



Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Geociências - IG

ESTUDO DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO
DE SEDIMENTOS A PARTIR DAS PROPRIEDADES
ÓPTICAS DAS ÁGUAS NO RESERVATÓRIO DE TRÊS
MARIAS- MG.

TESE DE DOUTORADO
Nº14

Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig
Co-orientador: Prof. Dr. Jean Michel Martinez

Brasília – DF
2013

PAULO HENRIQUE BRETANHA JUNKER MENEZES

ESTUDO DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO
DE SEDIMENTOS A PARTIR DAS PROPRIEDADES
ÓPTICAS DAS ÁGUAS NO RESERVATÓRIO DE TRÊS
MARIAS- MG.

Tese apresentada junto ao curso de Pós-graduação em Geociências Aplicadas (Área de concentração Geoprocessamento e Análise Ambiental), do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília para obtenção do título de doutor em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig
Co-orientador: Prof. Dr. Jean Michel Martinez

Brasília – DF
2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDO DA DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO FLUXO DE
SEDIMENTOS A PARTIR DAS PROPRIEDADES ÓPTICAS DAS
ÁGUAS NO RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS- MG.

Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes

TESE SUBMETIDA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA, COMO PARTE DOS PRÉ-REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

(Instituto de Geociências - Universidade de Brasília)
(ORIENTADOR)

Prof. Dr. Nazziano Pantoja Filizola Júnior

(Departamento de Geografia/ Universidade Federal do Amazonas)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof. Dr. Francisco de Assis Dourado da Silva

(Departamento de Geologia Aplicada- Universidade do Estado do Rio de Janeiro)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof^a. Dr^a. Tati de Almeida

(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(EXAMINADORA INTERNA)

Prof. Dr. Marco Ianniruberto

(Instituto de Geociências – Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)

Menezes, Paulo Henrique Bretanha Junker.
M543e Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos
a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório
de Três Marias - MG / Paulo Henrique Bretanha Junker
Menezes. -- 2013.
xvii, 112 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) - Universidade de Brasília, Instituto
de Geociências, 2013.
Inclui bibliografia.
Orientação: Henrique Llacer Roig ; Co-orientação: Jean
Michel Martinez.

1. Hidrologia. 2. Sensoriamento remoto. 3. Ciência
do solo. I. Roig, Henrique Llacer. II. Martinez, Jean-Michel.
III. Título.

CDU 556.18(81)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MENEZES, P.H.B.J (2013). Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de Três Marias - MG. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes.

TÍTULO: Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório de Três Marias - MG.

GRAU: Doutor

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por todas as oportunidades que Ele tem concedido a minha vida. A realização desse trabalho não poderia ter sido concluída sem a participação de inúmeras pessoas que direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão do mesmo.

Agradeço aos meus mestres, amigos e orientadores **Prof. Dr. Henrique Llacer Roig e Jean Michel Martinez** pela grande amizade e confiança desenvolvida nesse período e por toda a orientação prestada. A conclusão de todas as etapas de campo e laboratório não poderiam ter sido tão bem sucedidas sem a tutela dos mesmos. A eles os meus sinceros agradecimentos. Agradeço também aos mestres, professores e grandes amigos **Paulo Roberto Meneses, Tati de Almeida, Marco Ianniruberto, Luciano Soares da Cunha**, pelos ensinamentos e oportunidades dentro do Instituto de Geociências. Aos professores George Sand Leão A. de França, José Elói Guimarães Campos, Elton Luis Dantas, Giuliano Sant'Anna Marotta e Edson Eyji Sano .

A toda equipe do laboratório de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências, em especial ao **Serjão** (grande amigo). A equipe da secretaria do IG. A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos concedida. Em especial também agradeço à **Antonio Mendes (Geólogo, Biólogo e por ai vai, quanta sabedoria)** pela parceria nos trabalhos de campo e pela amizade desenvolvida.

Aos meus amigos de pós-graduação pela convivência e aprendizado juntos nessa jornada, em especial: **Cesar Pavão (Jaaames)**, Joyce, **Gervasio, Adriana Panhol** (e **Marcelo** seu marido), **Giana**, Kassia, Larissa, Tatiana, Júlia, Felipe Alencastro, Leandro Salles. Ao grande amigo e parceiro em muitas jornadas de trabalho, **Romulo Bonelli**.

Agradeço em especial ao grande amigo **Raul Espinoza Villar** pela ajuda na reta final do trabalho, a conclusão desse trabalho só foi possível com a sua ajuda. Aos grandes amigos de longa data de Poços de Caldas, em especial, Wado, Santiago, Rafael Pavanelli, Eltinho, Cocão, Téó, Guga, Felipe (stress), Dé, Dieguinho, Zé Manoel, Tonhão, Maura, KK, Renato (Ryan). Amo vcs!

Aos amigos de Manaus, em especial Andrézão, Elisa, Pascal, Bosco, Baixinho, André. Foi muito bom conhecer vocês durante meu trabalho de doutorado e ter a oportunidade de realizar um sonho de trabalho na região Amazônica.

Agradeço também aos amigos de Três Marias do ICMBio (estação Ecológica de Pirapitinga) pelo auxílio nos trabalhos de campo e pelos momentos de trabalho e convivência na ilha. Em especial ao João e Albino.

Obrigado à Agência Nacional de Águas, CAPES, CNPq, FINEP, IRD e ICMBio pelo auxílio e fomento da pesquisa.

Finalmente agradeço à Graziela, minha namorada, pelo incentivo e compreensão na fase final do trabalho, minha família (“Menezes” e “Junkers”) pela compreensão nos momentos ausentes e pelo suporte, sempre trazendo segurança. Em especial a minha vó (em memória), Dona Loyde e meu tio Paulo R. Meneses, pelo suporte no primeiro ano em que me mudei para Brasília, aos meus pais Ricardo e Mariana pela ajuda sem a qual nunca concretizaria os sonhos até então realizados em minha vida. A minha irmã Mariane, a minha sobrinha e afilhada Marina, pela alegria e carinho, e a minha Tia Clara. Amo vcs!

*“aos meus pais, Ricardo e Mariana, a
minha irmã Mariane e a minha linda
sobrinha e afilhada Marina, amo vocês!”*

*...Não adianta olhar pro céu
Com muita fé e pouca luta...
...Não adianta olhar pro chão
Virar a cara pra não ver...
...Até quando você vai ficar usando rédea?!
Rindo da própria tragédia
Até quando você vai ficar usando rédea?!
Pobre, rico ou classe média
Até quando você vai levar cascudo mudo?
Muda, muda essa postura
Até quando você vai ficando mudo?
muda que o medo é um modo de fazer censura...
...Muda que quando a gente muda o mundo muda com a gente
A gente muda o mundo na mudança da mente
E quando a mente muda a gente anda pra frente
E quando a gente manda ninguém manda na gente!
Na mudança de atitude não há mal que não se mude nem doença sem cura
Na mudança de postura a gente fica mais seguro
Na mudança do presente a gente molda o futuro!...
(Gabriel, O Pensador)*

RESUMO

A sociedade moderna ampliou consideravelmente a diversidade de uso da água. Hoje em dia, a água é bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas. Em um país como o Brasil que possui grande parte de sua matriz energética originada do seu excelente potencial hídrico é fundamental o aprofundamento em estudos e tecnologias relacionados ao entendimento dos ecossistemas aquáticos continentais. É na lacuna de limitações do monitoramento espacial e temporal das técnicas convencionais de amostragem que o sensoriamento remoto se insere como uma das tecnologias capaz de ampliar a representatividade das amostras. O objetivo desta tese é estimar a concentração dos sedimentos em suspensão em reservatórios por meio de imagens do satélite MODIS e das propriedades ópticas da água adquiridas com espectrorradiometria de campo. Além de fornecer estimativas sobre a dinâmica espaço-temporal dos fluxos de sedimento que aportam o reservatório de Três Marias. Para isso, é necessário compreender como os sedimentos se comportam no reservatório e como afetam a resposta espectral das águas. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa envolveu levantamento de campo do material em suspensão e das propriedades ópticas das águas do reservatório. A caracterização das propriedades ópticas das águas permitem entender os processos de interação entre a radiação eletromagnética com o corpo d'água. As propriedades ópticas medidas a partir da espectrorradiometria de campo foram: Reflectância de sensoriamento remoto, reflectância volumétrica e coeficiente de atenuação vertical da luz. Essas propriedades permitiram estimar as propriedades de coeficiente de absorção, de espalhamento e de retroespalhamento da radiação pelo corpo d'água. Análises de correlação entre as propriedades ópticas da água e a concentração de material em suspensão se mostraram bem robustas com valores de R^2 acima de 0,9 para todas as propriedades. Entre as propriedades ópticas medidas a reflectância de sensoriamento remoto foi utilizada para simular as respostas espectrais do sensor MODIS. Os dados do sensor MODIS simulados são correlacionados com o material em suspensão. Essa correlação se mostrou bastante robusta com R^2 de 0,93 para a banda do vermelho e 0,92 para a banda do infravermelho mostraram uma boa possibilidade de se estimar valores de concentração a partir da reflectância do sensor MODIS. As análises de correlação com o material em suspensão foram utilizadas para definir as curvas de calibração para estimar valores de concentração de sedimentos a partir do sensor MODIS. Os valores de concentração estimados foram validados a partir da comparação com as concentrações

mensuradas em campo. Os resultados mostram que os dados de satélite conseguem acompanhar de maneira robusta as variações de concentração ao longo do reservatório, permitindo analisar a dinâmica de fluxos de sedimentos espacialmente e temporalmente. Essa tese demonstra a possibilidade de utilizar imagens de sensoriamento remoto para monitorar de maneira criteriosa a dispersão da pluma de sedimentos e suas variações sazonais dentro do reservatório, além da possibilidade de analisar os parâmetros dos constituintes da água por meio das suas propriedades ópticas.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Propriedades Ópticas, Espectrorradiometria, Hidrologia.

ABSTRACT

Modern society has significantly expanded the diversity of water use. Today, water is final or intermediate consumer product in almost of all human activities. In a country like Brazil, which has most of its energy originated from its excellent water potential is very important improvements in technologies and studies related to the understanding of aquatic ecosystems. Is in the gap of spatial and temporal monitoring limitations of conventional sampling techniques that remote sensing is included as one of the technologies capable of enhancing the representativeness of samples. The objective of this thesis is to test the effectiveness of t suspended sediment concentration estimates in reservoirs using MODIS satellite images and the optical properties of water measured with field spectroradiometry. In addition to providing estimates of the spatial and temporal sediment fluxes dynamics that contribute to the Três Marias Reservoir. For this it is necessary to understand the behavior of sediments in the reservoir and how they affect the color of the waters. The methodology involves field research of the suspended material and the optical properties of the reservoir water. The characterization of the optical properties of water allow us to understand the processes of interaction of electromagnetic radiation with water. The optical properties measured from the field spectroradiometry were: remote sensing reflectance, irradiance reflectance and vertical attenuation coefficient of light. These properties allowed us to estimate the properties of the absorption coefficient, scattering and backscattering of radiation by water. A correlation between the optical properties of water and the concentration of suspended material was very robust with R^2 values above 0.9 for all properties. Among the optical properties of water measures the reflectance remote sensing was used to simulate the spectral response of MODIS. Correlation analysis with suspended material are used to define the calibration curve to estimate values of sediment concentration from MODIS datas. The estimated concentration values are validated by comparing with the concentrations measured in the field. The results show that the satellite data can robustly monitor the variability of concentration along the reservoir, allowing to analyze the dynamics of sediment flows spatially and temporally. This thesis demonstrates the possibility of using remote sensing images to monitor very carefully the dispersion of sediment plume and seasonal variations within the reservoir, plus the ability to analyze parameters of the constituents of the water using their optical properties.

Sumário

Capítulo I - Apresentação	1
1.1 - Introdução	1
1.2 - Hipótese.....	4
1.3 - Justificativa	4
1.4 - Objetivos	5
1.4.1 - OBJETIVO GERAL	5
1.4.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.5 - Área de Estudo	5
1.5.1 - HIDROGRAFIA.....	6
1.5.3 - PEDOLOGIA.....	8
1.5.4 - CLIMA.....	10
Capítulo II - Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Princípios Físicos	12
2.1 - Natureza da Radiação Eletromagnética.....	13
2.1.1 - MODELO ONDULATÓRIO	13
2.1.2 - MODELO CORPUSCULAR	14
2.2 - Conceitos de Irradiância, Radiância e Reflectância	15
2.3 - Sistemas Sensores	17
2.3.1 - RESOLUÇÃO ESPACIAL	18
2.3.2 - RESOLUÇÃO ESPECTRAL.....	19
2.3.3 - RESOLUÇÃO RADIOMÉTRICA.....	19
2.3.4 - RESOLUÇÃO TEMPORAL	20
2.4 - Radiometria	20
2.4.1 - MEDIDAS DE REFLECTÂNCIA	21
2.4.2 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS.....	22
Capítulo III - Uso de Sensoriamento Remoto no estudo de ambientes aquáticos ...	23
3.1 - Interação da REM com a água registrada por sistemas sensores	24
3.2 - Comportamento Espectral da água.....	26
3.2.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA PURA	27
3.2.2 - MATERIAIS QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA PURA	27
3.2.2.1 Sólidos em Suspensão	29
3.2.2.2 Fitoplâncton	31
3.2.2.3 Matéria Orgânica.....	32
3.2.3 - PROPRIEDADES ÓPTICAS DAS ÁGUAS.	33
3.2.3.1 - Propriedades Ópticas Inerentes	33
3.2.3.2 Propriedades Ópticas Inerentes da água pura	36
3.2.3.3 - Propriedades Ópticas Inerentes das águas naturais.	37

3.2.3.2 - Propriedades Ópticas Aparentes.....	39
3.2.3.3 - Relação entre POIs e Reflectância Volumétrica (POA)	41
3.5 - Sistemas Sensores e estudos de ecossistemas aquáticos.	42
3.5.1 - SENSOR MODIS: CARACTERÍSTICAS E SUAS APLICAÇÕES EM ESTUDOS SOBRE SISTEMAS AQUÁTICOS.....	43
3.5.2 - RADIOMETRIA <i>IN SITU</i> E SENSORIAMENTO REMOTO PARA AMBIENTES AQUÁTICOS	47
Capítulo IV - Materiais e Métodos.....	49
4.1 - Levantamentos de Campo	51
4.1.1 - MATERIAL EM SUSPENSÃO.....	51
4.1.2 - RADIOMETRIA DE CAMPO	55
4.1.2.1 - Medição de Reflectância de Sensoriamento Remoto (Rrs).....	56
4.1.2.2 - Medição de Coeficiente de Atenuação Vertical (Kd e Ku).....	58
4.1.2.3 - Medição da reflectância volumétrica	59
4.2 - Processamento das Imagens MODIS	60
4.3 - Estimativas de concentração de sedimentos a partir dos dados MODIS	66
Capítulo V - Resultados e Discussão.....	68
5.1 - Caracterização do material em Suspensão.	68
5.2 - Propriedades ópticas das águas do reservatório	71
5.2.1 - REFLECTÂNCIA DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	71
5.2.2 - COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO VERTICAL DA LUZ (Kd E Ku)	75
5.2.3 - REFLECTÂNCIA VOLUMÉTRICA	78
5.2.4 - COEFICIENTE DE ABSORÇÃO (A).....	79
5.2.5 - COEFICIENTE DE ESPALHAMENTO (B) E RETROESPALHAMENTO (B _b)	80
5.3 - Processamento Dados MODIS	82
5.4 - Estimativa de concentração de sedimentos a partir dos dados MODIS.....	86
5.4.1 - DEFINIÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO.....	86
5.3.2 - ESTIMATIVAS DE CONCENTRAÇÃO DE MATERIAL EM SUSPENSÃO	88
5.3.3 - VALIDAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES ESTIMADAS A PARTIR DOS DADOS MODIS.....	89
5.4 - Análise da dinâmica de fluxos de sedimento no reservatório	91
5.4.1 - DINÂMICA TEMPORAL.....	91
5.4.2 - DINÂMICA ESPACIAL.....	93
Conclusões	97
Recomendações	99
Referências Bibliográficas	102

Lista de Figuras

Figura 1 - Localização do Reservatório da UHE de Três Marias - MG.....	6
Figura 2 -Principais rios e sub-bacias na região hidrográfica do Alto São Francisco - Bacia de contribuição do Reservatório de Três Marias - MG	7
Figura 3 - Mapa de Solos da bacia de contribuição do reservatório de Três Marias - MG.....	10
Figura 4 - Componentes radiométricos da trajetória da radiação eletromagnética da fonte ao sensor.	16
Figura 5 - Modelo esquemático da geometria em laboratório de medidas de reflectância por um espectrorradiômetro. Fonte: Meneses, 2001.	21
Figura 6 - Componente do fluxo de energia que deixa a água	24
Figura 7: Processos e Componentes da radiação eletromagnética proveniente da água registrada em um sensor. Fonte: JENSEN, 2009	25
Figura 8 - Fatores que influenciam a luz emergente que deixa o corpo de água: (a) retro- espalhamento pelo material inorgânico em suspensão; (b) retroespalhamento pelas moléculas de água; (c) absorção pela matéria orgânica dissolvida; (d) reflexão do fundo; (e) retro-espalhamento pelo fitoplâncton.....	28
Figura 9 - Comportamento espectral do fitoplâncton, sedimentos em suspensão, matéria orgânica dissolvida e água. Fonte: Rudorff et al. (2006).....	29
Figura 10 Comparação da reflectância espectral medidas <i>in situ</i> de águas com claras com águas ricas em sedimentos argilosos e siltosos. Fonte:JENSEN, 2009.	30
Figura 11 - Porcentagem de reflectância de água clara e de água com algas com base em medidas <i>in situ</i> feitas com espectrorradiômetro. Fonte: JENSEN, 2009.	32
Figura 12 - Reflectância espectral da água para varias concentrações de carbono orgânico dissolvido na Fonte: adaptado de BUKATA et al <i>apud</i> ENES, 2008	33
Figura 13 - Interação de um raio de luz com o meio aquático.	34
Figura 14 - Curvas dos coeficientes de absorção (a) espalhamento (b) e atenuação (c) da água pura.....	37
Figura 15 - Coeficiente de absorção específico para a: água pura (a_w), e os componentes: fitoplâncton (a_{ph}), matéria orgânica dissolvida (a_{CDOM}) e o material particulado não orgânico (a_{TR}). (Adaptado de Giardino 2007)	38
Figura 16 - Variação espectral dos coeficientes de retroespalhamento específicos da água pura (b_{bw}), do fitoplâncton ($b_{b\ ph}$) e do material particulado não orgânico ($b_{b\ TR}$). (Adaptado de Giardino 2007).	39

Figura 17 - Fluxograma de metodologia de trabalho	50
Figura 18 - Estações fluviossedimentométricas (CEMIG) nos tributários do Reservatório.....	52
Figura 19 - Pontos de amostragem no braço do Indaiá - campanha março/2012.....	52
Figura 20 - Pontos de amostragem no braço do Indaiá. campanha Janeiro/2013.	53
Figura 21 - Pontos de amostragem no braço do São Francisco - campanha Março/2013.	54
Figura 22 - Pontos de amostragem no braço do Paraopeba - campanha Março/2013....	54
Figura 23 - Espectrorradiômetros TriOS: a) RAMSES-ARC: medição da energia radiante refletida e b) RAMSES-ACC-VIS: medição da energia incidente.....	55
Figura 24 - Medição de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs)	56
Figura 25 - Esquema da medição da reflectância Rrs e da interação da luz com a superfície da coluna d'água. Irradiância (Ed), Radiância do céu (Ld) e radiância da água (Ld). $\theta=30^\circ$. Fonte: VILLAR, 2013.....	57
Figura 26 - Medição simultânea do Kd e sonda multiparâmetro de qualidade de água (turbidez)	58
Figura 27 - Medições de Reflectância nas estações - Indaiá e São Francisco.....	59
Figura 28 - Fluxograma de processamento MOD3R	62
Figura 29 - Máscaras de Análise das imagens MODIS.....	64
Figura 30 - concentrações na superfície da estação até o reservatório (a); concentrações em ambas as profundidades somente no reservatório (b) - campanha março 2012.	68
Figura 31 - concentrações na superfície e 2 metros da estação até o reservatório (a); e as concentrações em todas profundidades somente no reservatório (b) - campanha janeiro 2013.	69
Figura 32 - Variação de concentração na superfície entre as estações do rio Pará e São Francisco e o reservatório.....	70
Figura 33 - Variação das concentrações em todas profundidades no braço do São Francisco.....	70
Figura 34 - concentrações na superfície e 2 metros da estação até o reservatório (a); e as concentrações em todas profundidades somente no reservatório (b) - campanha março 2013 - braço do Paraopeba	71
Figura 35 - Curvas de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) no Braço do Indaiá - Campanha de 2012.	72

Figura 36 - Curvas de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) no Braço do São Francisco - Campanha de 2013.	73
Figura 37 - Curvas de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) no Braço do Paraopeba - Campanha de 2013.	74
Figura 38 - Correlação Rrs com concentração para todos os dados levantados.....	75
Figura 39 - Coeficiente vertical de atenuação da luz descendente (Kd) - Indaiá 2012 (a) Indaiá 2013(b).	75
Figura 40 - Coeficiente vertical de atenuação da luz descendente (Kd) - São Francisco (a) Paraopeba(b).	76
Figura 41 - Correlação entre concentração e Kd para comprimento de onda de 670nm	76
Figura 42 - Valores de Ku para os braços do São Francisco (a) e do Paraopeba (b).	77
Figura 43 - Correlação entre concentração e Ku para comprimento de onda de 670nm	77
Figura 44 Curvas de reflectância volumétrica para os braços do São Francisco (a) e Paraopeba (b).	78
Figura 45 - Correlação entre concentração e R^{-0} para comprimento de onda de 860 nm.	79
Figura 46 Coeficiente de absorção (a) para os braços do São Francisco (I) e do Paraopeba (II)	79
Figura 47 - Correlação entre concentração do material em suspensão e coeficiente de absorção(a).....	80
Figura 48 - Coeficiente de espalhamento (b) para os braços para os braços do São Francisco (I) e do Paraopeba (II).....	80
Figura 49 - Correlação entre concentração do material em suspensão e coeficiente de espalhamento (b).....	81
Figura 50 - Coeficiente de retroespalhamento (b_b) para os braços para os braços do São Francisco (I) e do Paraopeba (II).....	81
Figura 51 - Correlação entre concentração do material em suspensão e coeficiente de retroespalhamento (b_b).....	82
Figura 52 - variação temporal dos valores de reflectância da superfície da água na região do infravermelho do MODIS nas máscaras analisadas no braço do rio Indaiá.....	83
Figura 53 - Comparação entre a variação do fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá com a reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho.	85

Figura 54 - Comparação entre a variação do fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá com a reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho - Detalhe da máscara 2 para os meses janeiro-2000/janeiro-2001 e janeiro-2001/janeiro 2002.....	86
Figura 55 - Reflectância medidas em campo e a posição e largura espectral das bandas MODIS. Fonte: Villar, 2013.....	87
Figura 56 - Correlação entre reflectância da banda 1 do sensor MODIS e concentração de sedimentos medidos em campo.	87
Figura 57 - Correlação entre reflectância da banda 2 do sensor MODIS e concentração de sedimentos medidos em campo.	88
Figura 58 - Comparação entre as concentrações mensuradas em campo e estimadas pelo sensor MODIS para as campanha de março de 2012 no Indaiá (a), janeiro de 2013 no Indaiá (b), março de 2013 no São Francisco e março de 2013 no Paraopeba.	90
Figura 59 - Variação temporal dos valores de concentração estimados por mascara de análise no braço do Indaiá.	91
Figura 60 - Variação temporal dos valores de concentração estimadas por mascara de análise no braço do São Francisco.....	92
Figura 61 - Variação temporal dos valores de concentração estimadas por mascara de análise no braço do Paraopeba.....	93
Figura 62 - Variação espacial da medias mensais dos valores de concentração estimadas por mascara de análise no braço do Indaiá.	94
Figura 63 - Variação espacial da medias mensais dos valores de concentração estimadas por mascara de análise no braço do São Francisco.	95
Figura 64 - Variação espacial da medias mensais dos valores de concentração estimadas por mascara de análise no braço do Paraopeba.	96
Figura 65 - Espectrorradiometro OSCAR - TRIOS RAMSES	100

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Especificações Sensor MODIS	44
Tabela 2 - Informações possíveis de serem derivadas do produto MYD09	47
Tabela 3 - Especificações Trios - RAMSES	56

Capítulo I - Apresentação

1.1 - Introdução

Os recursos hídricos são bens de valor bastante significativos, capazes de promover desenvolvimento e bem estar à sociedade. O desenvolvimento econômico é mais intenso em regiões de relativa abundância destes recursos. No passado, pequenas demandas hídricas podiam ser atendidas pela disponibilidade natural, sendo necessário apenas o investimento para captação. Porém, a sociedade moderna ampliou consideravelmente a diversidade de uso da água. Hoje em dia, a água é bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas (LANNA, 2007).

Ao longo da história, a experiência do ser humano em construir reservatórios para armazenamento de água data de milhares de anos. Inicialmente construídos em menores proporções para auxílio na irrigação ou abastecimento, esses ecossistemas aquáticos tornaram-se grandes empreendimentos com alta tecnologia envolvida, sendo hoje destinados para inúmeros e múltiplos fins simultaneamente, o que faz com que atendam à diversas demandas. (TUNDISI & TUNDISI, 2008;)

Diante disso, surge a necessidade de integração e harmonização destes diversos usos, de forma a ampliar e adequar a disponibilidade hídrica com as diversas demandas impostas por sistemas não integrados (irrigação, geração de energia, abastecimento doméstico, controle de cheias, lazer etc.)

A preservação dos recursos hídricos é tema central no mundo e no país, estudos indicam como a crescente demanda de água para múltiplos usos poderá deixar de ser atendida em virtude da diminuição e contaminação de fontes pela crescente pressão antrópica (HELLER & PÁDUA, 2006).

Em um país como o Brasil, que possui grande parte de sua matriz energética originada de seu excelente potencial hídrico, é fundamental, para fins de preservação, o aprofundamento em estudos e tecnologias relacionados ao entendimento dos ecossistemas aquáticos continentais (CARVALHO, 2000).

A necessidade de garantir, primariamente, o abastecimento para o consumo humano, a irrigação e a produção de energia hidrelétrica, implica não só na preservação como também no armazenamento adequado deste recurso.

Sabe-se que o uso das terras e dos recursos hídricos estão intimamente correlacionados. A degradação de bacias hidrográficas devido à ações antrópicas e a

crescente urbanização, associada à fenômenos naturais de precipitação, resulta em grande quantidade de sedimentos que são transportados até rios e reservatórios em curto espaço de tempo (CARVALHO, 2000)

O monitoramento desse fenômeno se baseia, de uma maneira geral, na instalação de estações que precisam ser monitoradas com intervalo de tempo regular o suficiente para medir as variações em concentrações dos elementos geoquímicos e dos sedimentos que ocorrem ao longo do ciclo hidrológico, em particular, entre períodos de vazão baixa e alta. (VILLAR *et al.*, 2011)

No Brasil, estudos envolvendo transporte de sedimentos e sua relação com a vida útil de reservatórios ainda são incipientes, fato esse evidenciado pela carente rede sedimentométrica instalada em nosso país, a qual conta com pouquíssimas estações em operação, dificultando assim estudos nessa área (LOUREIRO, 2008).

É necessário conhecer os ecossistemas aquáticos continentais e suas complexas relações com o ecossistema terrestre. A precisão e a relevância do monitoramento hidrossedimentológico estão diretamente relacionados ao número de parâmetros monitorados, à quantidade de dados obtidos em levantamentos de campo e à distribuição espacial das estações de monitoramento ao longo da bacia (VILLAR *et al.*, 2011).

O custo de instalação e manutenção de uma rede de monitoramento hidrológico convencional em campo pode inviabilizar, muitas vezes, na prática, um monitoramento hidrológico preciso em uma bacia de grande porte.

Com isso, o manejo dos recursos hídricos no sentido de combater a escassez das fontes artificiais, a nível de território nacional, é uma tarefa consideravelmente difícil devido à imensa área ocupada por esse recurso, às intensas taxas de transformação geográfica de bacias brasileiras e ao desequilíbrio natural entre disponibilidade hídrica e demanda (NOVO & TUNDISI, 1988).

Este quadro demonstra a necessidade de se desenvolver tecnologia com capacidade de produção de informações consubstanciadas adequadas à solução de problemas ligado ao armazenamento e a preservação, sendo relevante o desenvolvimento de estudos nesse segmento.

A esse fato se soma as exigências técnicas impostas, aos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica, pela resolução conjunta ANA/ANEEL n°

3 de 2010, no que diz respeito ao monitoramento e aos parâmetro que devem ser levantados nos reservatórios utilizados para esta finalidade.

Medições de dados *in situ* em cursos d'água de grande porte e situados em regiões remotas costumam ser onerosas e de logística complexa. Como consequência, estas medições dificilmente tem uma frequência de amostragem compatível com a variabilidade espacial e temporal dos fenômenos, comprometendo a obtenção de dados com a extensão e a representatividade desejada para o entendimento dos mesmos (VIEIRA DA SILVA, 1999).

