	4.5	0.6	7.0	1.7
NTU	44	19.7	2.2	70.9	16.7
TDS (mg/l)	44	22.4	8.0	36.0	6.4

APÊNDICE B – Características Técnicas dos Sensores Orbitais Hyperion e MERIS

Características dos 2 sensores orbitais dos quais se classificou 1 imagem digital de cada um utilizando o SAM tendo a biblioteca como referência.

Hyperion/EO-1

O sensor Hyperion, lançado em 2000 a bordo do satélite EO-1, é o primeiro sensor hiperespectral orbital. Apresenta 50 bandas, de 10 nm de largura, entre os comprimentos de onda 400 a 900 nm e é capaz de imagear uma faixa de 7 por 100 km, com resolução espacial de 30m. A alta resolução espectral permite a caracterização de feições espectrais com maior precisão em comparação a sensores multiespectrais. Apresenta RSR entre 400 e 900 nm de 150:1 em média (PEARLMAN et al., 1999)

MERIS/Envisat

O sensor MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) a bordo do satélite Envisat adquire imagens com resolução espacial de 300 m numa faixa de 1150 km de largura. Apresenta 15 bandas entre 390 e 1040 nm (Tabela B.1) com RSR de 1700:1 e realiza cobertura total do globo em 3 dias (ESA, 2009).

Tabela B.1: Distribuição das bandas do sensor MERIS no espectro eletromagnético.

	Centro da banda (nm)	Largura da banda (nm)
1	412.5	10
2	442.5	10
3	490	10
4	510	10
5	560	10
6	620	10
7	665	10
8	681.25	7.5
9	708.75	10
10	753.75	7.5
11	760.625	3.75
12	778.75	15
13	865	20
14	885	10
15	900	10

APÊNDICE C – Chave de Classificação Limnológica de Amostras de Água das AAA.

É proposta uma chave de classificação de amostras de água provenientes das AAA. Tendo-se a concentração dos três principais COA - Chl-a, SIS e COD - é possível verificar a qual classe da biblioteca cada amostra pertence antes de realizar a classificação do espectro.

- | | | |
|----|--|------------------|
| 1. | Concentração de SIS até 5 mg/L ----- | 2 |
| | Concentração de SIS maior do que 5 mg/L ----- | 4 |
| 2. | Concentração de COD até 3 ppm e Chl-a até 15 µg/L----- | CLASSE 1 |
| | Concentração de COD maior que 3 ppm ----- | 3 |
| 3. | Concentração de Chl-a até 15 µg/L ----- | CLASSE 2 |
| | Concentração de Chl-a entre 15 e 45 µg/L ----- | CLASSE 8 |
| 4. | Concentração de SIS entre 5 e 15 mg/L ----- | 5 |
| | Concentração de SIS maior que 15 mg/L----- | 6 |
| 5. | Concentração de Chl-a até 15 µg/L ----- | CLASSE 3 |
| | Concentração de Chl-a entre 20 e 70 µg/L ----- | CLASSE 9 |
| 6. | Concentração de SIS entre 15 e 50 mg/L e Chl-a até 15 µg/L ----- | CLASSE 4 |
| | Concentração de SIS maior que 50 mg/L----- | 7 |
| 7. | Concentração de SIS entre 50 e 90 mg/L e Chl-a até 15 µg/L ----- | CLASSE 5 |
| | Concentração de SIS entre 50 e 90 mg/L e
Chl-a entre 40 e 110 µg/L----- | CLASSE 10 |
| | Concentração de SIS maior que 90 mg/L----- | 8 |
| 8. | Concentração de SIS entre 90 e 200 mg/L ----- | CLASSE 6 |
| | Concentração de SIS maior do que 200 mg/L ----- | CLASSE 7 |

ÍNDICE POR ASSUNTO

ABSTRACT, ix
APÊNDICE, 97, 103, 105
CONCLUSÃO, 89
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA, 5
INTRODUÇÃO, 1
LISTA DE FIGURAS, xiii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS, xix
LISTA DE SÍMBOLOS, xxi
LISTA DE TABELAS, xvii
MATERIAIS E MÉTODOS, 24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, 91
RESULTADOS E DISCUSSÃO, 42

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.