É nessa lacuna de limitações das técnicas convencionais que o sensoriamento remoto se insere como uma das tecnologias que mais se difundiu nas ultimas décadas capaz de ampliar a representatividade espacial e temporal das amostragens convencionais.

Estudos realizados (NOVO *et al.*, 1989; MERTES *et al.*, 1993; NELLIS *et al.*, 2003; MILLER & MCKEE 2004;UDY *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2007; MARTINEZ *et al.*, 2004; MARTINEZ *et al.*, 2009; VILLAR *et al.*, 2012; OLMANSON, 2013), demonstraram a possibilidade de relacionar, por satélite, a cor da água ao seu conteúdo em sedimentos. Em particular, comprovou-se que as propriedades ópticas das águas são fortemente influenciadas pelo conteúdo, tipo (orgânicos ou inorgânicos) e concentração de sedimentos, mostrando robusta correlação com alguns limnológicos.

Recentemente, pesquisas demonstraram a possibilidade de completar a rede de monitoramento hidrossedimentológica e avaliar a concentração de sedimentos em suspensão de superfície em rios da Amazônia usando imagens de satélite MODIS para realizar balanços de vazão sólida (LOBO, 2009; MARTINEZ *et al.*, 2009,VILLAR *et al.*, 2012, MANGIAROTTI *et al.*, 2012). Esses estudos permitiram um monitoramento preciso, em termos de resolução temporal e espacial (até duas imagens adquiridas por dia sobre qualquer ponto da bacia), em áreas poucas monitoradas. Além de abrir novas perspectivas no monitoramento da qualidade das águas superficiais, a partir de dados dos sensores MODIS.

No Brasil, estudos em reservatórios (SAUSEN, 1986; ENNES *et al.*, 2010; WACHHOLZ *et al.*, 2009; FERREIRA & PEREIRA FILHO 2009; MARTINEZ *et al.*, 2011) tem mostrado a potencialidade do uso de imagens de sensores remotos e espectrorradiometria de campo para obter parâmetros das águas de reservatórios continentais.

Apesar da existência de outros estudos utilizando o sensor MODIS no Brasil (MOLLERI *et al.*, 2007; VALÉRIO *et al.*, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2011), estes se restringiram a uma análise da correlação entre as informações espectrais e parâmetros *in situ*, sem incorporar a variável temporal nos estudos.

Para tanto, é preciso investigar e qualificar a relação entre a reflectância medida por satélite e as propriedades ópticas das águas continentais a fim de se promover o aprimoramento de extração de informações sobre parâmetros dos corpos d'água por meio de técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto e de medidas *in situ*.

Este trabalho faz parte do projeto de pesquisa "Avaliação e Gestão do Assoreamento de Reservatórios" financiado pela FINEP, chamada pública do CT-ENERG na linha de pesquisa "Redução de perdas, aumento de eficiência e redução de custos de operação e de manutenção". O projeto geral tem como objetivo estabelecer uma metodologia que permita a análise espaço-temporal dos processos erosivos, transporte e deposição dos sedimentos que atingem os reservatórios, mediante integração de ferramentas geofísicas, geoquímicas e de sensoriamento remoto.

Esse trabalho foi feito de maneira integrada com a pesquisa de mestrado de Toniazzo (2013), o qual gerou os primeiros resultados e auxiliou na definição e ajuste do protocolo de levantamento e integração de dados de campo.

1.2 - Hipótese

- A dinâmica de fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias pode ser analisada a partir das propriedades ópticas da água do reservatório, por meio de espectrorradiometria de campo e do uso sistemático de imagens MODIS.

1.3 - Justificativa

A possibilidade de monitorar as concentrações de sedimentos usando espectrorradiometria de campo e imagens de satélite, para complementar os dados adquiridos pela rede de estações de monitoramento e ampliar a espacialização de amostras em lagos e reservatórios, permite monitoramento espaço temporal da variabilidade dos fluxos de sedimentos que atingem os corpos d'água. Além de fornecer informações sobre o comportamento dos sedimentos ao longo do reservatório.

1.4 - Objetivos

1.4.1 - Objetivo Geral

O objetivo desta tese é estimar a concentração de sedimentos no reservatório de Três Marias (MG) a partir das propriedades ópticas da água e do uso sistemático de imagens do satélite MODIS.

1.4.2 - Objetivos Específicos

- Mensurar a concentração do material em suspensão no reservatório com dados de campo;
- Determinar as propriedades ópticas das águas do reservatório por meio de espectrorradiometria de campo;
- Correlacionar os dados de reflectância com a concentração do material em suspensão.
- Calibrar as imagens MODIS a partir dos dados de reflectância *in situ*.
- Estimar a concentração de sedimentos a partir dos dados MODIS.
- Analisar a dinâmica dos fluxos de sedimentos a partir do uso sistemático de dados orbitais.

1.5 - Área de Estudo

Entre os fatores que colaboram para dificultar o monitoramento dos recursos hídricos, dois podem ser observados na região onde se encontra o reservatório de Três Marias - MG: i) o fato de ser uma área extensa, e, ii) com mudanças nos padrões de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica que drena a região de estudo à montante do reservatório. Assim, a situação do reservatório da UHE de Três Marias (MG) é muito interessante para testar os objetivos propostos por esta pesquisa.

Estudos desenvolvidos neste reservatório apontaram a necessidade de uma melhor e mais abrangente caracterização do fenômeno de produção, transporte e deposição de sedimentos. (CARVALHO, 2001; MACEDO, 2009).

O reservatório de Três Marias se localiza na região oeste do estado de Minas Gerais, na região hidrográfica do Alto do São Francisco, Figura 01. Compreende os municípios de São Gonçalo do Abaeté, Felixlândia, Morada Nova de Minas, Biquinhas, Paineiras, Pompéu, Martinho Campos, além de Três Marias.

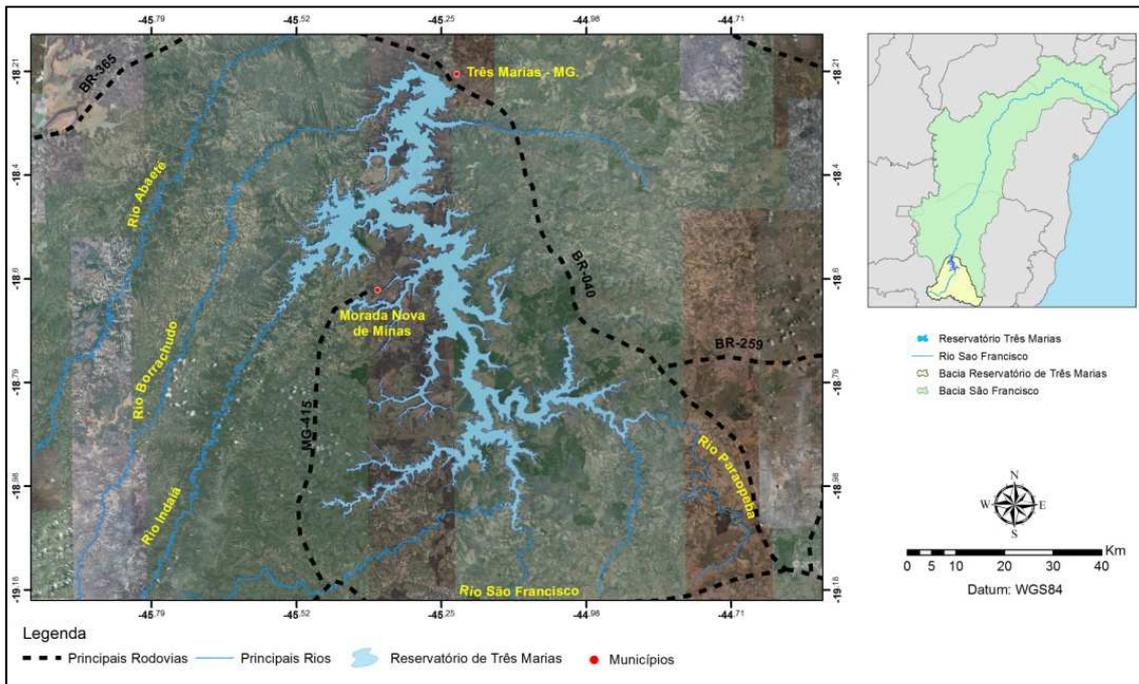


Figura 1 - Localização do Reservatório da UHE de Três Marias - MG.

A UHE Três Marias iniciou sua operação em 1962, e faz parte do Sistema Interligado Nacional. Tem uma capacidade de geração de 396 MW, com um reservatório de aproximadamente 15 bilhões de metros cúbicos de volume útil, e fornece energia a importantes cidades mineiras, dentre elas, a capital Belo Horizonte. A bacia de contribuição da usina apresenta uma área de drenagem de cerca de 50.000 km², tendo como principais tributários os rios São Francisco, Borrachudo, Indaiá, e Paraopeba (MACEDO, 2009).

Sua construção teve como principais objetivos: regularização do curso das águas nas cheias periódica, melhoria da navegabilidade no rio São Francisco, utilização do potencial hidrelétrico e subsídio à irrigação. O reservatório tem uma área máxima de 1.010 km² e mínima de 316 km², correspondendo a volumes de 19.528 e 4.250 hm³, respectivamente. A cota máxima de operação é 572,50 m e a mínima é 549,20 m (ONS, 2012).

1.5.1 - Hidrografia

A região hidrográfica do Alto do São Francisco drena a área de estudo. A região estudada corresponde à sub-bacia 40, de acordo com a divisão proposta pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ONS, 2012). Esta sub-bacia representa a área de drenagem do reservatório de Três Marias e parte da área de drenagem do Alto São Francisco.

Os principais rios que abastecem o São Francisco nessa região hidrográfica são: o rio Pará, Paraopeba, Borrachudo, Indaiá, Abaeté e Velhas. Porém os rios Abaeté e Velhas deságuam no São Francisco à jusante do barramento do reservatório de Três Marias (figura 02).

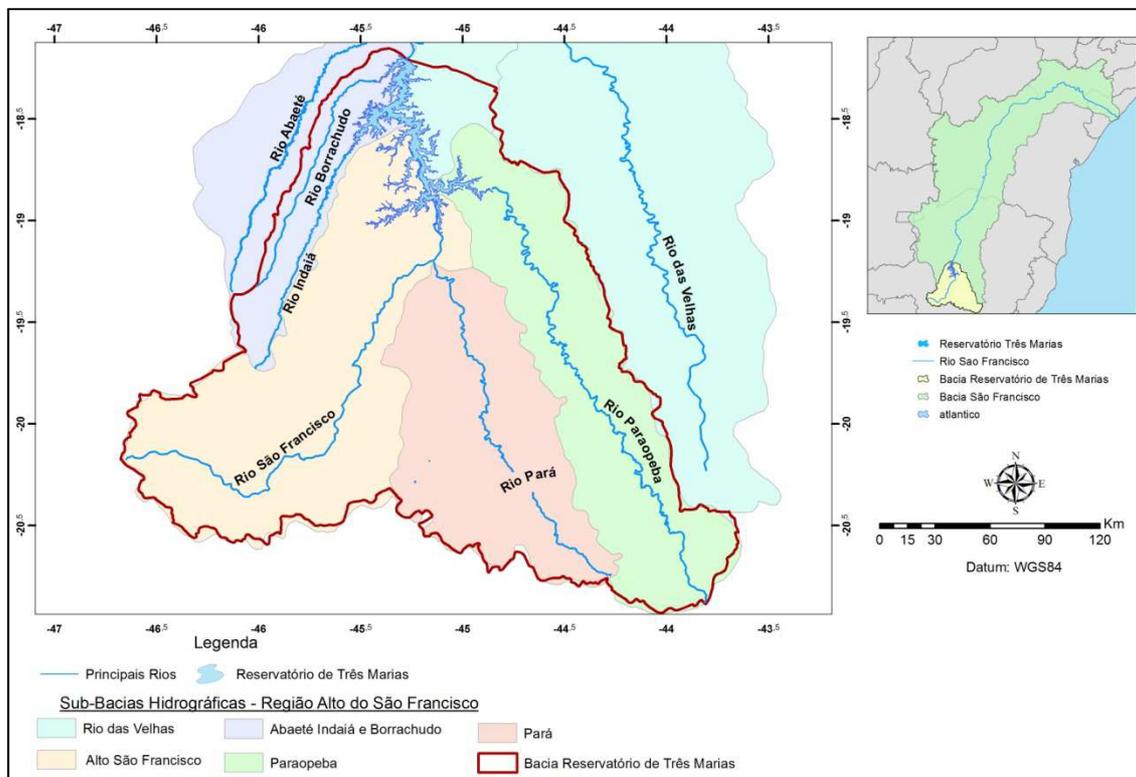


Figura 2 -Principais rios e sub-bacias na região hidrográfica do Alto São Francisco - Bacia de contribuição do Reservatório de Três Marias - MG

Com orientação norte-sul, o Rio São Francisco é um rio de regime tropical. Apresenta um desenvolvimento longitudinal de aproximadamente 300 km, até o reservatório de Três Marias. As nascentes estão localizadas na serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, a uma cota altimétrica da ordem de 1.450m (PINTO, 2005).

O rio Paraopeba apresenta um desenvolvimento longitudinal da ordem de 370 km no sentido predominante SE-NW até alcançar o reservatório de Três Marias. As suas nascentes estão localizadas no município de Cristiano Ottoni, a uma altitude de cerca de 1.140 m, e seus principais tributários são os rios Camapuã, Maranhão, Macaúbas, Manso e Soledade. A área total da bacia hidrográfica do rio Paraopeba é de 13.640 km² (PINTO, 2005).

O rio Pará nasce próximo à localidade denominada Colônia, nas vertentes das serras do Galba e da Cebola, a uma altitude de 1.200 m. Apresenta orientação

predominante SE-NW até desaguar no rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias. Os principais afluentes são os rios Itapecerica, São João, Lambari, Peixes e Picão. A área de drenagem é da ordem de 12.230 km².

O rio Indaiá possui orientação SW-NE, determinada pelas encostas da serras da Saudade e Palmital. A sua extensão é de aproximadamente 200km, desde suas nascentes, situadas próximo à localidade de Cachoeirinha, numa altitude de 1.150m, até a represa de Três Marias. A área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Indaiá é de 3.340 km² (MACEDO, 2009)

A bacia do rio Borrachudo drena uma área de 1362km² com o curso d'água principal apresentando uma extensão total da ordem de 160km, no sentido SW-NE, até alcançar o reservatório de Três Marias. As nascentes estão localizadas no município de São Gotardo, numa altitude de 1.150 m (PINTO, 2005).

1.5.3 - Pedologia

A partir da análise do mapa pedológico e do relatório apresentados por Brasil (2002) foram identificadas na bacia de contribuição do reservatório de Três Marias (figura 3) as classes de solos descritas a seguir por (EMBRAPA, 2006):

- ✓ **ARGISSOLOS:** solos constituídos por material mineral que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou, alta conjugada com saturação por bases. São de profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, de cores avermelhadas ou amareladas, e mais raramente, brunadas ou acinzentadas. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B, sempre havendo aumento de argila do horizonte A para o B.
- ✓ **CAMBISSOLOS :** solos com horizonte B incipiente, subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, desde que em qualquer dos casos não satisfaçam os requisitos estabelecidos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos ou Gleissolos. Devido à heterogeneidade do material de origem, das formas de relevo e das condições climáticas, as características destes solos variam muito de um local para outro. Assim, a classe comporta desde solos fortemente até imperfeitamente drenados, de rasos a profundos, de cor bruna ou bruno-amarelada até vermelho escuro, e de alta a baixa saturação por bases e atividade química da fração argila.

- ✓ **GLEISSOLOS:** Compreende solos hidromórficos que apresentam horizonte glei dentro dos primeiros 150 cm da superfície do solo, imediatamente abaixo de horizontes A ou E. Os solos desta classe encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados. A água permanece estagnada internamente com saturação por fluxo lateral no solo. Em qualquer circunstância, a água do solo pode se elevar por ascensão capilar, atingindo a superfície. Comumente, desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia, podendo formar-se também em áreas de relevo plano de terraços fluviais, lacustres ou marinhos, como também em materiais residuais em depressões. São eventualmente formados em áreas inclinadas sob influência do afloramento de água subterrânea.
- ✓ **LATOSSOLOS:** Compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial, exceto hístico. São solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, como resultado de enérgicas transformações no material constitutivo. Os solos são virtualmente destituídos de minerais primários ou secundários menos resistentes ao intemperismo. Variam de fortemente a bem drenados.
- ✓ **NEOSSOLOS:** Compreende solos constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição química, ou dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos.

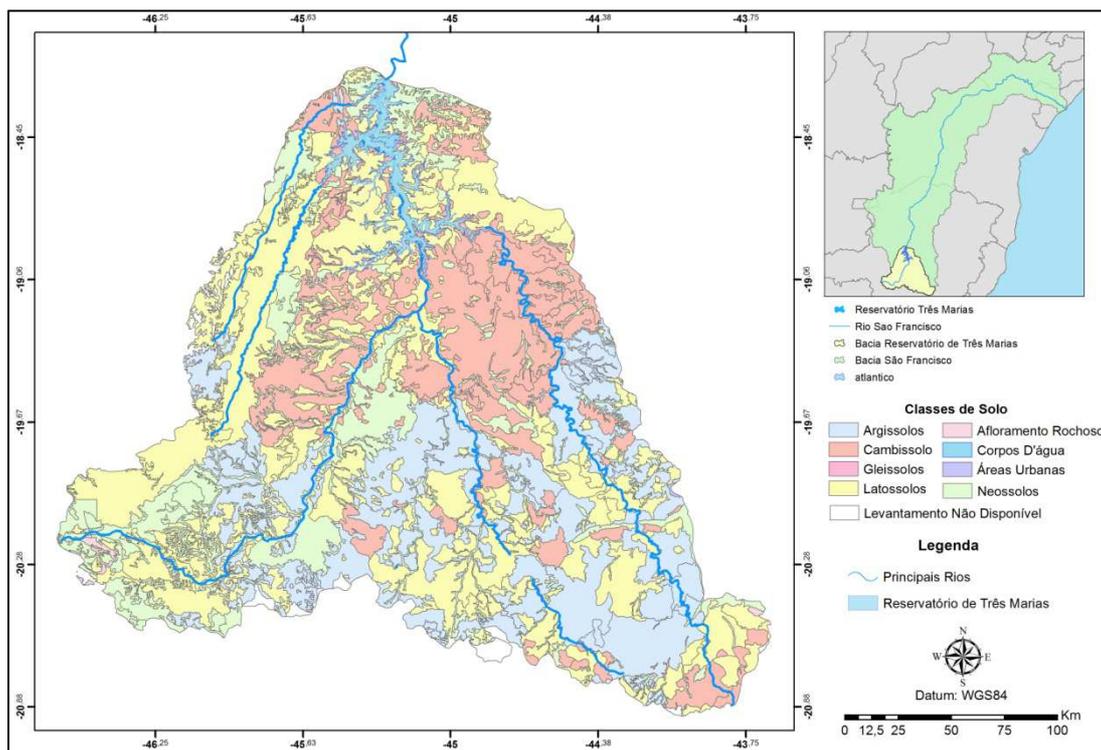


Figura 3 - Mapa de Solos da bacia de contribuição do reservatório de Três Marias - MG.

1.5.4 - Clima

De acordo com a classificação de Köppen, na região do Alto São Francisco ocorrem duas zonas climáticas: Cwa e Aw. A zona Cwa é caracterizada por um clima temperado brando, com verão quente (temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C), onde a estação seca coincide com o inverno. A zona Aw possui clima tropical chuvoso, quente e úmido, é marcada por inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é sempre superior a 18 °C.

O clima predominante na região é o Tropical Úmido e temperado de altitude com insolação média anual de 2400 h e evaporação média anual de 1000 mm (ANA, 2008). A característica climática mais importante na região em estudo é a existência de duas estações bem marcadas: uma estação chuvosa, no verão, e outra seca, no inverno.

Com relação à precipitação, os totais pluviométricos anuais variam, de forma geral, entre 1700 mm nas cabeceiras da bacia a 1000 mm na confluência do rio São Francisco com rio das Velhas, a jusante do reservatório (ANA, 2008). O trimestre mais chuvoso contribui com cerca de 55 a 60% do total anual precipitado, correspondendo, para quase totalidade da bacia, aos meses de novembro, dezembro e janeiro. Já o trimestre mais seco, correspondente aos meses de junho, julho e agosto, que contribui com menos de 5% da precipitação anual.

Por se situar na região Sudeste, o Alto São Francisco é afetado pela passagem de sistemas frontais, e a interação desses com a convecção tropical, denominada de Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS. Um percentual significativo da precipitação nesse trecho da bacia deve-se à atuação desses sistemas. Sistemas de escala subsinótica, tais como linhas de instabilidade, também ocasionam precipitação de curta duração.

Capítulo II - Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Princípios Físicos

O sucesso da tecnologia do sensoriamento remoto tem estimulado a pesquisa por aperfeiçoamento, multiplicando as suas aplicações.

Segundo Meneses & Almeida 2012, uma definição mais científica que se pode dar ao Sensoriamento Remoto é a de uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

Portanto, a partir dessa definição, subentende-se que para produzir informações robustas a partir de dados de sensoriamento remoto é necessário entender sobre as propriedades da radiação eletromagnética e os fatores que influenciam sua interação com os alvos da superfície terrestre, além dos conceitos que envolvem a mensuração dessas interações.

Essa área de pesquisa se dedica a compreender, medir e interpretar como cada objeto, em função de sua composição, absorve e reflete a energia contida na radiação eletromagnética que incide sobre sua superfície. Esse conhecimento permite não apenas indicar os alvos na imagem como também conhecer a sua composição (MENESES, 2001).

Segundo Novo, 2010, o sensoriamento remoto em sua função de sistema de geração de informações sobre a superfície terrestre pode ser dividido em dois subsistemas:

1. Aquisição de dados de sensoriamento remoto - formado pelos componentes: fonte de radiação, plataforma, sensor e centro de recepção de dados;
2. Produção de informações - composto por: sistema de coleta de dados *in situ* para fins de calibração de imagens, sistema de processamento de imagens e ferramentas de geoprocessamento (SIG, Banco de dados, entre outros).

Hoje, o grande desafio da tecnologia é transformar os dados coletados (informação primária), por meio de técnicas de processamento de imagens, em informação qualificada, ou seja, passível de ser aplicadas em estudos sobre a superfície terrestre como mapeamentos temáticos, monitoramento ambiental, levantamento de recursos naturais, entre outros.

Os conceitos apresentados a seguir servem de referencial teórico para as análises a utilizadas nesse trabalho.

2.1 - Natureza da Radiação Eletromagnética

Para o sensoriamento remoto a maior fonte de radiação eletromagnética (REM) é o sol. Devido as suas propriedades de propagação no vácuo, a radiação eletromagnética é a radiação utilizada por sistemas sensores orbitais na geração de imagens. Ou seja, ela é o meio pelo qual a informação é transferida da superfície terrestre até o satélite.

Para entender e definir a radiação eletromagnética é necessário primeiro ter conhecimento sobre seu comportamento dual, como onda e energia. Esse conceito é extremamente importante para o sensoriamento remoto, pois ao se analisar qualquer tipo de imagem de sensoriamento remoto, a coexistência da radiação eletromagnética na forma de onda e na forma de energia deve ser considerada para entender, interpretar e explicar características de composição e forma dos alvos terrestres observados (MENESES & ALMEIDA, 2012).

A REM é, portanto, ao mesmo tempo uma forma de onda e uma forma de energia. Dois modelos formulam esse comportamento dual da REM e são explicados a seguir.

2.1.1 - Modelo Ondulatório

De acordo com o modelo ondulatório e suas formulações propostas por Maxwell, a REM pode ser explicada como uma forma de onda senoidal e harmônica.

Segundo Jensen (2009), a radiação eletromagnética é gerada toda vez que uma carga elétrica é acelerada. Esse fato causa uma perturbação entre os campos elétricos e magnéticos. À essas perturbações do campo elétrico e magnético é dado o nome de onda eletromagnética. O comprimento da onda (λ) da radiação eletromagnética depende da duração do tempo pelo qual a partícula carregada é acelerada. Sua frequência (ν) depende do número de acelerações por segundo (frequência de vibração da partícula). A relação entre comprimento de onda (λ) e frequência (ν) é dada pela seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

onde c é a velocidade luz. Como c é uma constante, pode se deduzir que as ondas com comprimentos menores tem frequências maiores e, de maneira inversamente proporcional, as ondas maiores tem frequências menores.

As características das imagens segundo o modelo ondulatório são explicadas por meio da relação entre o tamanho da onda e o tamanho do objeto. Essa relação é denominada interação macroscópica.

As informações obtidas em imagens que predominam o processo de interação macroscópica dizem respeito às características das dimensões ou formas dos alvos, ou seja, a intensidade com que o alvo reflete a REM em função do tamanho da onda e da textura da superfície do objeto. Esse modelo se aplica melhor para os grandes comprimentos de onda do sensoriamento remoto, como por exemplo imagens de radar.

2.1.2 - Modelo Corpuscular

As formulações do modelo ondulatório sobre o comportamento da radiação eletromagnética falham em explicar importantes fenômenos quando a radiação eletromagnética interage com a matéria. Esse comportamento é mais evidente para as ondas de pequenos comprimentos (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Max Planck reconheceu a natureza discreta das trocas de energia radiante e propôs a teoria quântica da radiação eletromagnética. Planck observou que a REM transferia energia de um corpo para outro em quantidades fixas e discretas, à qual denominou de fótons. O fóton é a forma física de um quantum, a partícula básica estudada em física quântica que pode ser descrita como a partícula mensageira da energia da onda eletromagnética. O conceito de energia discreta revela que a quantidade de energia transportada pela radiação eletromagnética num dado comprimento de onda é a sempre a mesma.

Essa teoria define a radiação eletromagnética como uma forma de energia que se manifesta somente por meio das interações com a matéria, sendo a quantidade de energia diretamente proporcional à frequência da radiação, dada pela fórmula:

$$E = h\nu \quad (2)$$

,onde E é a energia, h é a constante de Planck e ν é a frequência. Substituindo ν por λ a partir da equação 1 tem-se:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3)$$

A partir da equação 3 pode-se concluir que a energia e o comprimento de onda são inversamente proporcionais, sendo que as maiores energias da radiação eletromagnética estão presentes nos menores comprimentos de onda.

Conforme o modelo corpuscular, a energia de determinado comprimento de onda ao atingir a superfície de um alvo interage com o mesmo por meio de trocas de energias discretas a nível de átomos e moléculas. A condição necessária para que haja a troca energética é que a REM seja absorvida pelos elétrons ou moléculas. A fração de

energia da REM que não é absorvida é então refletida e, parte dela em direção ao sensor, configurando assim a interação microscópica da radiação com o alvo.

A quantidade de energia absorvida pelo material pode ser medida indiretamente pelo sensor e, é a fração absorvida que permite definir informações sobre a composição do alvos terrestres.

Cabe ressaltar que devido ao comportamento dual, imagens formadas por sensoriamento remoto são respostas que variam em função do tamanho da onda e da quantidade de energia presente nela. Portanto, nos menores comprimentos de onda predomina interação microscópica, enquanto que nos maiores comprimentos de onda predominam interações macroscópicas.

Em sensoriamento remoto é comum se referir a radiação eletromagnética pelo seu comprimento de onda. Atrelado a esse fato, várias nomenclaturas foram definidas para a radiação eletromagnética, e essas mesmas variam de acordo com o valor do comprimento de onda. O conjunto de todas as radiações, variando ordenadamente dos menores comprimentos de ondas conhecidos (raios cósmicos) até os maiores formam o que se chama de espectro eletromagnético.

2.2 - Conceitos de Irradiância, Radiância e Reflectância

Segundo Meneses (2001), pelo princípio da conservação de energia, a REM quando atinge a superfície de um alvo terá parte refletida, parte absorvida pelos átomos ou moléculas e parte pode ser transmitida, caso o material apresente transparência. A soma desses três componentes é igual a intensidade de energia que incide sobre esse material.

Quando um sensor mede a radiação eletromagnética que deixa a superfície de um alvo é importante saber qual componente radiométrica (figura 4) da radiação é medida pelo sensor para ser convertido em uma imagem. De maneira simplificada, quando tratamos dos conceitos radiométricos da radiação óptica da luz solar dois componentes da radiação eletromagnética são fundamentais para entender como podemos retirar informações sobre a composição de alvos em imagens de sensoriamento remoto, irradiância e radiância.

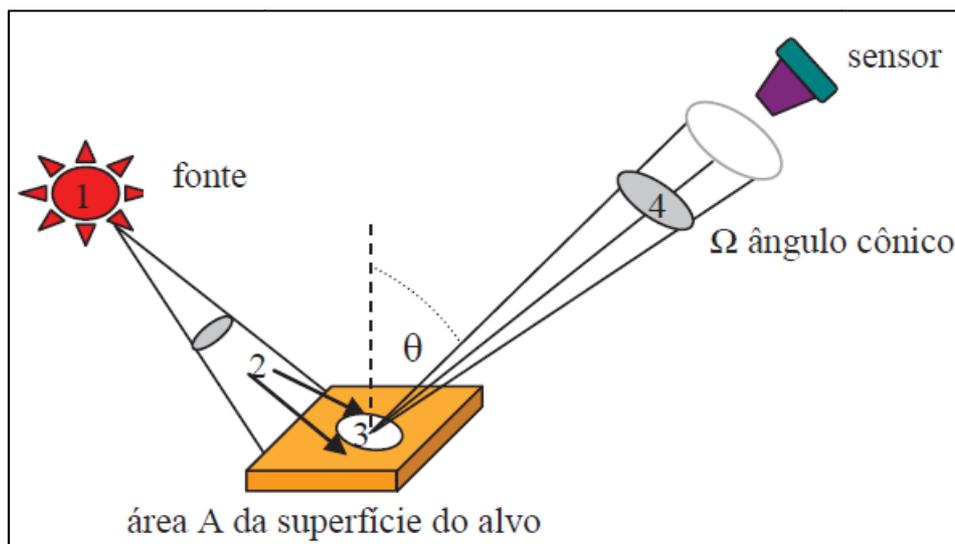


Figura 4 - Componentes radiométricos da trajetória da radiação eletromagnética da fonte ao sensor.
 Fonte: MENESES & ALMEIDA, 2012.

Irradiância, item 3 na figura 4, segundo Jensen (2009), é a quantidade de fluxo radiante que incide sobre uma superfície por unidade de área da superfície. É medida em watts por metro quadrado ($E_\lambda = \text{w/m}^2$) e varia em função do comprimento de onda (λ) da REM.

Radiância, item 4 na figura 4, é a medida mais precisa em sensoriamento remoto. Por definição é considerada a medida feita pelo sensor da densidade de fluxo radiante que deixa um elemento de área da superfície do terreno, e que se propaga em uma direção definida por um cone elementar de um ângulo sólido contendo aquela direção. É medida em watts por metro quadrado por esterradiano ($L_\lambda = \text{W/m}^2 \text{ str}$) (JENSEN, 2009; MENESES & ALMEIDA, 2012).

O fato da radiância se propagar em uma direção específica revela a importância do conceito de ângulo sólido (Ω) para sensoriamento remoto. O sistema sensor, conforme pode ser observado na figura 4, foca uma área no terreno. O tamanho dessa área varia em função do valor do ângulo sólido de visada do sensor, o qual é definido por características do sistema óptico do sensor. Portanto, a medida da radiância feita pelo sensor é limitada pelo ângulo sólido (dado em esterradiano *str*). Além do ângulo sólido, a medida da radiação que deixa a área do terreno depende também da posição que o sensor está no espaço, medida pelo co-seno do ângulo em relação à normal da superfície. Esses fatores integrados definem a radiância medida pelo sensor.

Com isso, conclui-se que a imagem formada no sensor é uma imagem de radiância, onde valores de radiância são convertidos em valores digitais (JENSEN, 2009).

Apesar de ser a medida radiométrica mais precisa no sensoriamento remoto, os valores de radiância de um alvo medido em um sensor podem variar em função dos valores de irradiância. Por sua vez, os valores de irradiância podem variar no tempo, devido as mudanças contínuas da distância e posição do sol com relação a terra. Além do fato do sol não ser uma fonte de energia uniforme. Outro fator preponderante é a dinâmica atmosférica e as interferências causadas na quantidade de fluxo radiante que chega na superfície terrestre.

Mesmo que a composição dos alvos não se altere, essas condições fazem com que o mesmo alvo possa ser registrado com diferentes valores de radiância em imagens de datas ou condições atmosféricas diferentes (NOVO, 2001)

Porém, essa configuração pode ser eliminada se for medida simultaneamente a irradiância que atinge o alvo e a radiância que deixa o mesmo em direção ao sensor. A relação entre essas grandezas radiométricas define um importante conceito em sensoriamento remoto, o de reflectância.

Reflectância é portanto a razão da radiância pela irradiância medidas no mesmo instante. É uma grandeza adimensional, sendo expressa em porcentagem e dada pela fórmula:

$$\rho_{\lambda}(\%) = \frac{L_{\lambda}}{E_{\lambda}} \quad (4)$$

Os alvos da superfície terrestre refletem uma porcentagem que varia de 0 a 100% da radiação nele incidente. Apesar da possibilidade de ter informações bem próximas das reais composições dos alvos, as imagens de radiância esbarram em limitações quando o objetivo é trabalhar detalhadamente sobre esse enfoque, assim como se faz na análise dos espectros de reflectância obtidos com os espectrorradiômetros de campo.

2.3 - Sistemas Sensores

Sistemas sensores são responsáveis por converter a energia proveniente dos objetos em um registro passível de interpretação na forma de imagem ou gráfico. Porém esse processo está sujeito à transformações, sejam elas radiométricas, geométricas ou espaciais, que degradam o sinal de interesse na maioria das vezes, influenciando no produto final.

Atualmente, existe uma quantidade significativa de satélites que fornecem imagens e que atendem uma diversa gama de usuários e aplicações.

Diferentes maneiras podem ser utilizadas para se classificar e caracterizar os sistemas sensores: quanto a fonte de Energia, quanto ao tipo de produto (imageadores e não imageadores), quanto ao princípio de funcionamento, entre outros (MOREIRA, 2005).

Independente da classificação dos tipos de sistema sensor, o usuário deve ter conceitos bem fundamentados que vão auxiliar na decisão de qual o tipo de imagem que melhor se adapta às suas necessidades de análise. Esses conceitos nada mais são do que as especificações que encontramos sobre os satélites e seus produtos, como: campo de visada do sensor, comprimento de onda das bandas, capacidade de medição de valores de radiância e data de aquisição da imagem, e, podem ser expressos indiretamente em termos de resoluções em sensoriamento remoto.

Essas resoluções atuam em conjunto, num processo iterativo que define a capacidade de determinado sensor identificar objetos em suas imagens. Segundo Meneses & Almeida, 2012 questionamentos sobre a melhor resolução da imagem para identificar ou resolver os alvos e a escala de representação dos objetos ou fenômenos devem ser a premissa na escolha de uma imagem para estudos geotemáticos.

Porém, é sabido que devido as limitações tecnológicas relacionadas a taxa de transmissão de dados para as estações terrestres, as melhores resoluções não conseguem se integrar em um único sistema sensor.

2.3.1 - Resolução espacial

A Resolução Espacial é o parâmetro que determina o tamanho do menor objeto que pode ser identificado em uma imagem. Esta relacionada com o sistema óptico a bordo dos satélites. Geralmente sensores dotados de alta resolução espacial são configurados com uma menor capacidade de resolver espectralmente os alvos presentes na sua imagem.

Como foi dito anteriormente, essas características norteiam a decisão de qual imagem será utilizada. Por exemplo, Meneses & Almeida (2012) mostra que em terrenos naturais os alvos apresentam uma alta correlação espacial, mostrando pouca variabilidade ao longo de uma área, não exigindo, para a sua identificação, altas resoluções espaciais. Já, para uma área com alta variabilidade de tipos de objetos, como numa área urbana, a exigência seria para um sensor com resolução espacial de poucos metros, para que as casas, ruas, estacionamentos, possam ser diferenciados entre si.

2.3.2 - Resolução Espectral

A resolução espectral é uma propriedade dos sistemas sensores que envolve pelo menos três parâmetros: o número de bandas, a largura das bandas, ou seja o intervalo espectral registrado pelo canal e o comprimento de onda que as bandas operam (NOVO, 2010).

Assim uma boa resolução espectral ocorre com um bom número de bandas situadas em diferentes regiões do espectro e com larguras estreitas de comprimento de onda, permitindo assim diferenciar, com riqueza de detalhes, espectralmente os diferentes alvos com seus mais variados comportamentos espectrais.

Alguns objetos são melhor diferenciados em comprimentos de onda do visível, outros no infravermelho próximo e de ondas curtas. Por isso, uma boa resolução espectral deve abranger a maior variação dentro do espectro. Já a largura de uma banda servem para tentar representar as feições de absorção da REM dos materiais. Quanto menor a largura da banda, maior pode ser a resolução espectral.

2.3.3 - Resolução Radiométrica

A resolução radiométrica descreve a capacidade que um sensor tem em registrar variações dos níveis de energia refletida, emitida ou retroespalhada que deixa a superfície do alvo. Esta diferenças de intensidade de energia devem ser registradas e reproduzidas pelo sensor. Quanto maior for essa capacidade , maior será a resolução radiométrica do sensor.(JENSEN, 2009; MENESES, 2012)

Os elementos de um sistema sensor responsáveis por registrar a energia são os detectores. A capacidade de registro dos detectores define o número de níveis de energia que o sensor pode registrar e posteriormente converter eletronicamente em um número digital.

Segundo Meneses & Almeida (2012), em termos práticos a medida da resolução radiométrica do sinal é dada pelo intervalo de número de valores digitais usados para expressar os valores de radiância medidos pelo detector. Normalmente é expressa em termos de número de dígitos binários (bits). Quanto maior número de bits de uma imagem, melhor será a sua qualidade visual em termos de detalhes no contraste da imagem. A maioria dos sensores multiespectrais com resolução espacial de 10 a 30 metros trabalha com resoluções radiométricas de 8 *bits* e o que permite capacidade de discriminar até 256 valores de radiância por banda espectral.

2.3.4 - Resolução Temporal

A resolução temporal está relacionada com a periodicidade que um sensor adquire uma imagem na mesma localidade geográfica. Essa resolução que permite analisar as mudanças que ocorrem na superfície terrestre ao longo do tempo como mudanças no uso do solo. Para fins de monitoramento essa resolução tem um papel extremamente importante no sensoriamento remoto.

2.4 - Radiometria

Por definição, radiometria é a medida quantitativa da intensidade de qualquer um dos tipos conhecido de radiação. É por meio de medidas radiométricas que se entende com qual intensidade cada material reflete a REM nos diferentes comprimentos de onda, subsidiando o entendimento de como cada alvo pode aparecer em imagens multiespectrais (MENESES, 2001).

O usuário que se utiliza dessa área do conhecimento elimina a subjetividade existente nos métodos empíricos de interpretação, baseados no conhecimento de campo comparado com a análise da imagem. Segundo Meneses, 2001 ao se utilizar desses métodos o intérprete estabelece um processo de interpretação baseado em um sistema de classificação comparativo (objeto visto na imagem X objeto visto no campo) que só poderá vir mostrar eficiência após longo período de prática.

O que se sugere então é usar medidas radiométricas como base para métodos de interpretação de imagens multi e/ou hiperespectrais. Por isso, a radiometria pode ser considerada com uma das mais relevantes áreas de pesquisa do sensoriamento remoto.

Essa importância é reconhecida na prática quando se pretende fazer interpretações dessas imagens identificando e discriminando alvos terrestres, para fins de mapeamento temático ou de obtenção de informações quantitativas. Para interpretar imagens multi e hiperespectrais é fundamental conhecer os padrões de respostas da reflectância dos alvos terrestres, ou seja o seu comportamento espectral ao longo dos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético

Os sistemas sensores responsáveis por essa análise de maneira detalhada são os espectrorradiômetros.

Os espectrorradiômetros são equipamentos que permitem mensurar a energia refletida em cada comprimento de onda ao longo de um espectro contínuo e que apresentam essa medida na forma de gráficos denominados curvas de reflectância espectral. Para a região do visível do espectro eletromagnético a obtenção do padrão das

respostas dos alvos denomina-se espectrorradiometria de reflectância. Isso porque estes equipamentos são capazes de medir as grandezas radiométricas (radiância e irradiância) necessárias para calcular a reflectância dos alvos.

2.4.1 - Medidas de Reflectância

Geralmente estudos de comportamento espectral de alvos é feito por meio de métodos experimentais de laboratório e campo.

Quando as medidas espectrorradiométricas são feitas em laboratório, sob condições bastante controladas, os valores de reflectância adquiridos são uma função direta das propriedades físico-químicas referentes às composições dos objetos.

Segundo Jensen 2009 as medidas de reflectância *in situ* podem ser usadas entre outros objetivos para calibrar dados de sensores remotos. Por exemplo, dados de sensoriamento remoto podem ser correlacionados com dados de reflectância *in situ* do mesmo alvo para fins de minimizar os efeitos da atmosfera na aquisição dos mesmos.

Uma condição importante que influencia na qualidade das medidas espectrorradiométricas é a disposição entre fonte, alvo e sensor estabelecida no momento da aquisição, figura 5.

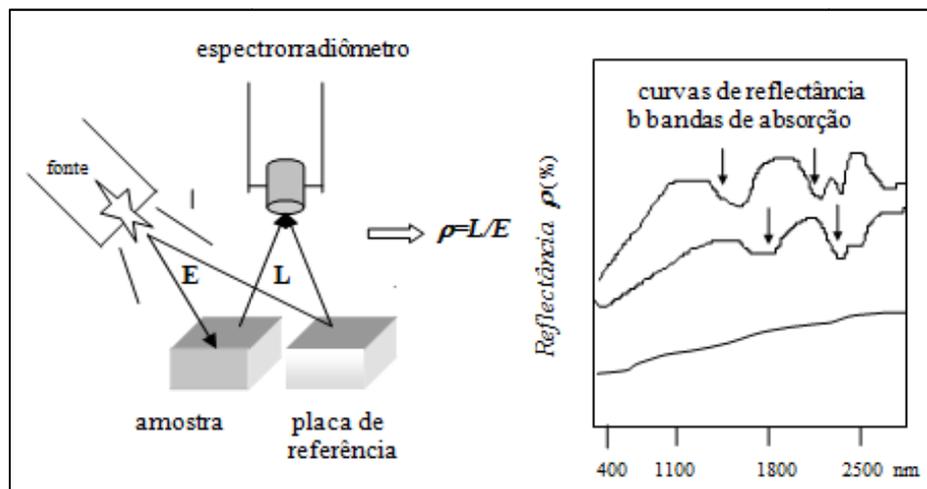


Figura 5 - Modelo esquemático da geometria em laboratório de medidas de reflectância por um espectrorradiômetro. Fonte: Meneses, 2001.

Essa disposição é controlada pela geometria de arranjo. Tanto no campo como no laboratório é muito importante definir a melhor relação geométrica relativa para a medição do seu alvo.

2.4.2 - Comportamento Espectral de alvos

Além da importância já discutida sobre o conhecimento do comportamento espectral de alvos, cabe ressaltar que essa frente de conhecimento em sensoriamento remoto fornece outros subsídios ao desenvolvimento da tecnologia.

Segundo Novo 2010, pesquisas sobre comportamento espectral de alvos auxiliam na definição de novos sensores, à definição do tipo de pré-processamento a que devem ser submetidos os dados brutos ou mesmo a definição da forma de aquisição dos dados. O comportamento espectral da maioria dos alvos naturais é afetado por fatores externos ao alvo (geometria de aquisição) e por fatores inerentes ao alvo.

Portanto, a análise pura e simples de uma curva espectral de determinado alvo não fornece informações suficientes sobre ele, a menos que haja informações sobre as condições de aquisição dos dados. Essas condições de coleta de dados envolvem o conhecimento não só dos instrumentos utilizados, dos métodos de medição, mas também das condições experimentais em que se realizaram as medidas.

Neste trabalho será tratado apenas do comportamento espectral da água devido ao objeto de estudo proposto.

Capítulo III - Uso de Sensoriamento Remoto no estudo de ambientes aquáticos

O sensoriamento remoto da água de superfície tem sido usado principalmente para investigar oceanos. Isso contribuiu muito para a descoberta, mapeamento e compreensão de processos marinhos de grande escala. Preisendorfer (1976), Jerlov (1976) e Austin (1974) estabeleceram uma firme base física definindo as propriedades ópticas inerentes e aparente das águas marinhas.

Infelizmente, esses trabalhos pioneiros não foram aproveitados no âmbito dos estudos das águas continentais, nem sistematizados dentro das redes de monitoramento hidrológicos, devido à falta de sensores espaciais adequados, em termos de resolução temporal (número de imagens disponíveis por unidade de tempo) e/ou espacial (tamanho dos rios que poderiam ser estudados), que permitissem o monitoramento.

Diferentes estudos realizados no mundo (Kirk 1981, 1991, Mertes *et al.*, 1993; Dekker, 2002; Curran *et al.*, 1987; Curran e Novo, 1988), incluindo o Brasil (Novo *et al.*, 1989), demonstraram a possibilidade de relacionar o conteúdo de sedimentos e a cor detectada pelos satélites das águas continentais. Em particular, comprovou-se que as propriedades ópticas das águas são fortemente influenciadas pelo conteúdo e tipo de sedimento. Estudos realizados por Mertes *et al.* (1993) usando técnicas de mistura espectral para imagens Landsat , demonstraram que os dados de satélite poderiam ser bons estimadores da concentração de sedimento, apesar da falta de validação.

Rudorff (2006) avalia que o sensoriamento remoto tem contribuído na realização de estudos de ambientes aquáticos, ajudando a entender as complexidades do ecossistema e suas interações. Para tanto, o sensoriamento remoto de ambientes aquáticos deve envolver variações da magnitude e qualidade da radiação que deixa a água em direção ao sensor, para que possa se obter informação quantitativa do tipo de substância presentes na água e suas concentrações.

Segundo Novo (2001) ao estudar corpos d'água por sensoriamento remoto, a interpretação do significado das variações de cor da água nas imagens é tarefa bastante complexa pois:

- ✓ A região espectral onde se pode obter os parâmetros de composição das águas por meio do seu comportamento espectral é fortemente afetada pela interferência atmosférica;

- ✓ As características de transmitância da água faz com que a energia emergente do volume d'água integre informações relativas a diferentes profundidades, para um mesmo corpo d'água;
- ✓ Os componentes opticamente ativos da água apresentam comportamento espectral muito semelhantes, o que dificulta diferenciá-los quando se apresentam juntos numa massa d'água;
- ✓ A reflectância da superfície da água é afetada por fatores como o vento, a geometria de aquisição e principalmente a amplitude das ondas da superfície d'água

A utilização de sensoriamento remoto óptico, de uma forma geral, requer o conhecimento das origens dos fluxos de radiação que atingem o sensor. Quando sistemas aquáticos são estudados, a diferenciação das componentes radiométricas é ainda mais importante do que nos sistemas terrestres, pois a energia proveniente dos sistemas aquáticos é relativamente mais baixa e a água possui diversos materiais dissolvidos e particulados (NASCIMENTO, 2010).

Em virtude dessa característica, a extração de informação de ambientes aquáticos a partir de Sensoriamento Remoto e radiometria de campo só será eficiente com uma boa compreensão dos processos de interação da energia eletromagnética com a água e seus componentes opticamente ativos e o entendimento de como o sistema sensor obtém essa informação.

3.1 - Interação da REM com a água registrada por sistemas sensores

Segundo Novo (2001) e Jensen (2009), um sistema sensor detecta quatro diferentes fluxos de radiação eletromagnética no que diz respeito a interação com uma superfície aquática (figura 6).

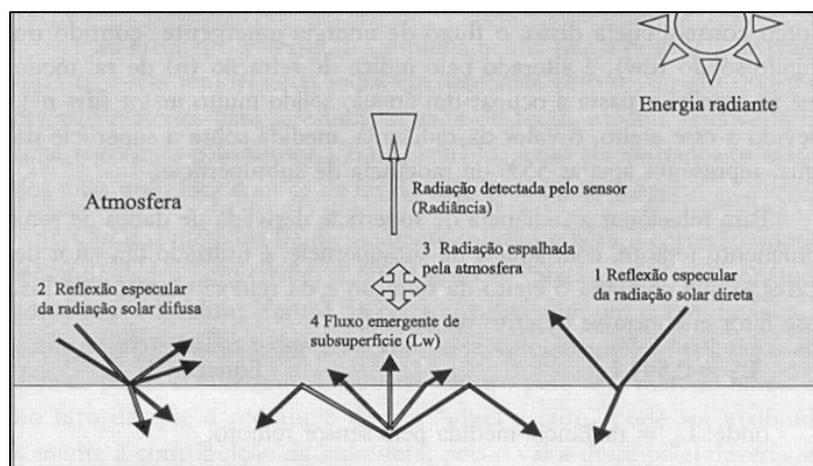


Figura 6 - Componente do fluxo de energia que deixa a água
 Fonte: adaptado de KIRK 1994 *apud* NOVO, 2001.

De acordo com a ilustração, a radiação registrada pelo sensor é proveniente das seguintes origens:

1. Reflexão do fluxo de radiação direta que atinge a superfície d'água;
2. Reflexão do fluxo de radiação difusa que atinge a superfície d'água;
3. Fluxo espalhado pela atmosfera;
4. Fluxo espalhado no interior do volume da água capaz de emergir e atravessar a interface ar/água em direção ao sensor.

Jensen (2009) explica que a radiação registrada por um sensor se dá por meio de uma relação matemática da energia eletromagnética proveniente desses quatro processos. Nessa relação o total da radiância (L_t) de um corpo d'água mensurada por um sensor é dada pela soma desses componentes, conforme ilustra a figura 7.

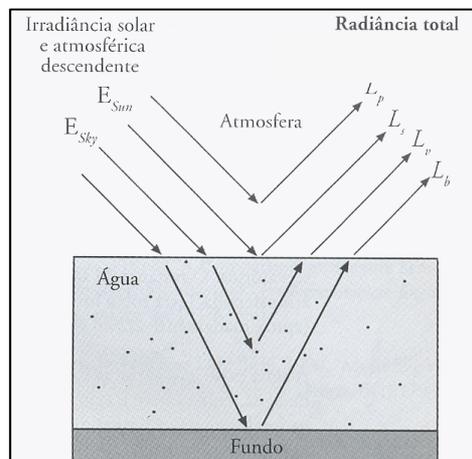


Figura 7: Processos e Componentes da radiação eletromagnética proveniente da água registrada em um sensor. Fonte: JENSEN, 2009

Portanto a radiância total (L_t) é dada por:

$$L_t = L_p + L_s + L_v + L_b \quad (5)$$

onde:

- ✓ L_p - é a porção da irradiância solar espalhada pela camada atmosférica. Essa porção não atinge a superfície da água e, portanto, não tem nenhuma informação sobre o alvo de interesse. É considerada como ruído atmosférico.
- ✓ L_s - porção da irradiância solar que atinge a superfície d'água e é refletida pela sua camada superficial. Esse componente é responsável pela reflexão especular, que ocorre quando o ângulo zenital solar e o ângulo de visada do sensor são idênticos;

- ✓ L_v - porção da irradiância solar que atinge a superfície d'água, porém penetra na interface ar água e interage com os constituintes, sem alcançar o fundo. Esse é o componente que contém informação sobre a composição do meio aquático.
- ✓ L_b - parte da radiância, que penetra na água, alcança o fundo e é propagado de volta para a superfície.

Entre as possibilidades de aplicação do sensoriamento remoto de ambientes aquáticos está a de se investigar substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas no interior do corpo d'água. Nestes casos, a modelagem é bem mais complexa e torna-se inerentemente tridimensional envolvendo espalhamentos múltiplos de diferentes ordens dentro do perfil do corpo d'água (MCCLUNEY, 1974 *apud* BARBOSA, 2005). Assim, quando há o interesse em identificar constituintes orgânicos e inorgânicos na coluna de água, tais como, sólidos suspensos, a componente que fornece informações úteis é a radiância volumétrica (L_v), calculada por:

$$L_v = L_t - (L_p + L_s + L_b) \quad (6)$$

Nesse caso é necessário fazer uma cuidadosa correção radiométrica dos dados do sensor remoto para remover a influência das refletâncias indesejadas e que causam ruídos na resposta dos alvos de interesse presentes na água.

3.2 - Comportamento Espectral da água

A hidrologia óptica se refere ao estudo do comportamento da luz no meio aquático. Para entender sobre as peculiaridades do comportamento espectral da água dois conceitos sobre componentes radiométricos da interação radiação eletromagnética e água, devem ser definidos.

A água está presente na superfície terrestre em 3 diferentes estados físicos. Essa condição altera muito a maneira como este alvo interage com a radiação eletromagnética. O comportamento espectral da água em seu estado líquido deve ser considerado a princípio de duas maneiras distintas: (i) o comportamento espectral da água pura e, (ii) o comportamento espectral das águas naturais. Entende-se por água pura como uma água sem constituintes suspensos ou dissolvidos.

A água pura tem baixa reflectância mesmo na região do visível do espectro eletromagnético. Quanto mais pura for sua constituição mais baixa é sua reflectância, devido ao pequeno coeficiente de espalhamento e elevada transmitância (NOVO, 2010).

Devido às suas propriedades de solvente e a sua capacidade de transportar partículas, a água incorpora outros componentes em sua composição, os quais definem a qualidade das águas naturais (SPERLING, 1996).

3.2.1 - Comportamento Espectral da Água Pura

O comportamento espectral da água pura é determinado, basicamente, pelo espalhamento molecular nos comprimentos de onda mais curtos. 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 com máximo de absorção em 750 nm conforme será discutido posteriormente. 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 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 à região entre 400 e 900 nm (KIRK, 1994; BARBOSA, 2005).

3.2.2 - Materiais que influenciam no comportamento espectral da água pura

Um dos principais interesses no uso de imagens de satélite em ambientes aquáticos é verificar a variação espacial e temporal da composição da água, possibilitando investigar a origem e o deslocamento de substâncias específicas em suspensão ou dissolvidas na água.

Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintetizantes, matéria orgânica dissolvida e as moléculas de água são os principais agentes que regem as propriedades ópticas inerentes da água e, portanto, são chamados de constituintes opticamente ativos (COAs) (JENSEN, 2009; RUDORFF *et al.*, 2007).

A reflectância de um dado corpo d'água contém informações sobre a concentração e o tipo de componentes opticamente ativos no volume de água analisado (JENSEN, 2009; NOVO, 1988) (Figura 8).

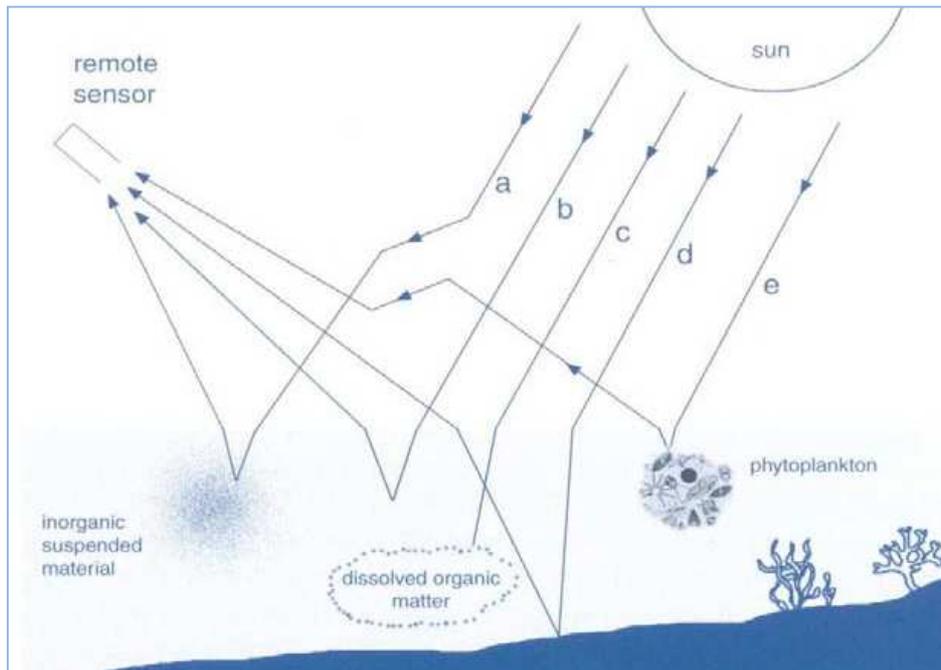


Figura 8 - Fatores que influenciam a luz emergente que deixa o corpo de água: (a) retro-espalhamento pelo material inorgânico em suspensão; (b) retro-espalhamento pelas moléculas de água; (c) absorção pela matéria orgânica dissolvida; (d) reflexão do fundo; (e) retro-espalhamento pelo fitoplâncton.

Quando um corpo d'água contém uma mistura desses materiais, a dificuldade de extrair quantitativamente informações sobre os constituintes específicos através de técnicas de sensoriamento remoto, aumenta consideravelmente (GOODIN *et al.*, 1993).

Vários estudos foram realizados para a determinação da resposta espectral dos componentes opticamente ativos presente na água, na tentativa de se obter uma melhor compreensão de seus comportamentos espectrais, para a definição de modelos que auxiliem na sua discriminação (GOODIN *et al.*, 1993; BUKATA, 1995; HAN 1997; KIRK, 1994; DEKKER, 1993; RUNDQUIST *et al.*, 1996; QUIBELL, 1991; ; JENSEN, 2002; IOCCG, 2006,).

O efeito das diferenças entre as composições das substâncias opticamente ativas presentes na água resulta em propriedades ópticas inerentes de absorção e o espalhamento da radiação eletromagnética, indicando a distinção de assinaturas espectrais para cada tipo de água (figura 9).

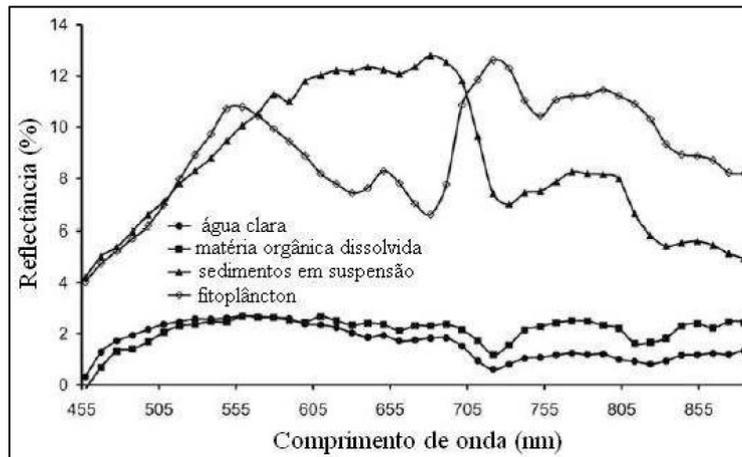


Figura 9 - Comportamento espectral do fitoplâncton, sedimentos em suspensão, matéria orgânica dissolvida e água. Fonte: Rudorff et al. (2006).

A radiação absorvida pela água é máxima em maiores comprimentos de onda como o vermelho e infravermelho, decrescendo em direção a região do azul. Esse coeficiente é influenciado tanto pelas próprias moléculas de água como pelas substâncias húmicas dissolvidas, organismos clorofilados e partículas em suspensão (ESTEVES, 1998; TRENTIN, 2009)

Como as propriedades espectrais destes componentes variam com o comprimento de onda incidente, serão descritos a seguir as propriedades de cada um desses constituintes opticamente ativos e sua contribuição na reflectância do corpo d'água para a faixa de 400 a 900 nm.

3.2.2.1 Sólidos em Suspensão

Sólidos em suspensão se concentram, principalmente, em corpos d'água continentais (rios, lagos, estuários, entre outros) e em regiões costeiras aos oceanos. A presença desse componente é responsável pelo aumento da reflectância na região do visível e do NIR, conferindo um sinal que, muitas vezes, apresenta dominância em relação aos outros COA. (JENSEN, 2009; LOBO, 2005)

A Figura 10 ilustra a reflectância espectral da água clara (pura) e da água com concentrações variáveis de sedimentos em suspensão oriundos de solos siltoso e de solos argilosos.

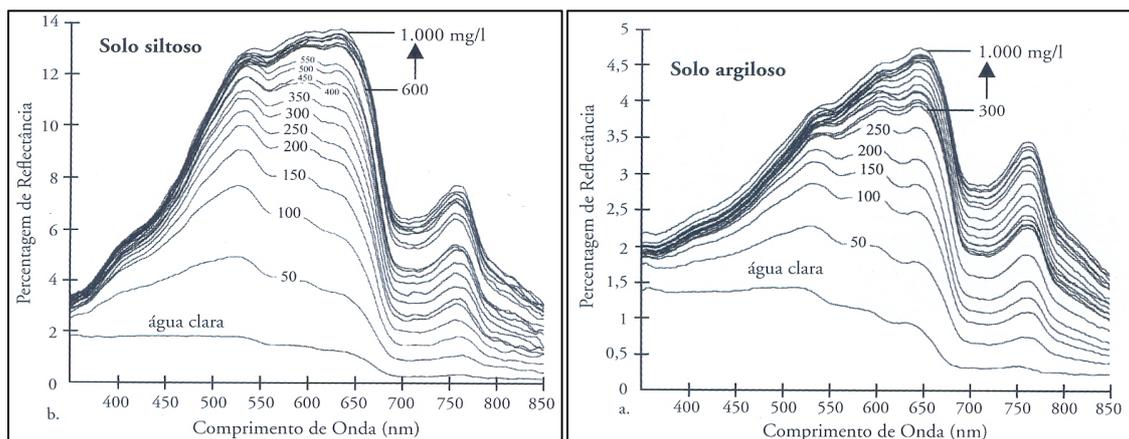


Figura 10 Comparação da reflectância espectral medidas *in situ* de águas com claras com águas ricas em sedimentos arilagos e siltosos. Fonte: JENSEN, 2009.

A reflectância da água clara diminui continuamente após cerca de 580 nm devido à absorção da coluna d'água. Quando a concentração de sedimentos em suspensão aumenta, a reflectância é maior em todos os comprimentos de onda, principalmente na faixa 500 e 700 nm. Outra característica é que o máximo de energia refletida migra para comprimentos de onda mais longos, na medida em que há aumento na concentração deste constituinte. Além disso, sedimentos siltosos conferem maior porcentagem de reflectância ($\approx 14\%$) quando comparados com sedimentos argilosos em suspensão ($R\% \approx 5\%$), de menor granulometria (Figura 10). Diversos autores relacionam a concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão com picos de reflectância obtidos por sensores orbitais multi-espectrais e por espectrorradiômetros de campo (LATHROP *et al.*, 1991; FERRARI *et al.*, 1996; HAN, 2005; e JIAO *et al.*, 2006, MARTINEZ 2009, VILLAR, 2012).

A reflectância espectral dos sedimentos em suspensão na água é uma função da quantidade e das características do material na água. Coeficientes de correlação (r) foram calculados para descrever o relacionamento entre a concentração de sólidos em suspensão e a reflectância espectral. Para sólidos em suspensão formados por argila, os valores de correlação obtidos foram de 0,28 a 0,97, e para sólidos em suspensão formados por areia, esses valores foram de 0,78 a 0,98 (JENSEN, 2009).

Para os dois tipos de sólidos, os maiores valores de correlação ($r > 0,90$) ocorreram na região do infravermelho próximo entre 714 e 880 nm (JENSEN, 2009). O mesmo autor relata que os comprimentos de onda do visível entre 580 - 690 nm fornecem mais informações sobre o tipo de sólidos em suspensão na superfície da água, enquanto que o infravermelho próximo (714 - 880 nm) pode ser usado para se

determinar a quantidade de sólidos suspensos na superfície da água. Entretanto, estas relações podem não ser aplicadas universalmente, tendo em vista, que para cada tipo de sedimento em suspensão devem ser investigadas as características espectrais de absorção e espalhamento da água e dos solos da área geográfica de interesse.

Outra característica relevante observada na literatura é a existência de correlação entre sólidos em suspensão e turbidez. A existência dessa relação é compreensível em decorrência da turbidez fornecer o grau de atenuação de intensidade, que um feixe de luz sofre ao atravessar a coluna d'água, devido à presença de sólidos em suspensão (CETESB, 2007). Diversos autores tem abordado sobre o assunto, testando a potencialidade da turbidez como preditor de sólidos em suspensão (NELLIS *et al.*, 1993; LEWIS, 1996; LEWIS & EADS, 1998; BARBOSA, 2005, MOREL & BÉLANGER, 2006; CHEN *et al.*, 2007).

3.2.2.2 Fitoplâncton

O Fitoplâncton é um grupo heterogêneo composto principalmente por algas fotossintetizantes que se distribui por grande parte dos ambientes marinhos e aquáticos continentais. Nestes ambientes, ele é o principal responsável pela captação de energia eletromagnética, produzindo oxigênio durante o processo fotossintético.

A clorofila "a" ao ser introduzida na água pura provoca mudanças em suas características de cor. A Figura 11 exhibe as características da reflectância espectral da água clara e da mesma água contendo alga composta primariamente por clorofila "a". A água clara refletiu aproximadamente 2% entre 400 e 500 nm e diminui gradualmente para menos que 1% em comprimentos de onda maiores que 710 nm. Observa-se que quando há concentração de clorofila na coluna d'água, há também um significativo decréscimo na quantidade relativa de energia refletida nos comprimentos de onda do azul (entre 400 e 500 nm) e do vermelho, aproximadamente em 675 nm (JENSEN, 2009; CORAZZA, 2010).

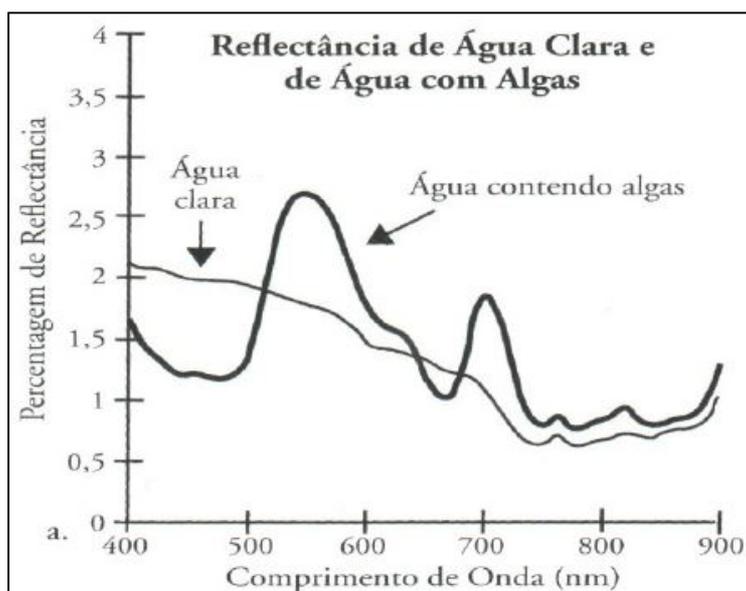


Figura 11 - Porcentagem de reflectância de água clara e de água com algas com base em medidas in situ feitas com espectrorradiômetro. Fonte: JENSEN, 2009.

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) (LOBO, 2009)

3.2.2.3 Matéria Orgânica

As substâncias húmicas, representantes da matéria orgânica dissolvida, são provenientes de processos de decomposição e ciclo de nutrientes de material alóctone e, frequentemente, 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; BUKATA *et al.*, 1995; ENES, 2010).

A influência do CDOM no corpo d'água é apresentada na figura 12, na qual visualiza-se curvas espectrais em que a concentração de sólidos suspensos e clorofila *a* são insignificantes e a concentração de carbono orgânico dissolvido (COD), se altera no intervalo de 0 a 20 mg/l.

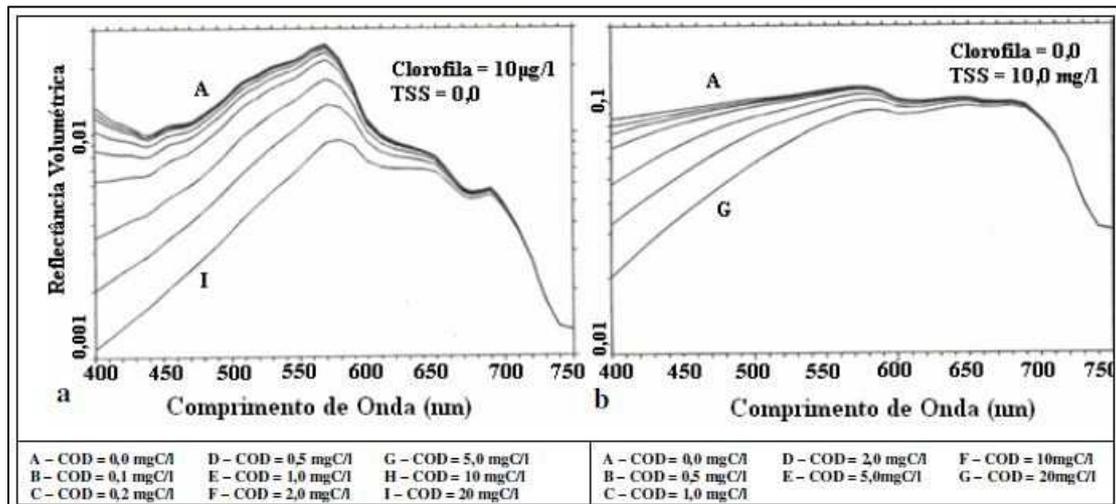


Figura 12 - Reflectância espectral da água para varias concentrações de carbono orgânico dissolvido na Fonte: adaptado de BUKATA et al *apud* ENES, 2008

Analisando a figura percebe-se que a adição sistemática de COD resulta em uma diminuição tênue no valor de reflectância nos comprimentos de onda menores que 600 nm (região espectral do azul e verde) e variações pouco significativas nos valores de reflectância em comprimento de onda maiores de 600 nm (BUKATA *et al.*, 1995).

3.2.3 - Propriedades ópticas das águas.

A radiação eletromagnética interage e é fortemente afetada pela natureza do meio no qual ela se propaga, sendo denominado de óptica hidrológica o campo da física que estuda essas interações e busca definir propriedades ópticas do meio aquático. As propriedades óticas da água podem ser divididas em dois grupos: as propriedades óticas inerentes (POI) e as propriedades óticas Aparentes (POA).

As propriedades ópticas aparentes são aquelas que dependem tanto do meio quanto da estrutura geométrica (direcional) do campo de luz do ambiente. Já as propriedades ópticas inerentes são aquelas propriedades que dependem apenas do meio e, portanto são independentes do campo de luz. (NOVO, 2001)

As POI são facilmente definíveis, mas podem resultar extremamente difíceis de medir. As POA são geralmente mais fáceis de medir, mas há problemas na interpretação entre a causa de sua dependência e os fatores ambientais presentes.

3.2.3.1 - Propriedades Ópticas Inerentes

O fluxo de energia radiante que incide sobre a lâmina de água está sujeito a dois processos básicos: absorção ou retroespalhamento. Estes processos são qualificados por meio dos coeficientes da absorção e espalhamento, respectivamente, que por sua vez são

conhecidos como propriedades ópticas inerentes das águas. Inerentes porque são propriedades que dependem apenas dos componentes do próprio meio aquático.

A interação entre os componentes opticamente ativos (COAs) presentes na água determina o comportamento espectral da luz que penetra, ou é refletida por esta camada. Isto é resultado direto das POI das moléculas de água, das substâncias dissolvidas e das partículas presentes. (BARBOSA, 2005)

A parte absorvida é transformada em energia química pela fotossíntese ou em energia calorífica através do aquecimento da água. Já os choques dos fótons com as partículas dissolvidas e/ou em suspensão causam o fenômeno de dispersão ou espalhamento (NOVO, 2001; BARBOSA, 2005).

Para utilizar os processos de espalhamento e de absorção da luz na água para inferir sua composição, torna-se necessário quantificá-los, conforme figura 13.

Segundo (Kirk 1994), deve se considerar um pequeno volume d'água ΔV , de espessura Δr , iluminado por um raio de luz monocromático de comprimento de onda λ , cuja densidade espectral de potencia Φ é $\Phi_0(\lambda)$ com unidades (W/nm).

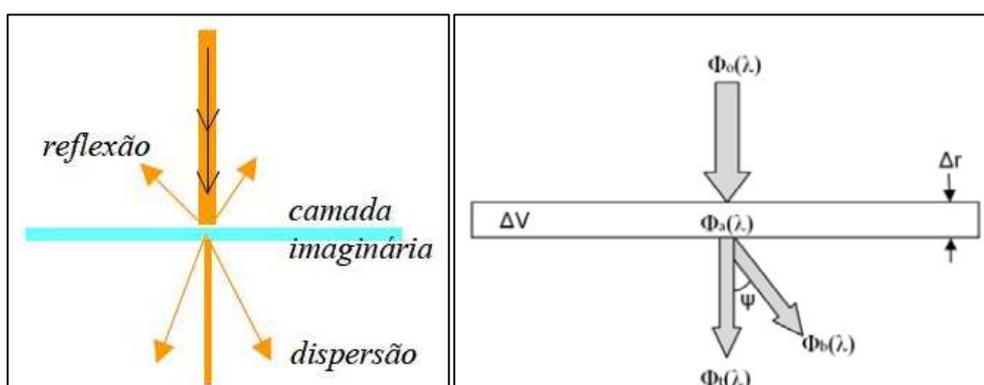


Figura 13 - Interação de um raio de luz com o meio aquático.

Fonte: adaptado de BARBOSA,2005; VILLAR, 2013

A fração do raio de luz que é absorvida no volume d'água é definida como $\Phi_a(\lambda)$. Outra fração é espalhada com um ângulo ψ , em função da direção do raio incidente. Essa fração denota-se $\Phi_e(\lambda)$ e é portanto a quantidade espectral de energia espalhada. Por fim, a energia denominada $\Phi_t(\lambda)$, é aquela que é transmitida através do volume d'água sem sofrer trocas em sua direção (VILLAR, 2013).

Quantitativamente, a absorção espectral ou absorvância (A) leva em conta a fração da potencia incidente que é absorvida no volume d'água, o espalhamento espectral (B) é a fração da potencia incidente que é espalhada no volume d'água e a transmitância espectral (T) é a fração que é transmitida, da seguinte forma:

$$A(\lambda) = \frac{\Phi_a(\lambda)}{\Phi_o(\lambda)} \quad (7)$$

$$B(\lambda) = \frac{\Phi_b(\lambda)}{\Phi_o(\lambda)} \quad (8)$$

$$T(\lambda) = \frac{\Phi_t(\lambda)}{\Phi_o(\lambda)} \quad (9)$$

A soma dessas três frações é igual a uma unidade. A e B são frações do fluxo do raio de luz incidente que se perde no volume d'água, e a soma da absorção e espalhamento é chamada atenuância (C).

No caso do volume d'água infinitesimal, (Δr) os coeficientes de perda por absorção e espalhamento são ΔA e ΔB ; e a atenuação ΔC ($\Delta C = \Delta A + \Delta B$).

Assim, a fração do fluxo incidente que é absorvido, dividido pela espessura da camada imaginária, é definida como coeficiente de absorção, **a**.

A fração do fluxo incidente que é espalhado, dividido pela espessura da camada, é definida como coeficiente de espalhamento, **b**. O coeficiente de espalhamento **b** que é composto pelos coeficientes de retroespalhamento b_b e de espalhamento frontal b_f . Se um raio de luz incidente é espalhado por uma partícula, o espalhamento da luz é em todas as direções, portanto pode ser dividida em dois componentes: o espalhamento frontal b_f (forward scattering) que se refere à luz espalhada no mesmo sentido da luz incidente e o retroespalhamento b_b (backscattering), que é a luz espalhada no sentido contrário da luz incidente. A somatória das duas ($b_f + b_b$) é o espalhamento total.

Então tem-se que:

$$a = \Delta A / \Delta r \quad (10)$$

$$b = \Delta B / \Delta r \quad (11)$$

O coeficiente de atenuação (**c**) da luz é definido como a fração do fluxo de luz que é absorvido e espalhado por unidade de espessura do volume d'água:

$$c = a + b \quad (12)$$

portanto,

$$c = \frac{\Delta A}{\Delta r} + \frac{\Delta B}{\Delta r} \quad (13)$$

$$c = \frac{\Delta C}{\Delta r} \quad (14)$$

Para as POI é importante ressaltar que os efeitos dos diferentes componentes são aditivos, ou seja, se um corpo de água possui sedimentos, fitoplâncton e substâncias dissolvidas, os coeficientes de absorção e de espalhamento totais são a soma dos coeficientes de cada um desses componentes mais aqueles das moléculas de água (KIRK,1994).

Como consequência, a medida em que o feixe de radiação eletromagnética se aprofunda na camada de água ele vai sendo alterado, tanto qualitativamente como quantitativamente, criando um campo de luz submerso cuja composição espectral e intensidade está intimamente associada à composição da água, ou seja, às suas propriedades físicas, químicas e biológicas (MENESES,2001).

Por serem propriedades físicas do meio, estes coeficientes independem de mudanças na distribuição angular do fluxo radiante, ou seja, da estrutura geométrica do campo de luz ambiente (KIRK, 1994).

O entendimento dos efeitos que os diferentes componentes exercem sobre os coeficientes de absorção e espalhamento do corpo d'água permite inferir algumas propriedades do corpo d'água a partir de variações de sua cor.

3.2.3.2 Propriedades Ópticas Inerentes da água pura

A água pura mostra um espectro de absorção com valores mínimos no azul, e aumento contínuo a partir de aproximadamente 570nm. Outro aumento abrupto se observa na região a partir de 700nm, atingindo o máximo em torno de 750 nm, onde diminui acentuadamente (figura14).

Observando as curvas da figura 14, conclui-se que o comportamento espectral da água pura é determinado, basicamente, pelo espalhamento molecular nos comprimentos de onda mais curtos. O coeficiente de absorção (*a*) da água pura é mínimo na região compreendida entre 400 nm e 600 nm, aumentando rapidamente na região do infravermelho.

A curva do coeficiente de espalhamento (*b*) da água pura tem um comportamento, de certa forma, oposto. Os valores são máximos na região do azul e decrescem exponencialmente em direção ao infravermelho. Como os valores de absorção superam muito os valores de espalhamento, a curva de atenuação da luz (*c*) em água pura será muito semelhante à curva de absorção, com valores muito próximos.

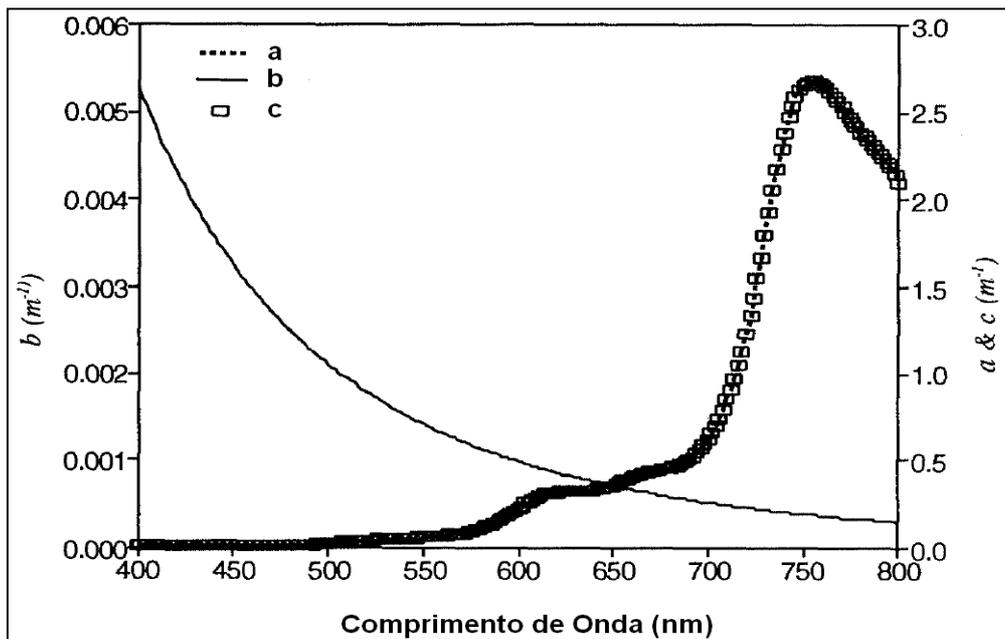


Figura 14 - Curvas dos coeficientes de absorção (a) espalhamento (b) e atenuação (c) da água pura.
 Fonte: adaptado de Dekker, 1993

Podemos ter uma ideia da reflexão da água pura a partir da razão b/a . A partir do resultado que a energia refletida pela água pura é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho, i.e., água pura, quando observada a partir de um satélite, tenderá a apresentar a cor azul, principalmente se o corpo d'água tiver volume suficiente para atenuar os efeitos das margens e do fundo.

Porém, em águas naturais, como já foi visto discutido, os componentes opticamente ativos presentes são fatores determinantes da sua curva de reflectância. Sedimentos em suspensão, pigmentos fotossintéticos e matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) são os componentes responsáveis pelo comportamento espectral das águas naturais continentais. As regiões de absorção e espalhamento destes constituintes da água é que vão definir a forma final da curva de reflectância, enquanto sua concentração é responsável pela magnitude das feições e pela quantidade de energia refletida em subsuperfície (Kirk, 1994; Mobley, 1994).

3.2.3.3 - Propriedades Ópticas Inerentes das águas naturais.

As POI das águas naturais são influenciadas diretamente pelos componentes dos corpos d'água. A absorção é representada pela equação 15 (Sathyendranath e Morel, 1983).

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + a_{chl}(\lambda) + a_{TR}(\lambda) \quad (15)$$

onde,

- ✓ a_w é a absorção da água pura;
- ✓ a_{CDOM} é a absorção da matéria orgânica dissolvida colorida;
- ✓ a_{chf} é a absorção dos pigmentos fotossintéticos e;
- ✓ a_{tr} é a absorção do material particulado não orgânico.

A matéria orgânica dissolvida é um dos componentes responsáveis pelo aumento do coeficiente de absorção da água. A figura 15 ilustra a absorção específica pela matéria orgânica dissolvida, que é muito alta nos comprimentos de onda curtos e diminui de maneira exponencial para comprimentos de onda maiores. O fitoplâncton apresenta uma absorção muito alta no azul (440 nm), baixa entre 550 nm e 650 nm, apresentando um novo pico de absorção em torno de 675 nm. Estes máximos estão associados à clorofila a, que tem seus picos de absorção em 440 nm e 675 nm. A absorção do material inorgânico particulado é também uma curva exponencial negativa, sendo, muito alta no azul e vai baixando quando o comprimento de onda é maior.

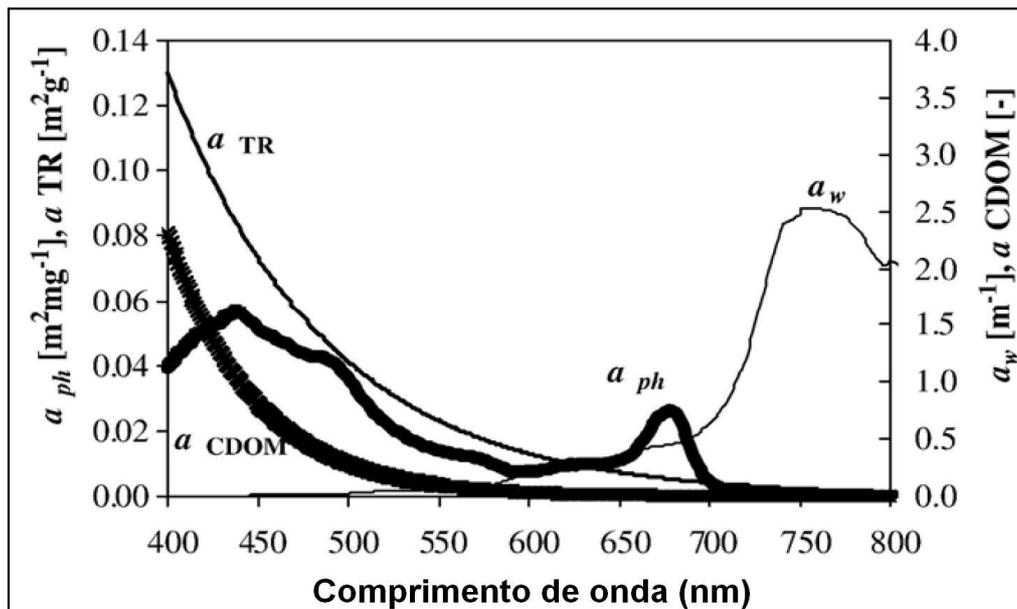


Figura 15 - Coeficiente de absorção específico para a: água pura (a_w), e os componentes: fitoplâncton (a_{ph}), matéria orgânica dissolvida (a_{CDOM}) e o material particulado não orgânico (a_{TR}). (Adaptado de Giardino 2007)

O retroespalhamento é dado pela Equação:

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bs}(\lambda) + b_{bph}(\lambda) \quad (16)$$

onde,

- ✓ espalhamento das moléculas d'água (b_{bw});
- ✓ espalhamento sedimentos (b_{bs});
- ✓ espalhamento partículas de fitoplancton (b_{bph})

O retroespalhamento pelas moléculas da água apresenta uma forma de exponencial negativa, muito similar à curva de espalhamento da água pura. O retroespalhamento do material particulado diminui, de maneira mais suave, em função do comprimento de onda. O fitoplâncton apresenta um retroespalhamento maior no azul e diminui à medida que o comprimento de onda aumenta, apresentando uma zona de baixo espalhamento entre os 650 nm e 700 nm. A figura 16 mostra as curvas de retroespalhamento dos componentes citados.

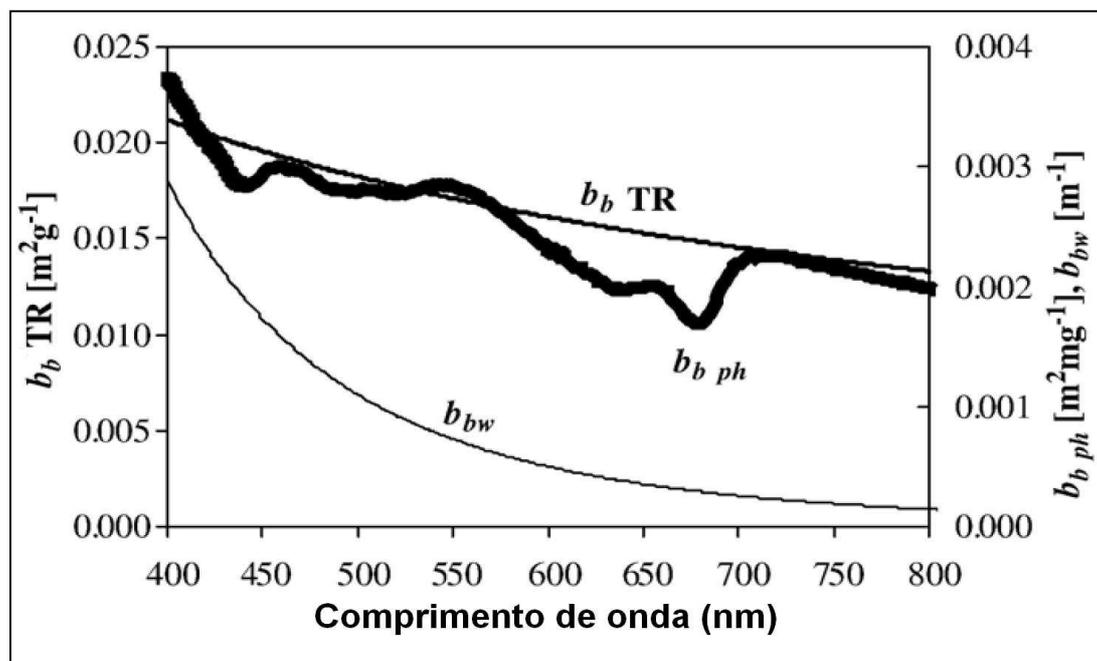


Figura 16 - Variação espectral dos coeficientes de retroespalhamento específicos da água pura (b_{bw}), do fitoplâncton (b_{ph}) e do material particulado não orgânico (b_{TR}). (Adaptado de Giardino 2007).

O retroespalhamento dos sedimentos (b_{bs}) é modelado usando a teoria de Mie a qual foi usada por muitas décadas para águas oceânicas. A partir dessa teoria pode-se concluir que o retroespalhamento depende de três parâmetros: concentração, diâmetro e índice de refração (VILLAR *et al.*, 2012)

3.2.3.2 - Propriedades Ópticas Aparentes

Além das propriedades inerentes, um outro conjunto de propriedades ópticas, que são influenciadas tanto pelas substâncias que compõem o meio aquático quanto pelo campo de luz ambiente (quantidade de luz, inclinação do sol, ângulo de visada e etc.) pode ser definido para corpos d'água. Este novo conjunto é denominado de propriedades ópticas aparentes (BARBOSA, 2005).

Essas propriedades mostram feições regulares e estabilidade suficientes para serem úteis na descrição de um corpo d'água (MOBLEY, 1994).

As POA de um mesmo alvo podem variar rapidamente sem que variem suas POI (características físicas, biológicas, químicas, etc.). Se uma nuvem passa, se o ângulo de visada muda, ou se a superfície da água muda de rugosidade por causa do vento, as POA mudam.

Villar, 2013 ressalta que as propriedades ópticas aparentes ideias deveriam variar apenas ligeiramente com as mudanças ambientais externas, porém deveriam variar suficientemente de um corpo d'água para o outro na caracterização das propriedades ópticas. Note-se que, ao contrário das POI, as POA não podem ser medidas em amostras d'água, uma vez que dependem da distribuição da luz ambiental encontrada no corpo d'água.

As principais propriedades aparentes são: o coeficiente vertical de atenuação da luz (K), a reflectância volumétrica (R^0) e a reflectância estimada a partir do sinal medido pelo sensor remoto R_{RS} .

O coeficiente de atenuação é a taxa de perda de irradiação (E) com relação à profundidade do médio aquático (z). A atenuação pode ser da irradiação descendente (E_d) ou ascendente (E_u). Assim se tem o coeficiente de atenuação vertical descendente (K_d) e o coeficiente de atenuação vertical ascendente (K_u). Estes coeficientes variam em função do comprimento de onda, definindo assim um K para cada comprimento de onda, $K_d(\lambda)$ e $K_u(\lambda)$. A relação é estabelecida por:

$$K_d = \frac{dE_d}{dz} \quad (17)$$

$$K_u = \frac{dE_u}{dz} \quad (18)$$

O K_d é usado em modelos de penetração da luz, por exemplo, para computar a produtividade primária em função da disponibilidade de luz com a profundidade (BARBOSA, 2005).

A reflectância volumétrica R^0 , é um parâmetro chave na ligação entre as propriedades da água e a radiância medida pelo sensor. Em sensoriamento remoto, como já foi visto anteriormente, a reflectância é definida pela razão da radiância pela irradiação para um determinado comprimento de onda, como mostra a equação a seguir:

$$R_{RS} = \frac{L_w(\theta, \Phi, \lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (19)$$

Onde θ e φ são os ângulos polar e azimutal respectivamente, em um sistema de coordenadas e λ é o comprimento de onda. Neste caso, L_w é a radiância espectral da água em direção (θ, φ) , ou seja, é a radiância que mede o sensor em direção ao corpo de água. E_d é a irradiância que atinge a superfície d'água. (VILLAR, 2013)

L_w é obtido por:

$$L_w = \frac{L_u^{0-}(1-\rho_F)}{n_w^2} \quad (20)$$

Onde,

- L_u^{0-} é a radiância emitida por a interface água-ar como explicam Gordon e Morel, 1983;
- ρ_F é a reflectância de Fresnel para a radiância d'água ao ar e
- n_w é o índice de refração da água.

Segundo Villar, 2013, R_{rs} pode ser descrita como uma função da reflectância volumétrica (R^{-0}). A reflectância volumétrica, que por sua vez é definida como a razão E_u^{-0}/E_d^{-0} , onde E_u^{-0} e E_d^{-0} são a irradiância ascendente e descendente a uma profundidade infinitésima (-0).

$$R_{rs} = \frac{(1-\rho)*(1-\rho'_{rs})*R^{-0}}{n^2*(1-r'R^{-0})*Q} \quad (21)$$

Onde,

- R^{-0} é a reflectância volumétrica, ou seja, a reflectância própria do corpo d'água;
- ρ é a reflectância interna de Fresnel. Essa reflectância é função da rugosidade da superfície, do ângulo zenital solar e da cobertura de nuvens
- n é o índice de refração da água ($n = 1,34$)
- r' é a reflexão da água-ar, na ordem de 0,48.
- Q é a razão de E_u^{-0}/L_u^{-0} que para um campo isotrópico ideal seria π , porém em águas claras segundo Morel e Gentili (1993) varia entre 3,5 e 5,6.

3.2.3.3 - Relação entre POIs e Reflectância Volumétrica (POA)

Gordon (1973) relacionou a reflectância volumétrica R^{-0} com as propriedades ópticas inerentes POI. Posteriormente Jerlov (1976) simplificou a relação proposta por Gordon, de acordo com a equação :

$$R^{-0} = f \frac{b_b}{a+b_b} \quad (22)$$

onde, f é um coeficiente que varia com as condições de iluminação e tipos de água, e a e bb são os coeficientes de absorção e retroespalhamento do corpo d'água, respectivamente.

Estudos feitos por Kirk (1991); Kirk (1981); Prieur (1976), definiram o valor do coeficiente f em condições específicas de luz e de tipos d'água. Froidefond e Doxaran (2004), assinalaram que a constante varia entre 0,324 com sol ao zenit e 0,369 para o céu coberto uniformemente. Normalmente se adota um valor de 0,33 (Morel e Prieur, 1977).

Kirk (1991), relacionou o coeficiente de atenuação vertical com as POI para um intervalo de $a/b = 0-20$, como se mostra na equação 21

$$Kd = \sqrt{(a^2 + Gab)} \quad (23)$$

onde G é uma função que especifica a contribuição relativa do espalhamento na atenuação vertical da luz. Usualmente, o valor de G é estimado entre 0,233 e 0,264 (Kirk 1994).

Aas (1987), relacionou as POI com as POA encontrando uma equação que define a absorção a partir da reflectância volumétrica (reflectância irradiância), Kd e os cossenos médios (μ e μ_d).

$$a = Kd * \mu_d \frac{1-R^{(-0)}}{1+R^{(-0)}(\mu_d/\mu)} \quad (24)$$

Esse conjunto de equações permite relacionar as POA que são medidas no campo com as POI que são diretamente relacionadas às propriedades biofísicas das águas.

3.5 - Sistemas Sensores e estudos de ecossistemas aquáticos.

Sistemas de sensoriamento remoto disponíveis atualmente fornecem dados repetitivos e consistentes da superfície terrestre, os quais são de grande utilidade para diversas áreas de aplicação, com destaque para: urbanas, agrícolas, geológicas, ecológicas, florestais, cartográficas, oceanográficas, hidrológicas, limnológicas, dentre outras (NOVO, 2008).

A utilização de recursos de sensoriamento remoto para auxiliar no monitoramento da qualidade das águas superficiais, de mananciais de usos múltiplos, desponta como instrumento de grande interesse. Principalmente no caso de lagos naturais e reservatórios hidrelétricos, que por serem sistemas de transição entre

ambientes aquáticos lênticos e lóticos, apresentam maior tempo de residência das águas e tamanho adequado para utilizar recursos de sensoriamento remoto mais disponíveis (NOVO, 2005).

A demanda por informação contínua, incluindo as questões ambientais, está crescendo constantemente. Somente o registro das condições de um ambiente, durante um espaço de tempo maior, permite calcular ou derivar tendências da sua variabilidade natural, em relação complexa com os diferentes fatores naturais ou humanos que influenciam estas tendências. Essas exigências estão associadas não somente à elevada repetição temporal e espacial, mas, em paralelo, à disponibilidade de satélites e sensores adequados (FICHTELMANN, 2005).

A disponibilidade de bibliografia sobre aplicações de sensoriamento remoto e a quantidade de trabalhos voltados para estudos de sistemas aquáticos em relação àqueles voltados às aplicações terrestres é significativamente inferior.

Porém, é notável o progresso nesta área de aplicação. O avanço tecnológico apresentados em novos sensores, faz com que dados de sensoriamento remoto sejam de grande utilidade no planejamento de estratégias de amostragem dos sistemas aquáticos, integração com modelos de simulação espacial das informações obtidas em campo etc.

Os fenômenos hidrológicos diferenciam-se espacial e temporalmente. Com isso, técnicas convencionais de coleta de dados se esbarram na limitação da representação espacial pois permitem a geração apenas de informações pontuais. Nesse contexto, os dados de sensoriamento remoto orbital podem ser de grande utilidade uma vez que permitem estender informações pontuais para um contexto espacial mais amplo e fornecer subsídios para uma distribuição racional de postos de coleta de dados hidrológicos (SANTOS, 2004; NOVO, 1998)

3.5.1 - Sensor MODIS: características e suas aplicações em estudos sobre sistemas aquáticos

Estudos das dinâmicas ambientais necessitam de uma grande gama de informações, coletadas com alta frequência por um longo período de tempo. O objetivo de estudos dinâmicos é representar a realidade de cada região da superfície terrestre, oceanos e atmosfera. Para tanto, foram desenvolvidos novos instrumentos para a coleta contínua e de alta frequência de dados sobre a superfície terrestre, tendo como exemplo o sensor MODIS (NASA, 2002).

O comitê espacial Norte Americano mantém um programa de longa duração de pesquisas de observação da superfície terrestre, oceanos e atmosfera, e suas interações, incluídas nas medições do Earth Observing System (EOS), financiado pelo programa da NASA Earth Science Enterprises (ESE) (ANDERSON *et al.*, 2003).

O objetivo principal da ESE é determinar como a Terra está mudando, desenvolvendo um entendimento de seu funcionamento como um sistema único e interligado. Estes dados adquiridos em todo o planeta permitem um monitoramento de longa duração da superfície, necessários para o entendimento de mudanças globais (JUSTICE *et al.*, 2002a).

No projeto EOS, estão previstos os lançamentos de diversos satélites, e o primeiro, o satélite TERRA, foi lançado em dezembro de 1999, começando a coletar dados em fevereiro de 2000. Os objetivos propostos para o programa da EOS e contemplados na plataforma Terra incluem estudo de nuvens, aerossóis, balanço de radiação, ciclo do carbono (ANDERSON *et al.*, 2003)

A segunda plataforma, Aqua, foi lançada em 04 de maio de 2002, com seis instrumentos a bordo e tem como principal objetivo auxiliar na coleta de informações sobre o ciclo da água na Terra

O MODIS é o principal sensor desenvolvido para estes satélites e, apresenta, segundo Barker *et al.*(1992) inúmeras características, destacando-se pela ampla cobertura espacial e espectral. Este sistema da continuidade às tomadas de medidas nas regiões espectrais, que já estão sendo estimadas por outros satélites, vindo a complementar informações já adquiridas por estes. É a primeira ferramenta dos satélites EOS na condução das pesquisas de mudanças globais. É capaz de fornecer informações tais como fluxos de energia radioativa, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida de corpos de água etc. (RUDORFF *et al.*, 2007).

As especificações técnicas deste sensor estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Especificações Sensor MODIS

Órbita	705 Km, síncrona com o Sol, polar; 10:30 a.m descendente; 1:30 p.m ascendente.
Alcance Espectral	0.4-14.4 μm
Resolução Espacial	250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas), 1000 m (29 bandas) em nadir
Precisão Radiométrica	5% Absoluto, <3 μm ; 1% Absoluto, >3 μm ; 2% de reflectância
Cobertura de repetição	Diária, a norte da latitude 30° e a cada dois dias, para latitudes inferiores a 30°
Quantização	12 bits

Fonte: ANDERSON *et al.*, 2003

Como pode ser observado na tabela 1, o sensor MODIS possui alta resolução radiométrica (12 bits) em 36 bandas espectrais dentro dos intervalos de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução espacial de 250 m, outras cinco na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1 km. Desses 36 canais espectrais, nove bandas no visível e infravermelho próximo (entre os comprimentos de onda de 412 nm a 869 nm) foram criadas especificamente com uma alta sensibilidade radiométrica e com uma resolução temporal de duas imagens por dia (FRANZ *et al.*, 2007; BARNES *et al.*, 1999).

Os dados dos satélites são processados pelo EOS e pelos sistemas de operações (EDOS) no Goddard Space Flight Center. São divididos em cinco níveis (0 a 4), que irão variar em função do grau de processamento realizado. Todos os produtos MODIS são gerados, como indica Justice *et al.*, 2002, em um determinado nível hierárquico:

- ✓ Nível 0 – este nível retrata a imagem em seu estado bruto, sem tratamento de espécie alguma. Não é disponível ao usuário, não constando, portanto, das listas de produtos padrões do sensor MODIS.
- ✓ Nível 1 (1A): contém uma soma de base de dados de 36 canais do MODIS, utilizados como dados de entrada para geolocalização, calibração e processamento. Indicadores de qualidade são adicionados aos dados para indicar alguma perda ou “pixels” de baixa qualidade. Medidas no visível, infravermelho próximo e médio são feitas apenas durante o dia, enquanto que as medidas na faixa do infravermelho termal são feitas tanto de dia, quanto de noite.
- ✓ Nível 1 (1B): os produtos contém os dados de calibração e geolocalização da abertura de radiância para as 36 bandas geradas pelo nível 1 A. As radiâncias são em $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$. Em adição, o BRDF (reflectância bidirecional) pode ser determinado para bandas reflectivas solares (1-19, 26) através do conhecimento da irradiação solar (por exemplo, determinação de dados MODIS e a geometria de iluminação do alvo). Dados adicionais são fornecidos, incluindo as estimativas de qualidade, de erro e dados de calibração.
- ✓ Nível 2: os produtos deste nível são derivados de radiâncias calibradas de prévios produtos MODIS e são armazenados em um espaço original do sensor. Os produtos conhecidos como nível 2G (L2G) são gerados a partir de um conjunto de dados de um simples dia do nível 2, reorganizados e armazenados

em uma grade baseada na Terra (earth-based grid), preservando todas as amostras dos dados originais do nível 2

- ✓ Nível 3: neste nível os produtos são espacialmente reamostrados e temporariamente compostos para produzir uma simples estimativa das variáveis geofísicas para cada grade de localização. As escalas de tempo dos produtos deste nível variam de um simples dia para um ano inteiro.
- ✓ Nível 4: os produtos deste nível são gerados pela incorporação dos dados MODIS em modelos para se estimar as variáveis geofísicas.

As características dessas bandas permitiram o desenvolvimento inicialmente de 44 produtos MODIS padrão que os pesquisadores de várias disciplinas estão utilizando para estudos de dinâmica global (KAMPEL& LORENZZETTI, 2007).

Para o presente trabalho são utilizados os produtos de refletância da superfície MODIS. O produto de reflectância da superfície terrestre tem sido indicado para estudos dos sistemas aquáticos continentais. Este produto possui nível de processamento 3 podendo ser adquiridos de dois tipos A1 e Q1 de resolução espacial de 500m e de 250m respectivamente, obtendo assim quatro tipos de imagem:

- ✓ MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global MOD09A1 (500 m);
- ✓ MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global MOD09Q1 (250 m);
- ✓ MODIS/Aqua Surface Reflectance 8-Day L3 Global MYD09A1 (500 m);
- ✓ MODIS/Aqua Surface Reflectance 8-Day L3 Global MYD09Q1 (250 m).

Os produtos de 500 metros possuem sete bandas distribuídas na região do visível e infravermelho (0,648 μm ; 0,858 μm ; 0,470 μm ; 0,555 μm ; 1,240 μm ; 1,640 μm ; 2,130 μm). Essas imagens possuem também bandas de qualidade trazendo informações sobre o ângulo zenital de visada, o ângulo zenital do sol, o azimute relativo, a presença de nuvens ou de sombra das nuvens e a presença aerossóis. Quando pertencente ao sensor MODIS Terra chama-se MOD09 e quando pertencente ao sensor MODIS Aqua chama-se MYD09 (RUDORFF et al., 2007).

Este processamento é realizado no produto MODIS nível 1B (L1B) que contém radiâncias calibradas e geolocalizadas geradas a partir dos níveis digitais dos arquivos L1A. Indicadores de qualidade dos dados, estimativas de erros e dados adicionais de calibração também são incluídos no nível 1B.

De acordo com NOVO *et al.*, (2007), a partir do processamento das imagens do produto MYD09, dois tipos de informações podem ser obtidos sobre os sistemas

aquáticos continentais: i) informação espacial sobre os corpos de água e sua alteração temporal em razão das funções de força climáticas, antrópicas e socioeconômicas; ii) informação espectral e radiométrica sobre a superfície e a composição da coluna de água (cor e brilho da água). A cor e o brilho do corpo de água estão relacionados à concentração de COAs na água. A Tabela 2 a seguir mostra as informações que podem ser derivadas do produto MODIS MYD09.

Tabela 2 - Informações possíveis de serem derivadas do produto MYD09

Banda	Largura de Banda (nm)	Aplicações em sistemas aquáticos continentais do produto MOD09	Resolução Espacial
1	620-670	Sensível a variações na concentração de partículas inorgânica em suspensão	250 m
2	841-876	Permite delimitar a superfície de água livre dos lagos e auxilia mapear o limite entre água e vegetação	250 m
3	459-479	Sensível à presença de matéria orgânica dissolvida na água	500 m
4	545-565	Sensível ao espalhamento pelas células fitoplanctônicas	500 m

Fonte: ANDERSON *et al.*, 2003.

3.5.2 - Radiometria *in situ* e Sensoriamento Remoto para ambientes aquáticos

Apesar das dificuldades apontadas anteriormente, diversas pesquisas têm demonstrado que imagens da região óptica do espectro eletromagnético são fontes eficientes de informação para traçar o caminho da água e para determinar a região de influência de águas fluviais em ecossistemas alagáveis em relação à da água de origem local (MERTES *et al.*, 1995).

Estudos conduzidos por vários pesquisadores (MOREL e PRIEUR, 1977; KIRK, 1994; CURRAN e NOVO, 1988; NOVO *et al.* 1989a; QUIBELL, 1991; DEKKER, 1993, MARTINEZ, 2009;), realizados com base em dados obtidos em laboratório e em coletas de campo, analisaram os efeitos de diferentes concentrações de sedimentos e de clorofila na resposta espectral de corpos d'água. A decomposição de dados espectrais através da aplicação de modelos hidro-ópticos (MOREL e GORDON, 1980; DEKKER, 1993), e técnicas como análise derivativa e razão de bandas (DEMETRIADES-SHAH *et al.*, 1990; RUNDQUIST ET AL., 1996; CHEN *et al.*,1992; GOODIN *et al.*,1993;) permitiram estimar a concentração dos constituintes opticamente ativos presentes na água.

O Uso de radiometria de campo para o entendimento das propriedades ópticas das águas continentais vem ganhando destaque nas pesquisas nacionais, principalmente

o caso de estudo de lagos e grandes reservatórios hidrelétricos. Esse impulso para essa área de pesquisa está diretamente relacionado com a característica ambiental desses ecossistemas. Reservatórios podem ser considerados como um indicador ambiental da bacia na qual ele se insere, pois todos os processos que ocorrem na bacia acabam de certa forma atingindo o reservatório.

Portanto a aplicação de técnica que integram imagens de sensores orbitais com dados de campo é altamente viável pois proporciona uma visão sinótica de fenômenos que ocorrem na superfície do reservatório e na extensão da bacia hidrográfica (ATKINSON, 1991; LIU *et al.*, 2003; BARBOSA, 2005; ALCÂNTARA, 2006; NOVO *et al.*, 2006)

MARTINEZ *et al.*, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2011; FERREIRA & PEREIRA FILHO, 2009) demonstram a viabilidade do uso integrado de medições de radiometria *in situ* com imagens orbitais (MODIS, MERIS, Landsat) para mapeamento de variáveis limnológicas, sólidos em suspensão, condições de eutrofização em reservatórios, entre outros. Resultados apresentados evidenciam a viabilidade dos estudos para essas possibilidades de aplicação, além de mostrar grande potencial no subsídio à definição de planos de amostragem de coleta de dados para qualidade de água e de aumentar a espacialização de amostras para modelos de integração/simulação em ambientes SIG.

Diversas metodologias de levantamento são utilizadas com radiômetros como por exemplo o espectrorradiômetro FieldSpec® HandHeld, com faixa espectral de operação entre 325 e 1075nm, altamente indicado para estudos de ambientes aquáticos.

Em virtude de ser um equipamento portátil de uso manual ou com tripé de fácil manuseio, além de permitir coletar espectros em campo muito rapidamente, de tal forma a minimizar algum erro associado com mudanças nas condições ambientais.

Pesquisas lideradas por Martinez, no projeto de monitoramento da bacia Amazônica (ORE-HYBAM), tem mostrado a viabilidade de levantamentos de dados de qualidade com radiômetros da marca TRIOS. Esse equipamento tem a vantagem de ser constituído de três sensores que fazem leitura simultânea dos componentes radiométricos da interação entre radiação e superfície d'água, permitindo obter curvas de reflectância com uma frequência de amostragem de até 5 segundos, em um processo bastante automatizado e com controle geométrico dos ângulos de medição.

Capítulo IV - Materiais e Métodos

Para atender aos objetivos propostos por esta pesquisa e obter respostas sobre a hipótese formulada, a metodologia de trabalho definida foi baseada no fluxograma da figura 17.

O objetivo dessa tese é estudar a dinâmica espaço-temporal de entrada de sedimentos e suas características de depósito ao longo do reservatório em estudo com auxílio de imagens de satélite. Para isso, é necessário compreender como os sedimentos se comportam no reservatório e como afetam a resposta espectral das águas.

A priori, foi analisado se a variação de reflectância medida pelo satélite está relacionada à concentração de sedimentos ou se está influenciada de maneira significativa por outros parâmetros opticamente ativos.

As estimativas de concentração do material em suspensão a partir dos dados de satélite permitiram analisar o processo de aporte e dispersão dos sedimentos ao longo do reservatório, espacial e temporalmente, de maneira automatizada.

Portanto, os levantamentos de campo dessa pesquisa tiveram o objetivo de amostrar dados de sedimento em suspensão e adquirir os parâmetros referentes às propriedades ópticas das águas, por meio de espectrorradiometria de campo. Esses parâmetros levantados em campo foram então correlacionados com os resultados dos processamento da série histórica dos produtos de reflectância do sensor MODIS. O fluxograma da figura 17 pode ser dividido em duas grandes etapas:

- I. A primeira etapa do fluxograma abrange os dados de sensoriamento remoto utilizados e o levantamento de campo.
 - a) caracterização do material suspenso na água, detalhada no item 4.1.1;
 - b) levantamento em campo de parâmetros das propriedades ópticas das águas do reservatório (item 4.1.2);
 - c) Processamento da série histórica dos dados de reflectância do sensor MODIS usando o algoritmo MOD3R (*MODIS River Reflectance Retrieval*), explicada no item 4.2.

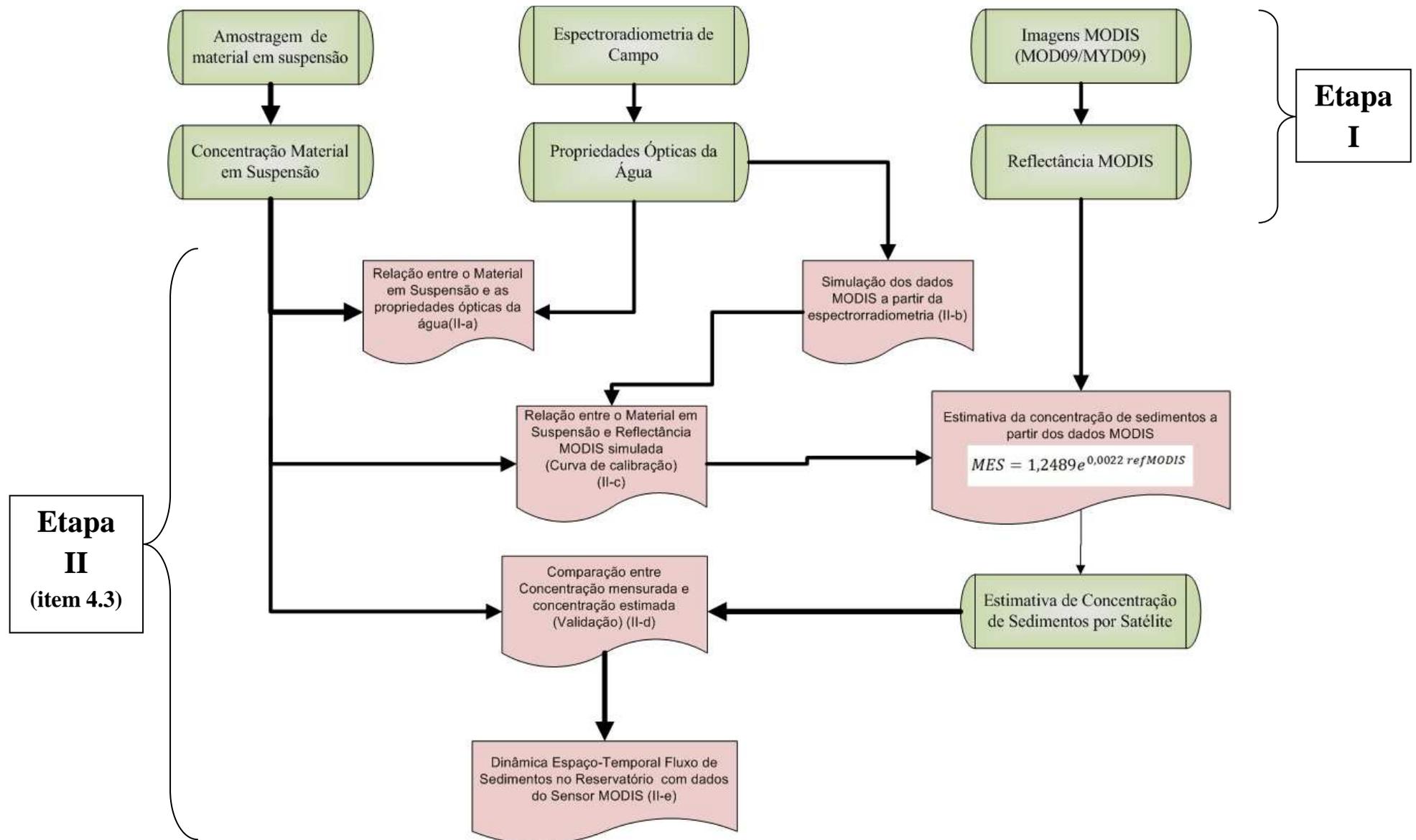


Figura 17 - Fluxograma de metodologia de trabalho

- II. A segunda etapa do fluxograma detalha a proposta para o estudo espaço-temporal dos fluxos de sedimentos a partir das propriedades ópticas e dos dados de satélite. A partir do conhecimento das propriedades ópticas das águas e dos valores de reflectância da água medidos pelo satélite é possível estimar a concentração do material em suspensão a partir dos dados MODIS. Para tanto é proposta uma integração de dados na segunda parte do fluxograma, explicada no item 4.3.

4.1 - Levantamentos de Campo

Os dados levantados em campo foram divididos em dois grupos: coleta do material em suspensão e aquisição das propriedades ópticas da água por meio de espectrorradiometria de campo

4.1.1 - Material em Suspensão.

A coleta de sedimentos em suspensão objetivou auxiliar no entendimento da pluma de dispersão do sedimento e estabelecer a correlação entre reflectância e concentração de sedimentos em suspensão no reservatório.

As amostras foram coletadas em um perfil longitudinal que vai do ponto mais próximo à entrada do rio até os locais de baixa concentração dentro do reservatório. O ponto mais próximo do rio foi definido em função das condições seguras de navegação.

Os perfis longitudinais foram coletados em três regiões do reservatório onde deságuam as bacias do Rio Indaiá, do Rio Paraopeba e do Rio São Francisco.

Cabe ressaltar que em todas as campanhas de campo foram também realizadas amostragem de material em superfície e de espectrorradiometria de campo nas estações que monitoram os tributários dos três braços estudados no reservatório. O interesse em amostrar na estação é que quanto maior for a variação nos valores de concentração e de reflectância medidos, melhor será a curva que define a correlação entres estes dados, além de poder fazer uma relação entre a concentração medida na estação e no reservatório. A figura 18 mostra a localização das estações de monitoramento da CEMIG nos tributários do reservatório de Três Marias - MG.

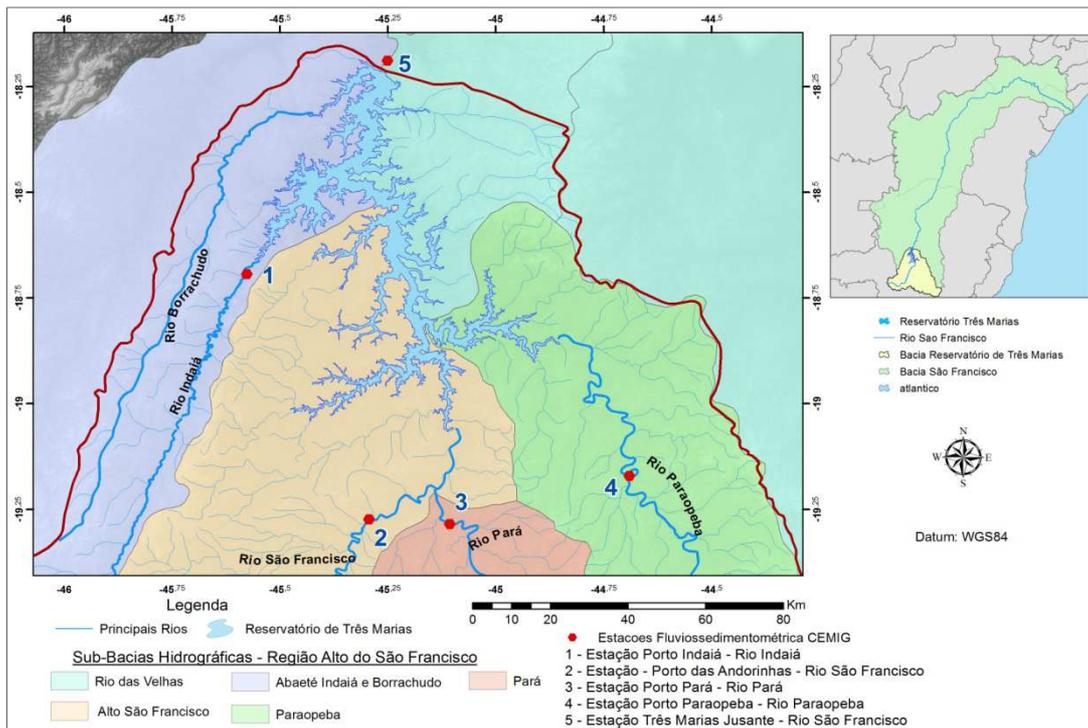


Figura 18 - Estações fluviossedimentométricas (CEMIG) nos tributários do Reservatório.

A primeira campanha foi feita em março de 2012, no braço do Indaiá. Nessa campanha foram amostrados 25 pontos. As amostras foram coletadas em duas profundidades por ponto: superfície e dois metros. A figura 19 mostra o perfil coletado no braço do Indaiá, na campanha de 2012.

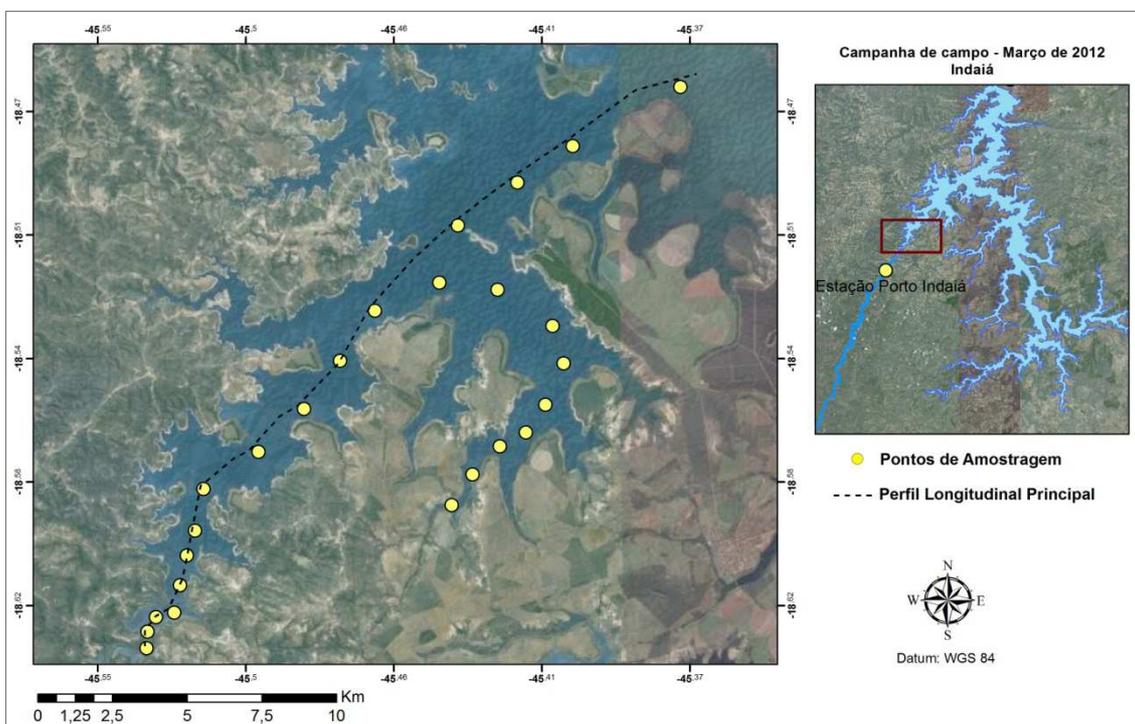


Figura 19 - Pontos de amostragem no braço do Indaiá - campanha março/2012.

A segunda campanha de amostragem no braço do Indaiá foi realizada em janeiro de 2013 (figura 20). Devido às condições de precipitação atípicas no período de dezembro e janeiro de 2013, a navegação se limitou a uma área menos abrangente. O reservatório estava com 41% do volume útil segundo dados da ONS, 2012.

Cabe ressaltar que o perfil levantado em janeiro de 2013 (figura 20) foi readaptado em função da interpretação dos dados (espectrorradiometria e material em suspensão) da campanha de março de 2012.

A primeira adaptação foi definir um espaçamento mais estreito entres os pontos para coletar uma maior variação dos altos valores de concentração e assim tentar melhorar a curva de calibração da primeira campanha. A segunda adaptação foi com relação à coleta do perfil vertical das amostras. Em função da interpretação dos valores de coeficiente de atenuação vertical (K_d) foi definido ampliar a profundidade do perfil: superfície, dois metros e quatro metros de profundidade. Além disso o perfil coletado no braço que deságua no perfil longitudinal principal do Indaiá foi desconsiderado, devido a sua baixa contribuição de material em suspensão.

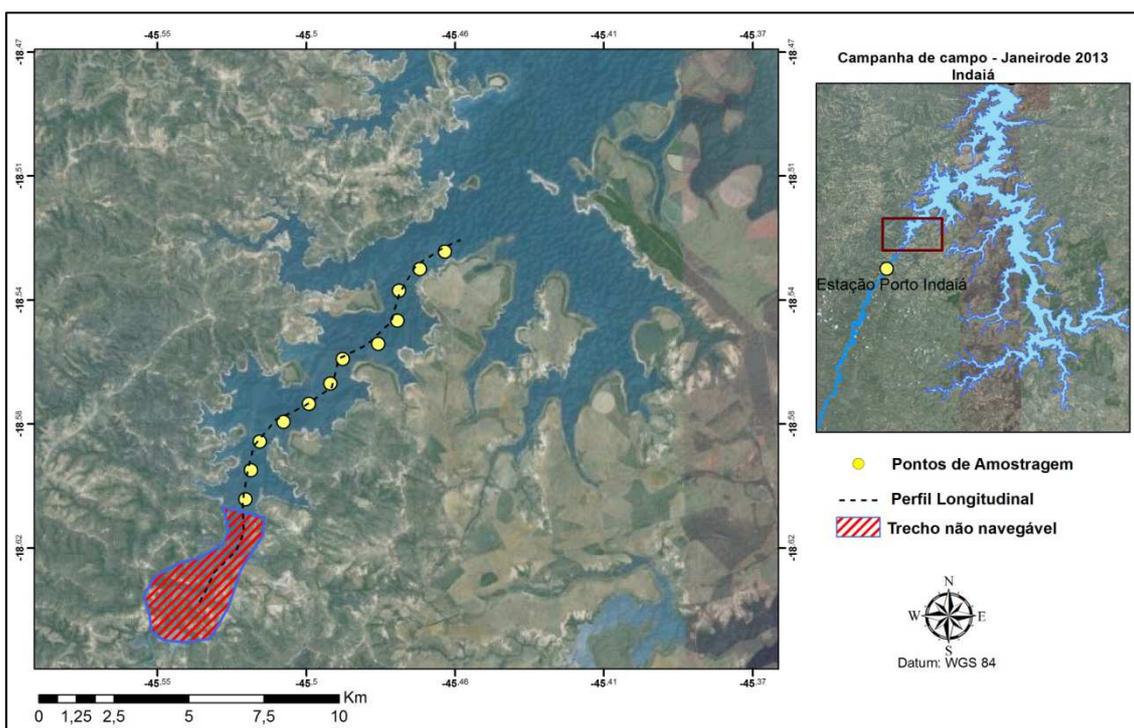


Figura 20 - Pontos de amostragem no braço do Indaiá. campanha Janeiro/2013.

Em março de 2013 foi realizada a terceira campanha, dessa vez nos braços do São Francisco e Paraopeba (figuras 21 e 22 respectivamente), sempre incluindo amostragem nas estações. Novamente foram coletadas amostras em três profundidades, superfície, dois metros e quatro metros.

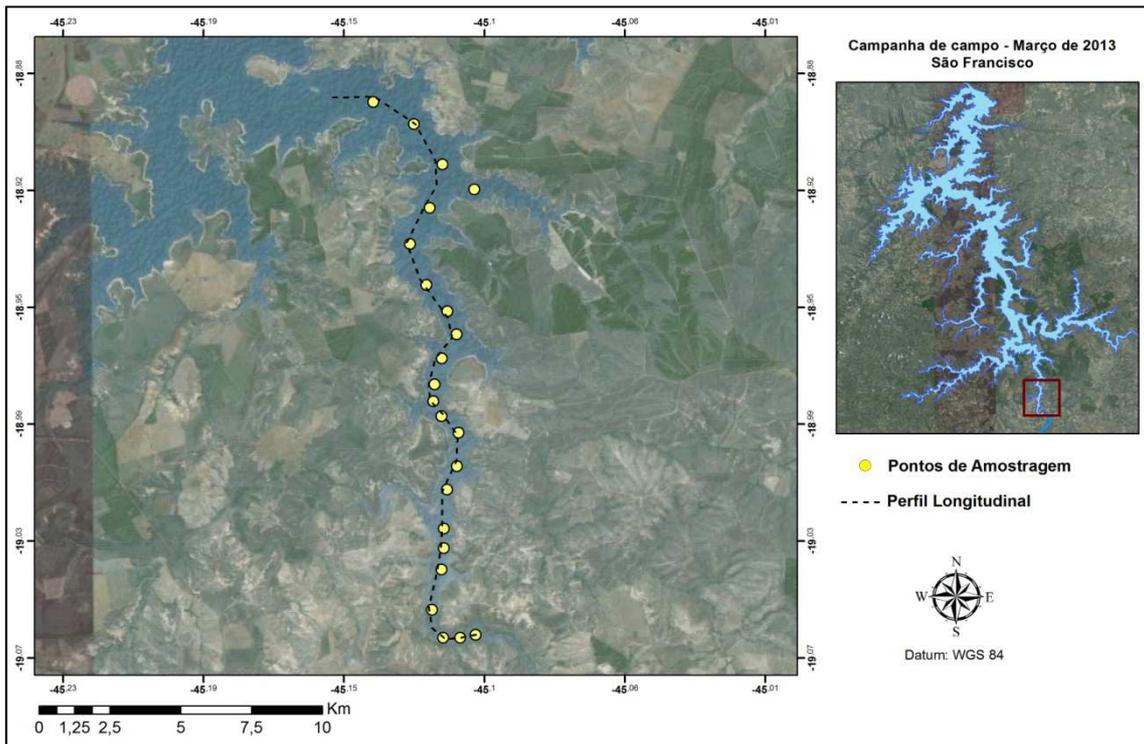


Figura 21 - Pontos de amostragem no braço do São Francisco - campanha Março/2013.

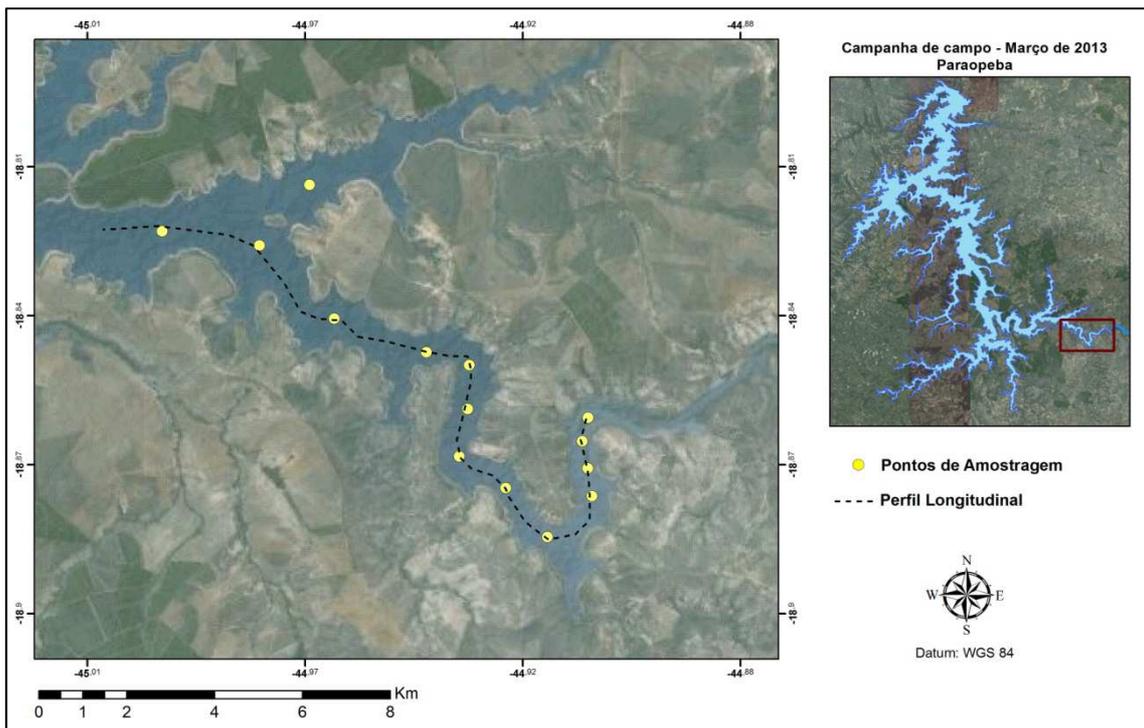


Figura 22 - Pontos de amostragem no braço do Paraopeba - campanha Março/2013

Em todas as amostras foram feitas análises de concentração, em ambas profundidades. As análises de granulometria e de mineralogia foram feitas em pontos específicos de interesse para a pesquisa, que serão mostrados posteriormente.

Para as determinações de concentração das amostras coletadas no reservatório foram utilizadas membranas de malha 0,45 μ m e filtradores de 250ml, ambos da marca Milipore®, ligados a um sistema de bomba de vácuo, o que permitiu a filtragem de até 3 amostras simultaneamente .

Inicialmente, as membranas foram aquecidas a uma temperatura de 100°C durante 15 min, e posteriormente resfriadas em dissecadores. Ao atingirem a temperatura ambiente, as membranas foram pesadas para a determinação dos pesos iniciais (Pi). Em seguida, foram determinados os volumes das amostras (vol), com a utilização de provetas graduadas, e realizada a filtragem das mesmas, observando sempre para não deixar sedimento nem na garrafa da amostra nem na proveta. Após a filtragem as membranas foram novamente aquecidas a 105°C, desta vez por 1h, resfriadas a temperatura ambiente e pesadas para determinação do peso final (Pf).

A concentração foi obtida utilizando-se unidades de miligramas (mg) para os pesos iniciais e finais e Litros (L) para o volume. O resultados obtidos descrevem a razão entre a massa de sedimento e o volume da mistura água-sedimento.

4.1.2 - Radiometria de Campo

A radiometria de campo foi adquirida com conjunto de espectrorradiômetros TriOS – RAMSES que trabalham na faixa espectral do ultra violeta, visível e o infravermelho próximo (320-950 nm). Esse conjunto é formado por dois sensores de radiância (figura 23a) e um sensor de irradiância (figura 23b), que podem trabalhar na aquisição de dados de maneira simultânea.

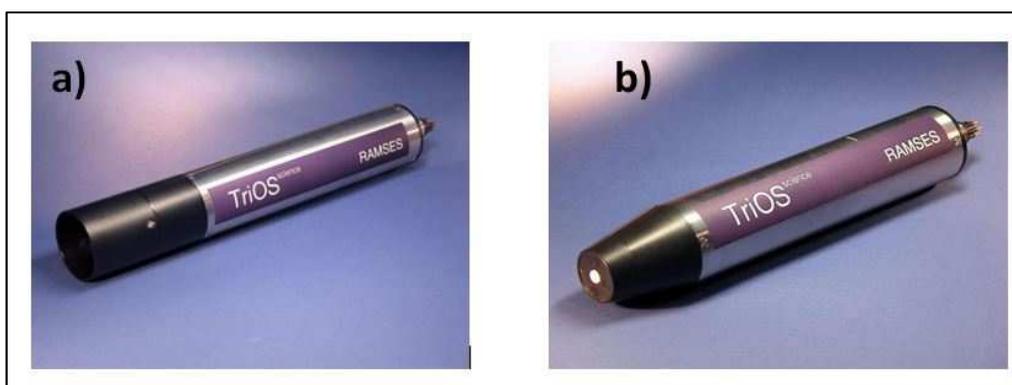


Figura 23 - Espectrorradiômetros TriOS: a) RAMSES-ARC: medição da energia radiante refletida e b) RAMSES-ACC-VIS: medição da energia incidente

A tabela 03 mostra as especificações dos radiômetros.

Tabela 3 - Especificações Trios - RAMSES

Intervalo Espectral	320 - 950 nm
Tipo de detector	Um arranjo de 256 fotodiodos de silício
Amostragem espectral	3,3nm/pixel
Acurácia espectral	0,3nm
Canais utilizáveis	190
FOV	7°

Fonte: adaptado de www.trios.de

Os principais componentes radiométricos mensurados em campo com o uso desses equipamentos são: reflectância de sensoriamento remoto, coeficientes verticais de atenuação da luz (K_d e K_u) e Reflectância Volumétrica (R^{-0}).

4.1.2.1 - Medição de Reflectância de Sensoriamento Remoto (R_{rs})

A quantidade de energia eletromagnética que chega à superfície d'água (E_d) é medida pelo sensor de irradiância. Como já foi discutido anteriormente, parte da energia incidente é refletida pela superfície do corpo d'água e parte atravessa a interface ar/água interage com a água e seus constituintes opticamente ativos podendo ser absorvida ou espalhada.

As medições de reflectância são realizadas com os aparelhos fora da água, com uma configuração geométrica específica (figura 24).

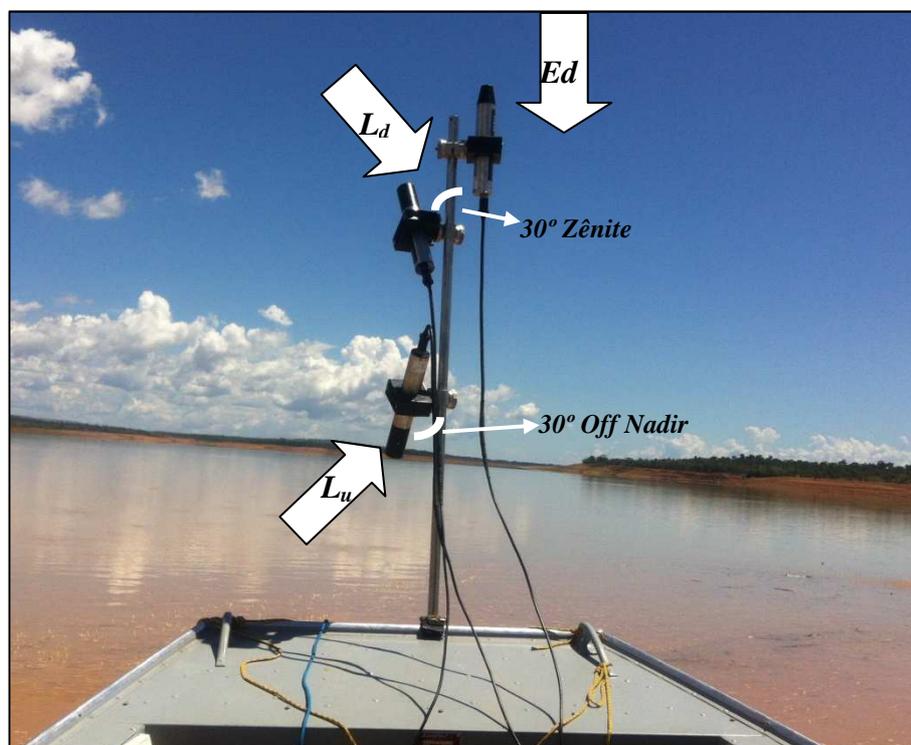


Figura 24 - Medição de Reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs})

O sensor a 30° off nadir amostra a radiância da água diretamente (L_u), mas dependendo do tamanho das ondas ele também mede uma pequena porção do

espalhamento atmosférico que é refletido pela água. O sensor a 30° com o zênite mede a radiância proveniente do espalhamento atmosférico que seria refletida pela água (L_d). O sensor colocado verticalmente mede a irradiância que chega sobre o local (E_d).

Os valores dos ângulos da geometria de aquisição foram definidos após testes de medição da sensibilidade das medições às variações da geometria de aquisição realizados por Martinez, J. M., em campanhas de monitoramento na bacia amazônica. Estes testes se basearam inicialmente na geometria proposta por Mobley, 1999.

Para o cálculo da reflectância, aplica-se a seguinte equação:

$$Rrs = \frac{Lu - f * Ld}{Ed} \quad (25)$$

Onde f é um fator que varia em função do tamanho das ondas na superfície da água. Geralmente é adota-se o valor 0,028 como sugere Mobley, (1999).

A energia retroespalhada pelo corpo d'água volta para a superfície da água e uma fração dela emerge. Essa energia emergente é a radiância da água (L_w). Porém, um sensor localizado acima da água registra a energia Lu que constitui a somatória de L_w mais uma fração da energia que provém do espalhamento atmosférico L_d (refletida na superfície da água na direção do sensor)

Com a finalidade de diminuir o problema da luz refletida pela superfície da água ($\rho * L_d$), as medições de reflectância são realizadas com três aparelhos (dois medidores de radiância e um sensor de irradiância (E_d), colocados fora da água (figura 25).

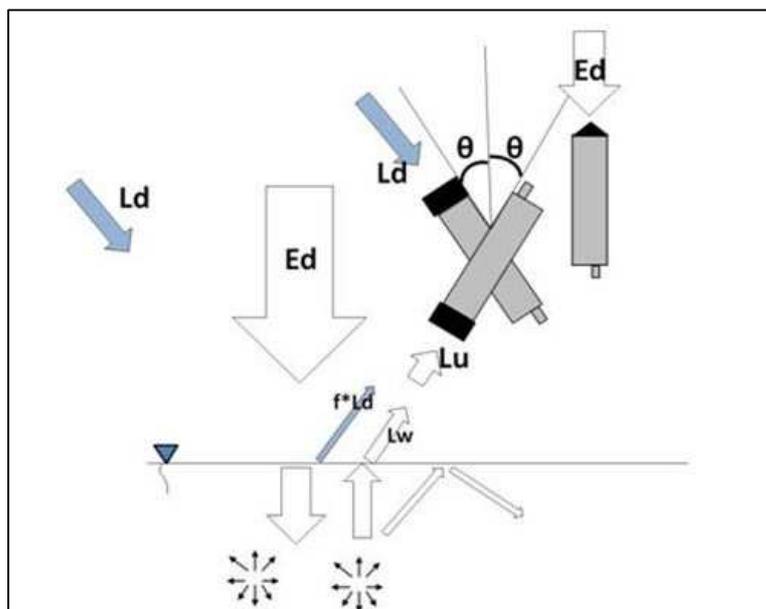


Figura 25 - Esquema da medição da reflectância Rrs e da interação da luz com a superfície da coluna d'água. Irradiância (E_d), Radiância do céu (L_d) e radiância da água (L_d). $\theta=30^\circ$. Fonte: VILLAR, 2013.

4.1.2.2 - Medição de Coeficiente de Atenuação Vertical (Kd e Ku)

Para as medições do coeficiente de atenuação vertical da luz é usado o sensor de irradiância submerso na água. Este aparelho possui um sensor de pressão que permite obter a profundidade de cada medição, de maneira indireta. Nas medições de Kd é utilizado o sensor de irradiância voltado para cima, detectando a irradiação descendente (Ed), figura 26.

Para as medições de Ku, o sensor de irradiância é posicionado voltado para baixo, medindo assim a irradiação ascendente (Eu). Esses dados foram levantados apenas nas campanhas de março de 2013, pois nas campanhas anteriores os levantamentos foram feitos apenas com um conjunto de espectrorradiômetros, ou seja, apenas um sensor de irradiância disponível para as amostragens.

Para essas medições o aparelho é colocado adquirindo amostras de irradiância em diferentes profundidades até que os valores medidos fiquem perto de 1% do valor dos medidos na superfície.



Figura 26 - Medição simultânea do Kd e sonda multiparâmetro de qualidade de água (turbidez)

Os valores de Kd e Ku são calculados segundo as equações 26 e 27, respectivamente, proposta por Jerlov, 1976.

$$Kd(\lambda) = \frac{1}{Z_1 - Z_2} * Ln \frac{Ed(\lambda) Z_1}{Ed(\lambda) Z_2} \quad (26)$$

$$Ku(\lambda) = \frac{1}{Z_1 - Z_2} * Ln \frac{Eu(\lambda) Z_1}{Eu(\lambda) Z_2} \quad (27)$$

onde,

- ✓ Ed é a irradiância descendente;
- ✓ Eu é a irradiância ascendente;
- ✓ Z é a profundidade.

As medidas de radiometria de campo foram feitas no reservatório, nos mesmos pontos da coleta de amostras de sedimentos e nas estações que monitoram os sedimentos nos rios (figura 27).

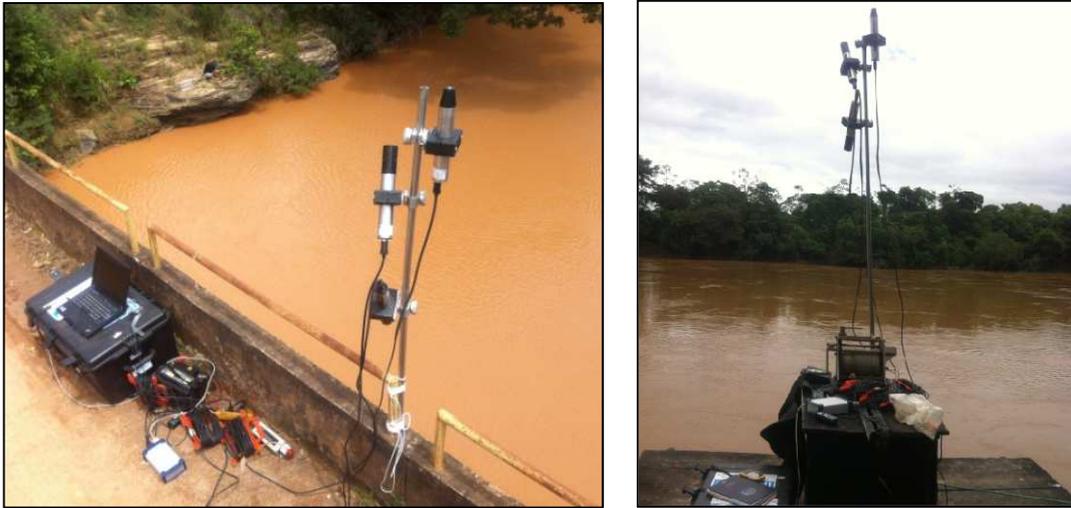


Figura 27 - Medições de Reflectância nas estações - Indaiá e São Francisco.

4.1.2.3 - Medição da reflectância volumétrica

As medidas de reflectância volumétrica são feitas na sub-superfície da água, como já comentado anteriormente. Para realizar essas medições é necessário utilizar dois sensores de irradiância, como ilustra a foto da figura 26. O sensor que está voltado para baixo mede a irradiância descendente (E_d), enquanto que o sensor voltado para cima vai medir a irradiância ascendente (E_u), em uma determinada profundidade. A única diferença do método de aquisição da reflectância volumétrica para os coeficientes de atenuação vertical da luz é que as medidas de R^{-0} são coletadas em uma profundidade fixa, ao contrário das medições de K_d e K_u que são feitas em um perfil vertical.

Esses dados foram coletados apenas na campanha de março de 2013 (braço do Paraopeba e São Francisco) devido a disponibilidade dos dois sensores de irradiância.

Os valores de reflectância volumétrica são calculados de acordo com a equação 28:

$$R^{-0} = \frac{Eu^{-0}}{Ed^{-0}} \quad (28)$$

onde,

- ✓ R^{-0} é a reflectância volumétrica (reflectância irradiância) em uma dada profundidade;
- ✓ Eu^{-0} é a irradiância ascendente em uma determinada profundidade;
- ✓ Ed^{-0} é a irradiância descendente em uma determinada profundidade.

4.2 - Processamento das Imagens MODIS

Nesse estudo foram analisadas as imagens do sensor MODIS, produtos de reflectância da superfície (Nível 3) MOD09 e MYD09 dos tipos A1 e Q1 descritas no capítulo 3. Cada pixel MOD09 ou MYD09 contém a melhor observação diária para intervalo de 8 dias, selecionado com base no critério da qualidade de observação (ângulo de visada baixo, ausência de nuvens ou sombras de nuvens, e presença fraca de aerossóis).

Os objetivos propostos para o trabalho e as premissas teóricas para estudo de comportamento espectral das águas determinam que o processamento deve ser baseado em análises de pixel puro de água. Essa questão encontra dificuldades quando se utiliza dados com resolução espacial como a do MODIS (250m e 500m). Quando a resolução espacial é baixa é muito provável que mais de um alvo seja representado no mesmo pixel, ou seja, a informação espectral contida naquele pixel é função da resposta misturada de todos os alvos presentes na área registrada por ele.

Portanto, o que se pretende é definir regiões na imagem onde não ocorra a mistura espectral dentro um único pixel, ou seja, garantir que os dados a serem analisados em termos de reflectância representem apenas o alvo de interesse, a água.

As técnicas de classificação mais utilizadas baseiam-se nos procedimentos estatísticos de análise de grupos, não supervisionada, e na análise de discriminante. Nesses métodos um determinado pixel é classificado como pertencente a uma única classe. No entanto, um pixel geralmente é composto por vários tipos de materiais e a inclusão dele em apenas um tipo de classe pode incorrer em erros (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2003).

O modelo linear de mistura espectral assume que o espectro total de um pixel é uma combinação linear dos espectros “puros” dos materiais, ponderado em função da sua abundância na superfície do pixel. É necessário recorrer a uma análise sub-pixel. O objetivo da análise sub-pixel é determinar as dimensões da mistura espectral, ou seja, número de *endmembers*.

Adams *et al.*, (1995) e Roberts *et al.*, (1998) indicaram que o espectro medido pelo sensor é uma combinação linear do espectro de todos os materiais no mesmo pixel.

O modelo matemático pode ser expressado por:

$$R_b = \sum_{i=1}^n F_i R_{i,b} + \varepsilon_b \quad (29)$$

onde,

- ✓ R_b é o valor ou número digital da banda b do pixel que é examinado;
- ✓ F_i é a fração do endmember i ;
- ✓ $R_{i,b}$ é a reflectância do endmember i na banda b e;
- ✓ eb é o erro residual do modelo com a banda b .

Baseado nesta equação, cada pixel pode ser examinado para determinar a fração de cada endmember no pixel, e a qualidade do processo pode ser avaliado usando o erro médio quadrático (RMS).

De acordo com Roberts *et al.* (1998), o modelo linear é de fácil implementação e entendimento, não tem limitação em relação ao número de bandas ou de alvos misturados no pixel. Porém, não é eficiente quando alvos apresentam reflectâncias parecidas.

Cabe ressaltar que, segundo Villar, 2013, a delimitação precisa na representação dos canais vermelho e infravermelho, sugere que os espectros de reflectância da imagem MODIS poderiam ser melhor representados por dois endmembers: água e vegetação. O *endmember* da vegetação é precisamente discriminado do *endmember* da água devido à sua alta reflectância no infravermelho e baixa no vermelho, ao contrário do que acontece com o endmember da água, alto no vermelho e baixo no infravermelho.

Ao selecionar endmembers diretamente de uma imagem deve-se garantir que os pixels são de fato "puros" e não misturados, o que pode ser difícil quando os pixels são extensos. Outro fator a considerar é que, se a imagem contém muitos endmembers e que alguns não são identificados, haverá erros nos valores das frações (Roberts *et al.*, 1998).

No estudo de corpos d'água, a mistura espectral em um pixel pode variar temporalmente nas imagens adquiridas. Entre outros fatores pode ocorrer como consequência das variações sazonais no nível de água do reservatório, podendo assim surgir bancos de areia ou vegetação presente no fundo do reservatório e próximo as margens. Existe também a relação de vizinhança entre a superfície d'água e a margem com seus alvos terrestres.

Segundo Villar, 2013, a mistura espectral em rios e reservatórios pode variar temporalmente por três fatores:

- A hidrologia dos rios e reservatórios: em função da variação do nível d'água, pode ocorrer variação da largura do rio e da posição das margens do reservatório, além do surgimento de alguns bancos de areia;
- A geometria de aquisição: a resolução espacial do sensor pode ser degradada dependendo do ângulo de visada zenital;
- A atmosfera: presença de alguns resíduos atmosféricos mal corrigidos (borda de nuvens, aerossóis).

A simples definição de uma máscara de processamento não garante a identificação de pixel puro em processamentos de dados de série históricas para reservatórios, devido as característica de sazonalidades discutidas. Em outras palavras, é impossível identificar pixels puros d'água a priori. Conseqüentemente, é necessário elaborar um procedimento específico para determinar os endmembers d'água.

Diante desse fato, a série histórica dos dados de reflectância do sensor MODIS foi processada utilizando o algoritmo "*MODIS River Reflectance Retrieval*" (MOD3R) desenvolvido pelo IRD da França (*Institut de recherche pour le développement*). A qualidade dessa rotina de processamento já foi comprovada para estudos na bacia amazônica (MARTINEZ *et al.*, submetido).

A metodologia para a extração da reflectância do endmember d'água usando o MOD3R é apresentada no fluxograma da figura 28.

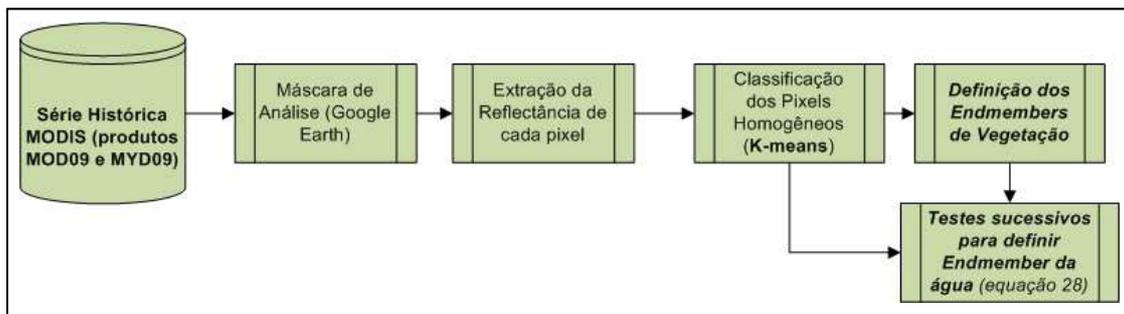


Figura 28 - Fluxograma de processamento MOD3R

Os dados de entrada são as imagens que compõem a série histórica a ser analisada. A primeira etapa é a definição da zona de interesse para processar as imagens, para tanto, são definidas máscaras de análises que podem ser delimitadas usando as ferramentas do Google Earth e importadas na rotina de processamento do MOD3R.

Para analisar a variação da concentração de sedimentos ao longo das regiões de estudo no reservatório foram definidas mais de uma máscara de análise por região do

reservatório a fim de individualizar variações de reflectância por trechos, buscando assim analisar o depósito dos sólidos em suspensão por meio da relação com as variações dos valores de reflectância dos pixels de água.

A figura 29 mostra as máscaras de processamento definidas nas regiões onde deságuam os principais tributários do reservatório de Três Marias - MG. Só serão processados os pixels que se encontram dentro dos limites determinados pelas máscaras.

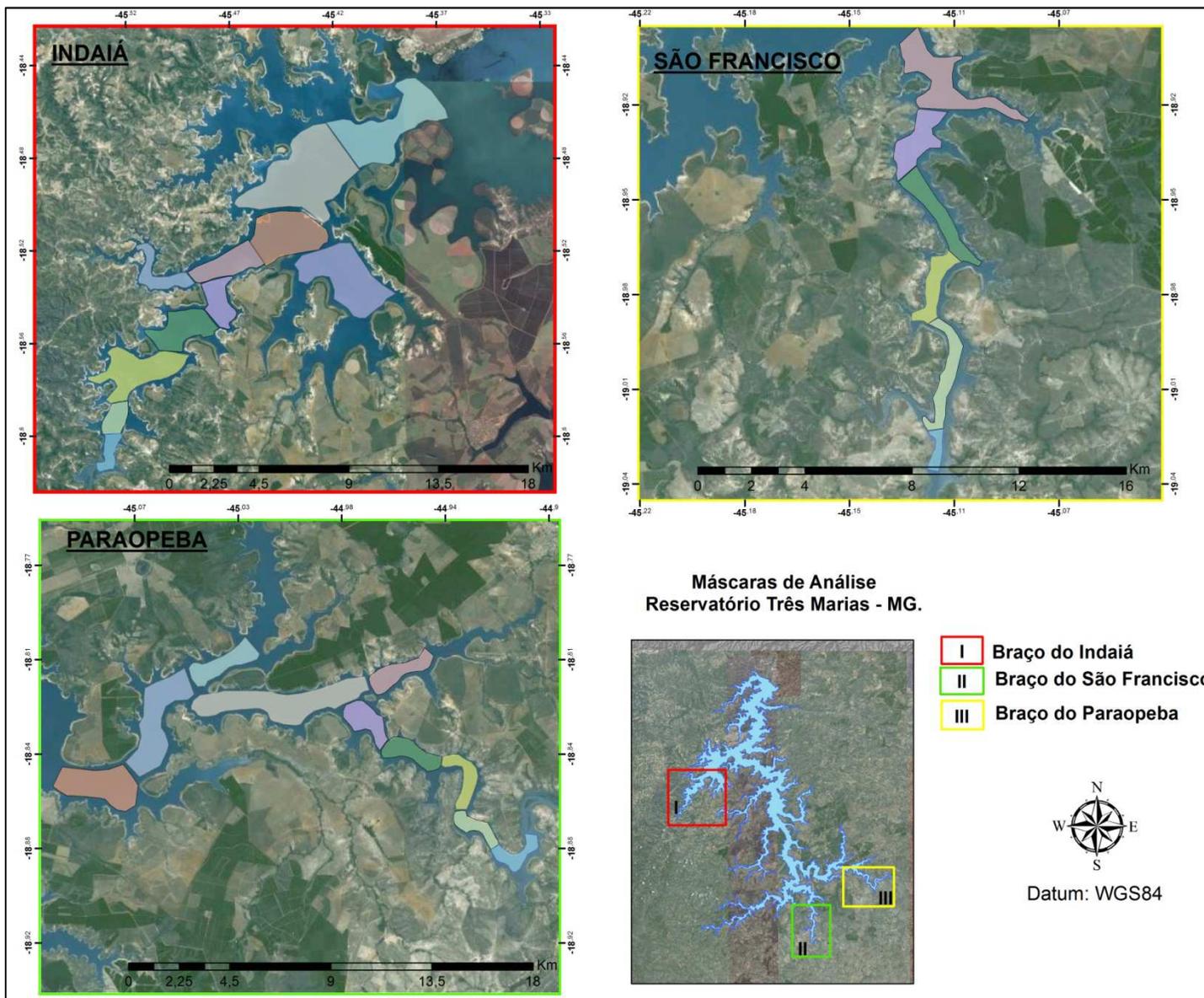


Figura 29 - Máscaras de Análise das imagens MODIS.

O próximo passo é a extração dos pixels da máscara separando os de melhor qualidade. Para isso é utilizado as imagens da banda de qualidade do produto de 500 metros.

Posteriormente é feita a extração da reflectância dos pixels localizados no interior das máscaras predefinidas. Os valores de reflectância dos pixels são classificados em grupos homogêneos mediante a metodologia estatística de K-means.

O algoritmo K-means é um método de classificação não supervisionado com o objetivo de minimizar a variabilidade interna do agrupamento. Basicamente, este algoritmo busca formar grupos que são representados por K centróides, cada um identificado pelo valor médio dos pixels que pertencem a esse grupo. Um número de grupos inicial é selecionado para a classificação, que consiste nos seguintes passos.

1. Primeiro são estimados os K1 valores dos primeiros grupos; estes K1 valores são as médias dos primeiros grupos formados pelos objetos.
2. Calcula-se as distâncias dos objetos para cada um dos centróides dos grupos. Os objetos são atribuídos aos grupos cuja distância é mínima em relação a todos os centróides.
3. Os centróides são atualizados conforme o valor médio de todos os objetos atribuídos a esse grupo.
4. Repetem-se os passo 2 e 3 até a satisfação de um determinado critério de convergência.

No final do processo temos K grupos G_i com $1 \leq i \leq K$. Uma vez definidos os grupos é selecionado aquele que represente melhor o *endmember* de água $Ref_{\lambda, \text{água}}$.

Para isso, nas imagens MODIS estima-se o *endmember* da vegetação diretamente por meio da diferença máxima entre os valores de reflectância nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho. Por fim, cada grupo é testado como *endmember* da água (equação 30), e o grupo que produz o menor erro residual é selecionado, solucionando o modelo linear de mistura espectral.

Para selecionar o grupo adequado se procede de acordo com a equação 28 para cada banda radiométrica e para cada grupo resultado da segmentação i com $1 \leq i \leq K$.

$$Ref_{j,\lambda} = \alpha_j * Ref_{\lambda, \text{água}} + \beta_j * Ref_{\lambda, \text{vegetação}} + \epsilon_j \quad (30)$$

Onde:

- ✓ α_j : é a fração do *endmember* d'água no grupo j .
- ✓ β_j : é a fração do *endmember* de vegetação no grupo j .

- ✓ $Ref_{\lambda,vegetação}$: é a reflectância do *endmember* de vegetação na banda λ .
- ✓ $Ref_{\lambda,água}$ é a reflectância do *endmember* de Água na banda λ a ser testada nos grupos segmentados : $Ref_{água} \in \{ G1, G2 , \dots Gj, \dots GK \}$.
- ✓ $Ref_{j,\lambda}$: é reflectância do grupo j na banda λ .
- ✓ $\mathcal{E}j,\lambda$: é o erro residual resultante da resolução da equação (30) para a banda λ e o grupo j .

Cada grupo “j” resultado da segmentação é testado como um candidato a *endmember*. Assim, a Equação 28 apresenta duas incógnitas, as frações α_i e β_i para cada grupo “j”. Com duas equações (para a banda vermelha e banda infravermelha) para cada grupo G_j se resolve o sistema de equações produzindo estimativas de α_i , β_i e ϵ_i . Acrescenta-se uma condição de positividade das frações (algoritmo NNLS) para forçar o algoritmo a produzir estimativas realísticas de frações. Este processo é repetido para cada grupo G_j para guardar no final o resíduo total $\epsilon_t = \sum_j \sum_b \epsilon_{j,b}$ que está associado ao candidato a *endmember* d’água. De maneira iterativa vai-se testando cada grupo como candidato a *endmember* d’água e o grupo que produzir o menor valor de ϵ_t será selecionado como o *endmember* d’água.

Cabe lembrar que para conferir a precisão das reflectâncias do sensor MODIS, extraídas pelo algoritmo MOD3R, foram comparadas as medições de reflectância realizadas no campo com as reflectâncias determinadas a partir dos sensores MODIS para imagens de ótima qualidade (baixa cobertura de nuvens).

4.3 - Estimativas de concentração de sedimentos a partir dos dados MODIS

A propriedade óptica da água medida em campo que se relaciona de maneira direta com a reflectância medida por satélite é a reflectância de sensoriamento remoto (Rrs). A proposta de integração de dados para calcular as estimativas de concentração de sedimentos a partir dos dados de satélite envolve análises de correlação entre a reflectância de sensoriamento remoto com os valores de concentração de sedimentos e os valores de reflectância medidos pelo sensor MODIS. Essa proposta é detalhada pelos seguintes passos (etapa II do fluxograma da figura 17):

- a) Os valores de concentração de sedimentos são correlacionados com as medidas de reflectância obtidas por espectrorradiometria de campo. Mais especificamente são correlacionados os valores de concentração com os

comprimentos de onda do vermelho e do infra-vermelho, 670 e 860 nm respectivamente;

- b) Os dados de reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) adquiridos pela espectrorradiometria de campo são utilizados para simular a reflectância do sensor MODIS, por meio de um algoritmo matemático, para os comprimentos de onda de 670 e 860 nm, bandas 1 e 2, respectivamente, das imagens de 250 metros de resolução espacial. O objetivo dessa etapa é simular como seria a medida de reflectância mais precisa feito pelo sensor MODIS, ou seja, sem contar com as atenuantes atmosféricas e os problemas de ruídos no processo de aquisição das imagens.
- c) Os valores de reflectância simulados para o sensor MODIS são correlacionados com os dados de concentração de sedimentos em suspensão mensurados em campo. A equação de regressão definida pela curva de correlação é aplicada a série histórica de reflectância dos dados MODIS gerada pelo algoritmo MOD3R. Para tanto são utilizados os dados MODIS de boa qualidade;
- d) A estimativa de concentração de sedimentos em suspensão calculada é validada por meio da comparação com os dados levantados em campo. Os dados de campo são comparados com os valores médios de concentração de sedimentos estimados para o mesmo mês em que foi realizado o levantamento de campo.
- e) Com os dados validados, a etapa final abrange a discussão sobre a variação temporal e espacial da concentração de sedimentos nas regiões analisadas dentro do reservatório.

Capítulo V - Resultados e Discussão

Os resultados serão apresentados de acordo com a sequência: i) caracterização do material em suspensão; ii) propriedades ópticas das águas do reservatório; iii) processamento dos dados MODIS; iv) Curva de calibração (correlação R_{rs} X Concentração); v) estimativa de concentração a partir dos dados MODIS e, vi) validação das estimativas de satélite.

5.1 - Caracterização do material em Suspensão.

Como já mencionado anteriormente, na campanha realizada em março de 2012 foram coletadas amostras de sedimentos em suspensão em duas profundidades: superfície e 2 metros, em vinte e cinco pontos no reservatório e na estação do Indaiá apenas na superfície. Nas demais campanhas a amostragem acrescentou a profundidade de quatro metros para as amostras no reservatório.

Os gráficos da figura 30 mostram a variação das concentrações na superfície da estação até o reservatório (a) e as concentrações em ambas as superfícies (b) somente no reservatório, para a campanha feita em março de 2012.

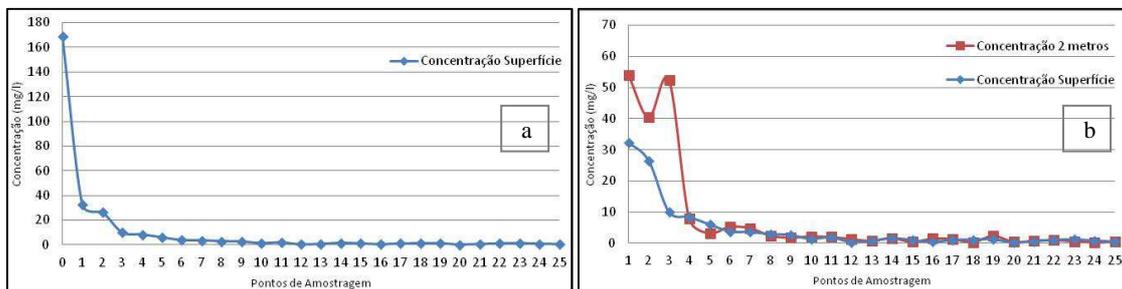


Figura 30 - concentrações na superfície da estação até o reservatório (a); concentrações em ambas as profundidades somente no reservatório (b) - campanha março 2012 - Braço Indaiá.

A concentração de sedimentos em suspensão na superfície do reservatório diminui a medida que se afasta do ponto de entrada do rio Indaiá. Na profundidade de dois metros a diminuição do valor de concentração ocorre em taxas menores e em alguns trechos do reservatório chega a aumentar de um ponto para outro. Esse comportamento pode estar relacionado ao caimento de sedimentos da superfície.

No gráfico b da figura 30 pode se observar que entre os pontos 1 e 2 ambas profundidades diminuem o valor de concentração, no entanto entre o ponto 2 e o ponto 3 a concentração na superfície diminui de maneira mais abrupta e na profundidade de 2 metros os valores aumentam, consequência do caimento dos sedimentos superficiais. Até o ponto 4 de medição pode ser observado esse processo de sedimentação, a partir

desse ponto, a concentração apresenta pouca variação nas duas profundidades, configurando a dispersão da pluma ao longo do perfil levantado.

Os gráficos da figura 31 mostram as variações de concentração para a campanha feita no braço do Indaiá (estação e reservatório) em janeiro de 2013.

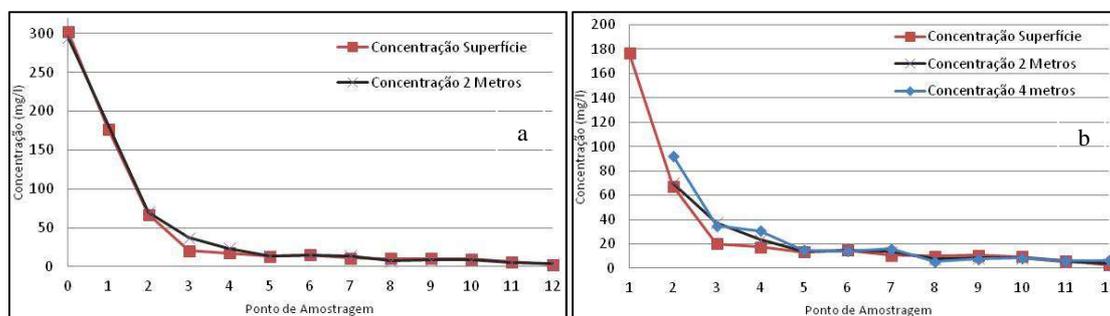


Figura 31 - concentrações na superfície e 2 metros da estação até o reservatório (a); e as concentrações em todas as profundidades somente no reservatório (b) - campanha janeiro 2013.

Os dados levantados em janeiro de 2013 na estação do rio Indaiá e na região do braço do reservatório mostram um comportamento bastante semelhante ao da campanha de 2012 entre a estação e o reservatório, porém com valores muito mais altos de concentração. Cabe ressaltar que nessa campanha o reservatório se encontrava com apenas 41% do seu volume útil. Os primeiros pontos dentro do reservatório apresentavam uma profundidade bastante rasa, cerca de 70 cm no primeiro ponto. Dentro do reservatório as concentrações nas três profundidades analisadas apresentam um comportamento bastante homogêneo, a partir do ponto 5. O depósito do material mais grosseiro se dá entre os pontos 1 e 4.

O braço do São Francisco no reservatório recebe a contribuição de dois importantes rios, Pará e São Francisco. A figura 32 mostra a concentração de sedimentos na superfície para as estações nos dois rios e o gráfico da variação de concentração na superfície dentro do reservatório.

Nesse braço, ao contrário do que acontece no Indaiá, as concentrações nas estações são menores do que no reservatório. Dentro do reservatório, entre os pontos 1 e 5, a concentração na superfície é bastante homogênea, passando a diminuir de forma mais acentuada a partir do ponto 6.

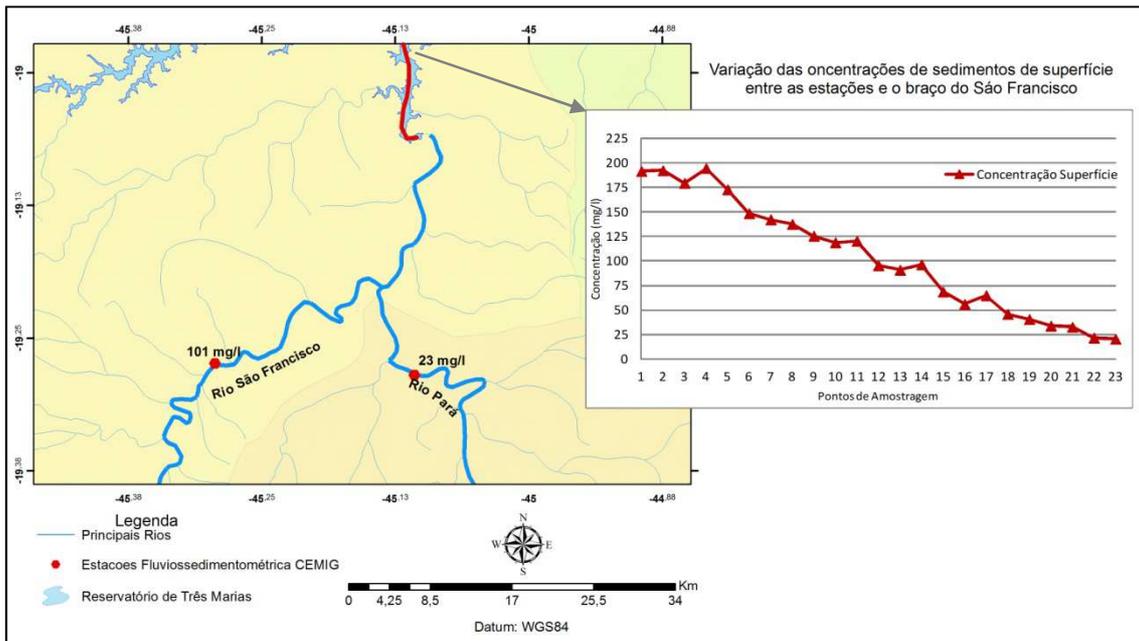


Figura 32 - Variação de concentração na superfície entre as estações do rio Pará e São Francisco e o reservatório.

Na figura 33 estão as variações das concentrações nas três profundidades amostradas. Da mesma forma, as concentrações nas profundidades 2 e 4 metros, entre os pontos 1 e 7 são bastante homogêneas, variando muito pouco. A partir do ponto 7 a concentração diminui de maneira abrupta até o ponto 8, e a partir desse ponto o comportamento é bem heterogêneo entre as profundidades. A partir do ponto 18 as curvas praticamente se sobrepõem, apresentando pouca variação. Desse ponto em diante o material em suspensão já apresenta concentrações relativamente baixas, se dispersando ao longo do braço, com uma taxa de diminuição bem menor.

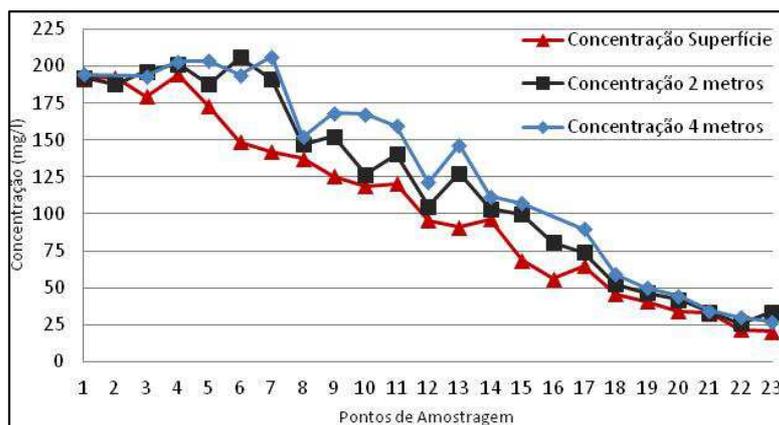


Figura 33 - Variação das concentrações em todas as profundidades no braço do São Francisco.

As variações de concentração no braço do Paraopeba são apresentadas nos gráficos da figura 34.

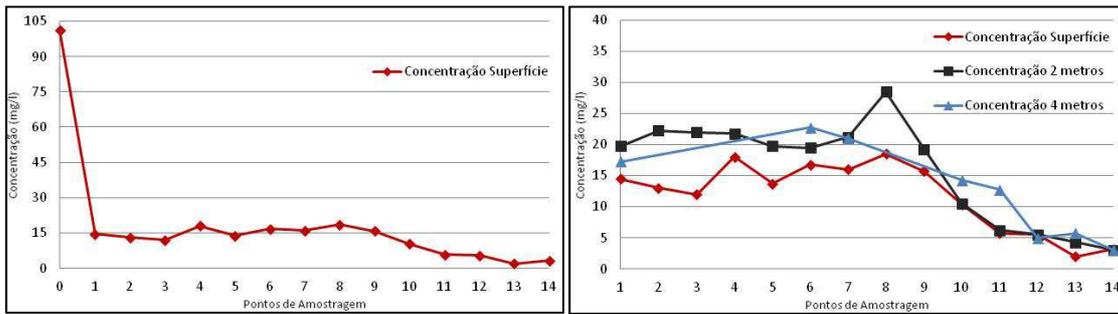


Figura 34 - concentrações na superfície e 2 metros da estação até o reservatório (a); e as concentrações em todas profundidades somente no reservatório (b) - campanha março 2013 - braço do Paraopeba

O braço do Paraopeba foi a região do reservatório que apresentou os menores valores de concentração entre as regiões estudadas. Entre a estação e o reservatório e caracterizada uma queda muito forte nas concentrações de superfície, variando de 101 mg/l na estação até aproximadamente 15mg/l no primeiro ponto amostrado no reservatório. Entre os nove primeiros pontos do reservatório a concentração na superfície é praticamente inexistente. A partir do ponto 9 os valores passam a diminuir, porém não de forma abrupta.

Nesse braço do reservatório, as variações de profundidade foram bastante inconstantes, portanto em apenas alguns pontos de medição foi possível coletar sedimentos em todas as profundidades. Mais uma vez cabe ressaltar o baixo volume útil do reservatório, consequência das condições atípicas de precipitação no fim de 2012 e início de 2013.

5.2 - Propriedades ópticas das águas do reservatório

5.2.1 - Reflectância de Sensoriamento Remoto

As curvas de reflectância adquiridas em campo mostram uma variação na magnitude da reflectância a medida que se afasta do ponto de chegada do rio no reservatório. As figuras 35, 36 e 37 mostram as curvas de reflectância de sensoriamento remoto levantadas nos três braços estudados dentro do reservatório

Na figura 35 estão mostrados apenas as curvas do braço principal do Indaiá, sem considerar os dados do braço afluente a leste, onde estão coletados os pontos de 13 a 21. Estes pontos apresentaram muito baixa concentração e não influenciam de maneira significativa na entrada de sedimentos no braço do Indaiá, e, portanto, foram descartados das análise de propriedades ópticas e demais correlações.

Como foi mencionada anteriormente, a reflectância da água depende dos componentes que se encontram no meio aquático. Pela forma das curvas levantadas nos três braços pode ser perceber influências diferentes nas curvas de reflectância. Assim

pode se encontrar, dentro do reservatório de Três Marias tipos diferentes de águas, em termos de constituição e presença de material suspenso, com diferentes assinaturas espectrais, como pode se observar nas figuras 35, 36 e 37.

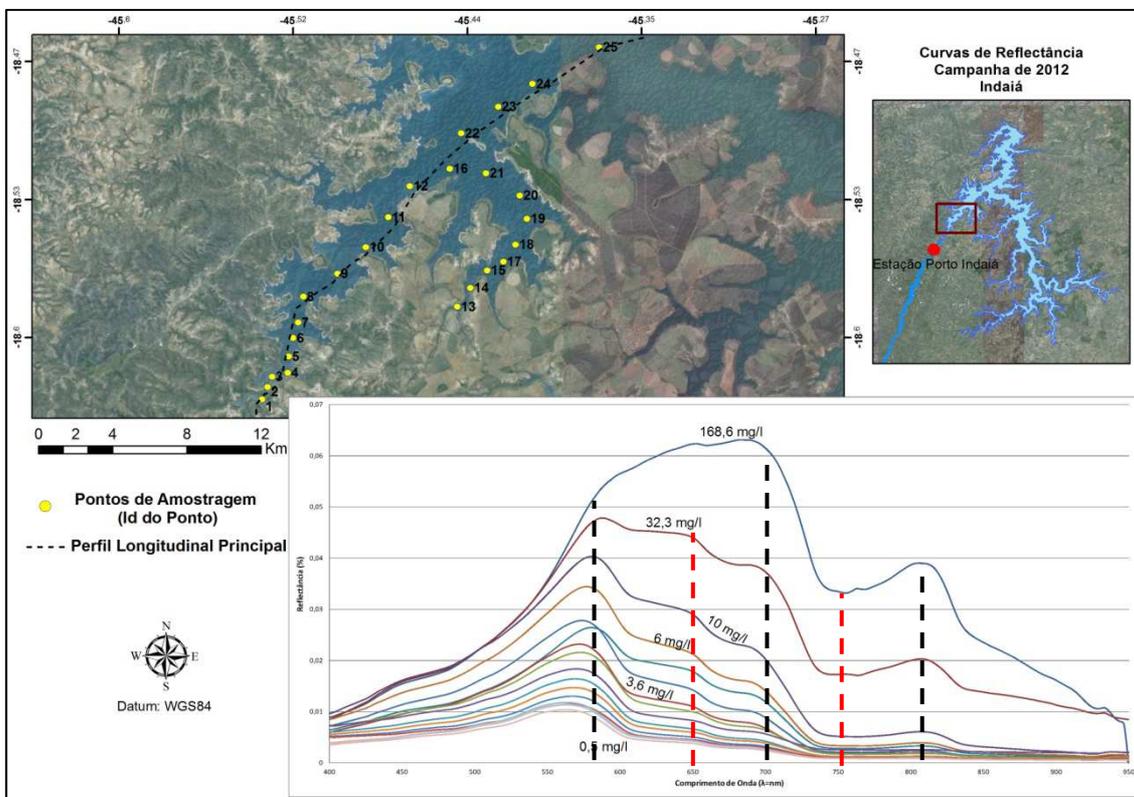


Figura 35 - Curvas de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) no Braço do Indaiá - Campanha de 2012.

As águas do braço do Indaiá apresentam grande quantidade de sedimentos nos primeiros pontos, com reflectância forte na faixa dos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho. A pente da curva entre 700nm e 750 nm está associada ao coeficiente de absorção dos fitoplânctons (a_{ph}) nesse intervalo.

Nos pontos de menor concentração de sedimentos em suspensão a reflectância é mais alta no vermelho, porém o pico no infra-vermelho diminui abruptamente. Em todas as concentrações um pico de reflectância na faixa espectral entre 550 e 600 nm. Como mencionado anteriormente, os pigmentos fotossintetizantes aproveitam a energia contida nos comprimentos de onda entre 400 e 500nm e entre 600 e 700nm para o processo da fotossíntese, apresentando uma absorção forte nessas faixas e refletindo a região espectral do verde, entre 500 e 600nm. Esse padrão na resposta espectral das águas do Indaiá pode ser melhor explicado se for quantificado em campo a concentração de todos os componente opticamente ativos.

Entre 400 e 500nm a baixa reflectância está associada a absorção pela presença de matéria orgânica (CDOM). A partir de 950 nm a reflectância é muito baixa devido a absorção da água nessa faixa espectral.

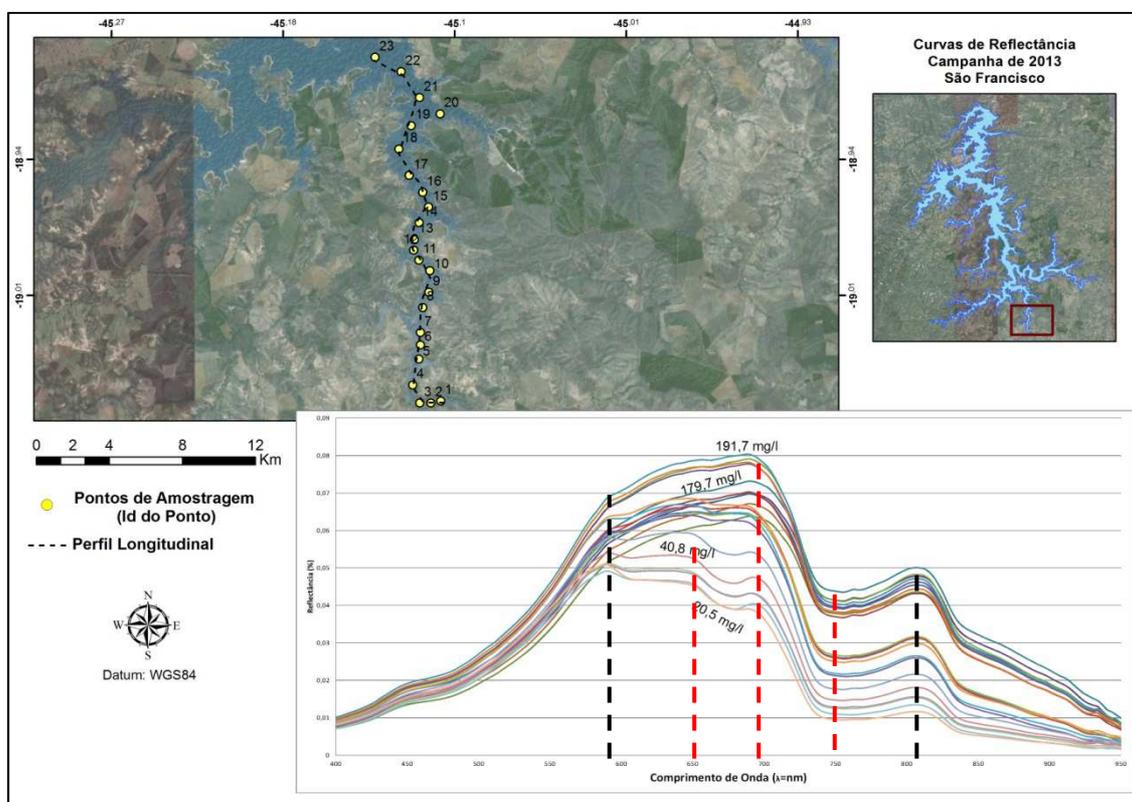


Figura 36 - Curvas de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) no Braço do São Francisco - Campanha de 2013.

No braço do São Francisco, os valores de concentração são bastante altos e ocorrem durante grande parte do perfil longitudinal levantado. As curvas são marcadas por forte pico de reflectância na região espectral do vermelho e do infra-vermelho. Além dos altos valores de reflectância entre 600nm e 700nm. Nas curvas de reflectância do São Francisco essa faixa espectral é marcada em parte pela presença de pigmentos fotossinteticamente ativos, com feições de absorção entre 650nm e 700nm, junto com altas concentrações de sedimentos em suspensão, com picos de reflectância no comprimento de onda do vermelho, também entre 650nm e 700nm.

Na faixa espectral entre 400nm e 550nm pode se observar uma forte absorção em todas as curvas, independente da variação dos valores de concentração. Esse comportamento evidencia a predominância dos coeficientes de absorção dos componente opticamente ativos nesse intervalo espectral.

O comportamento espectral das águas do Paraopeba se diferenciam de maneira significativa das curvas adquiridas no Indaiá e no São Francisco, figura 37.

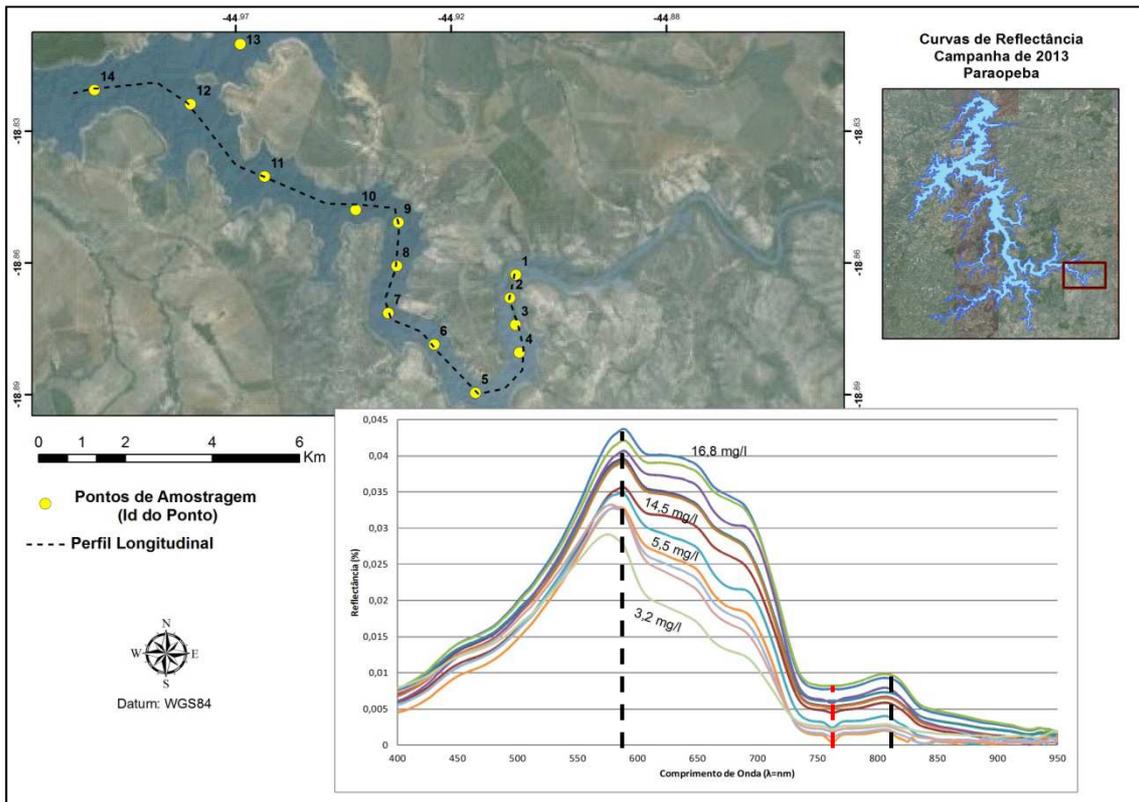


Figura 37 - Curvas de Reflectância de sensoriamento remoto (Rrs) no Braço do Paraopeba - Campanha de 2013.

O Paraopeba apresenta as menores concentrações de sedimentos em suspensão, quando comparado aos outros braços do reservatório estudado. Fato esse evidenciado pelos baixos valores de reflectância, abaixo de 0,05.

A resposta espectral no Paraopeba é marcada por um pico forte de reflectância entre 550 e 600nm e uma forte pendente entre 700nm e 750nm. Esse comportamento mostra uma grande similaridade com as curvas de reflectância de fitoplânctons da literatura.

No comprimento de onda de 700nm pode-se observar a presença de feições tipo *shoulders*. Próximo a 700nm temos um pico de reflectância causado pelo sedimento em suspensão, e logo após 700nm predomina a absorção dos pigmentos fotossinteticamente ativos, o que caracteriza a presença dessa feição.

Para os comprimentos de onda maior que 950nm a absorção da água caracteriza os baixos valores de reflectância, assim como nas demais curvas analisadas anteriormente. O mesmo acontece para os comprimentos de onda de 400nm, porém, nesse caso, são os componentes opticamente ativos que causam a absorção.

Os gráficos da figura 38 mostram a correlação entre os valores de reflectância em 670nm(a) e 860nm(b) com os valores de concentração do material em suspensão adquiridos em todas as campanhas.

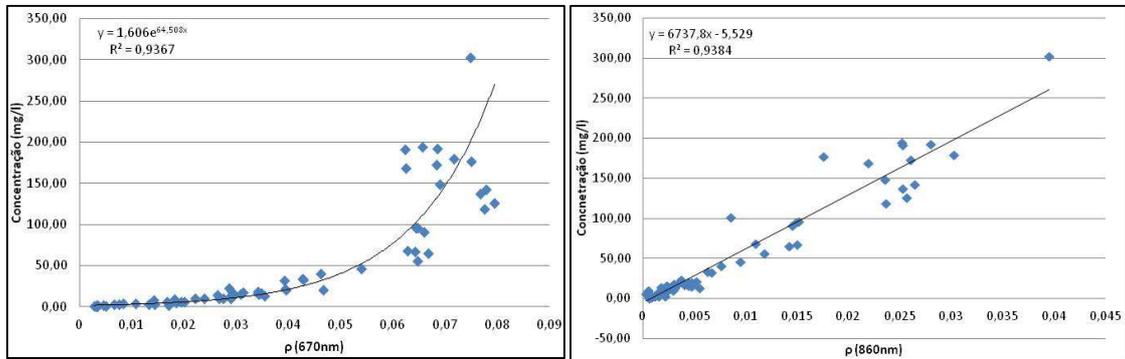


Figura 38 - Correlação Rrs com concentração para todos os dados levantados

Para ambos os comprimentos de onda o valor do R^2 foi de aproximadamente 0,94; sendo para o comprimento de onda de 670nm uma função exponencial e para 860nm uma função linear. A amplitude de concentrações varia entre 1,05 e 302 mg/l. O que mostra que a reflectância de sensoriamento remoto adquirido em campo, nesses comprimentos de onda, pode ser um bom estimador da concentração do material em suspensão para vários tipos de água

5.2.2 - Coeficiente de Atenuação Vertical da Luz (K_d e K_u)

As medições de coeficiente de atenuação vertical descendente da luz (K_d) foram realizadas em apenas alguns pontos de amostragem. Os gráficos da figura 39 mostram os valores de K_d para o braço do Indaiá nas campanhas de 2012 e 2013.

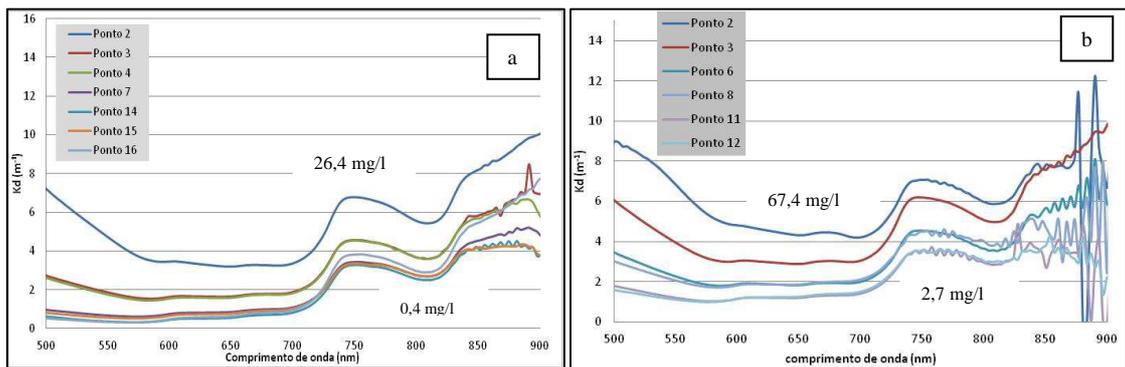


Figura 39 - Coeficiente vertical de atenuação da luz descendente (K_d) - Indaiá 2012 (a) Indaiá 2013(b).

Os gráficos das figura 40 mostram os valores de K_d para os Braços do São Francisco e do Paraopeba.

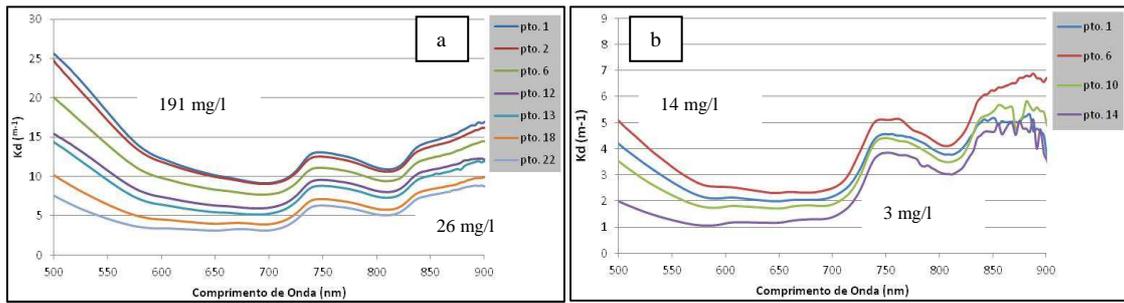


Figura 40 - Coeficiente vertical de atenuação da luz descendente (K_d) - São Francisco (a) Paraopeba(b).

Os gráficos mostram a variação do K_d para diferentes concentrações de material em suspensão. O comportamento da curva entre 500nm e 700nm é exponencial negativo influenciado pela absorção do CDOM e do material particulado. Os valores de atenuação aumentam a partir de 700 nm, fato explicado pela absorção da água nessa faixa espectral. Além de 900nm o ruído apresentado se dá em função da baixa quantidade de energia adquirida pelo sensor. A diferença dos valores de atenuação entre os braços analisados no reservatório é função dos valores de concentração de material particulado, evidenciado pela escala no eixo "y" dos gráficos.

O gráfico da figura 41 mostra a correlação entre o K_d , para o comprimento de onda de 670nm, e os valores de concentração

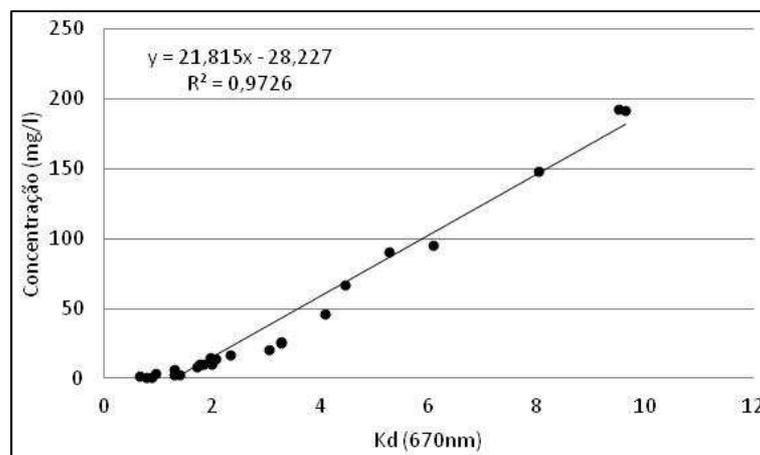


Figura 41 - Correlação entre concentração e K_d para comprimento de onda de 670nm

A correlação mostra que o K_d pode ser um excelente estimador da concentração de material em suspensão, com R^2 igual a 0,97. A amplitude dos valores de concentração vai de 0,42 mg/l até 192 mg/l. Nota-se que o valor de K_d nesse comprimento de onda não satura em função dos valores de concentração de material em suspensão.

Nas campanhas de março de 2013, foram levantados parâmetros do coeficiente de atenuação vertical ascendente (K_u). Cabe ressaltar que esse levantamento só pode ser realizado com a utilização de dois sensores de irradiância, como mencionado

anteriormente. As curvas do coeficiente de atenuação vertical ascendente estão apresentadas no gráfico da figura 42.

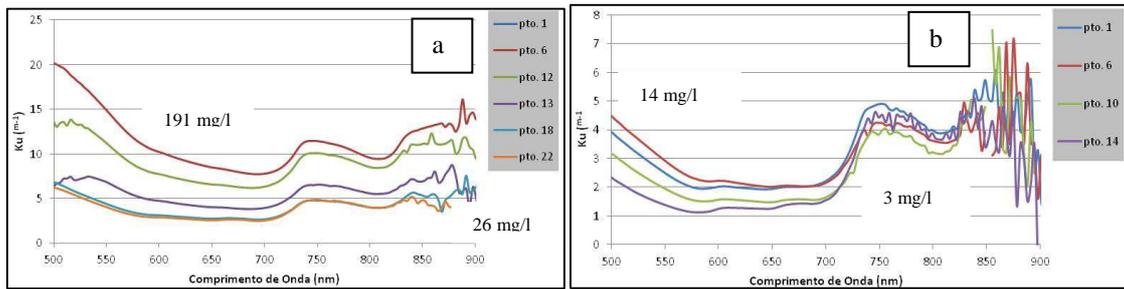


Figura 42 - Valores de Ku para os braços do São Francisco (a) e do Paraopeba (b).

Os gráficos com as curvas de Ku mostram um comportamento semelhante aos de Kd, variando para as diferentes concentrações de material em suspensão. O comportamento da curva entre 550nm e 700nm é exponencial negativo influenciado pela absorção do CDOM e do material particulado. Os valores de atenuação aumentam a partir de 700 nm, porém de forma menos abrupta do que os valores de Kd, fato explicado pela absorção da água nessa faixa espectral. Além de 900nm o ruído apresentado também se dá em função da baixa quantidade de energia adquirida pelo sensor. Para o Ku, a quantidade de energia é ainda menor, o que amplia o ruído. A diferença dos valores de atenuação entre os braços analisados no reservatório é função dos valores de concentração de material particulado, evidenciado pela escala no eixo "y" dos gráficos.

A figura 43 mostra a correlação entre os valores de concentração e o Ku para comprimento de onda de 670 nm.

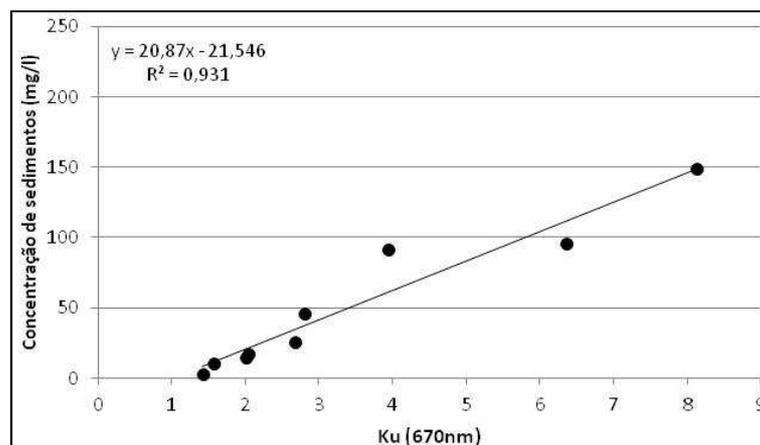


Figura 43 - Correlação entre concentração e Ku para comprimento de onda de 670nm

Também de forma semelhante ao Kd, a correlação mostra que o Ku pode ser um bom estimador da concentração de material em suspensão, com R² igual a 0,93. A amplitude dos valores de concentração vai de 0,42 mg/l até 192 mg/l. Porém a

quantidade de pontos amostrados para o Ku é menor, ou seja, essa análise carece de mais levantamentos de campo para melhorar a curva definida pela análise de correlação.

5.2.3 - Reflectância Volumétrica (R^0)

Os dados de reflectância volumétrica foram levantados apenas na campanha de março de 2013, também pela necessidade de se utilizar dois sensores de irradiância. As curvas estão apresentadas nos gráficos da figura 44.

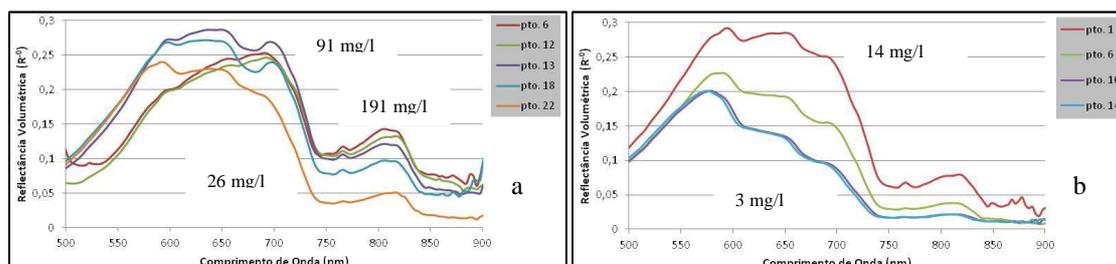


Figura 44 Curvas de reflectância volumétrica para os braços do São Francisco (a) e Paraopeba (b).

As curvas de reflectância volumétrica apresentam um padrão de forma bastante semelhante aos dados de reflectância de sensoriamento remoto. A diferença entre ambas está na magnitude dos valores de reflectância (eixo y do gráfico). Isso se deve ao fato de que a reflectância de sensoriamento remoto adquire o dado por meio do ângulo cônico, definido pela configuração dos espectrorradiômetros, quando se opera fora da água.

Quando o sensor está submerso, a medição se dá a partir de um ângulo esférico (meia esfera), captando o dado com uma abertura de aquisição maior, registrando assim toda a energia retroespalhada dentro dessa meia esfera.

Porém isso não significa uma mudança no comportamento espectral do alvo e sim apenas uma configuração de aquisição diferente do dado. Se multiplicarmos os valores de reflectância de sensoriamento remoto por π , teremos valores bem próximos à magnitude apresentada nas curvas de reflectância volumétrica.

A curva do gráfico da figura 45 mostra a correlação entre os valores de concentração de material em suspensão com a reflectância volumétrica.

A correlação se mostra bastante satisfatória com um valor de R^2 igual a 0,92.

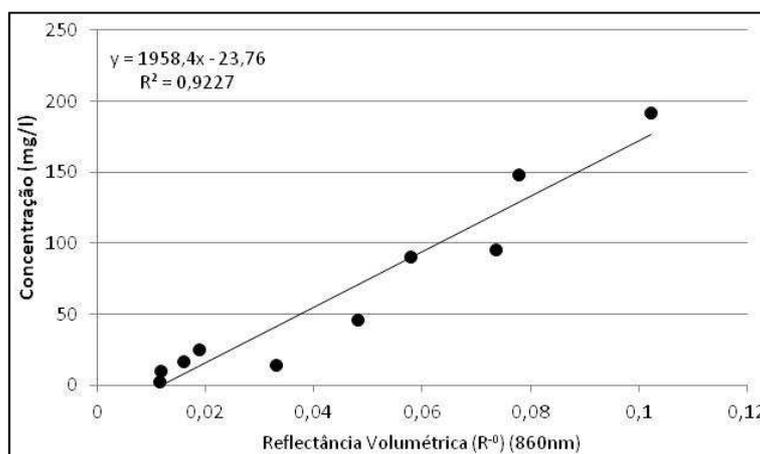


Figura 45 - Correlação entre concentração e R^0 para comprimento de onda de 860 nm.

5.2.4 - Coeficiente de absorção (a)

Os dados de coeficiente de absorção foram estimados a partir da equação (24). Essa equação mostra a relação entre o coeficiente de absorção e os valores de coeficiente de atenuação vertical descendente K_d e a reflectância volumétrica (R^0).

Como os dados de reflectância volumétrica foram levantados apenas na campanha de março de 2013, o coeficiente de absorção foi calculado apenas para os braços do Paraopeba e do São Francisco (figura 46).

Como foi visto anteriormente, a absorção das águas naturais depende da absorção da água pura, CDOM, clorofila e material particulado. Os gráficos das figuras abaixo mostram a variação do coeficiente de absorção para pontos com diferentes concentrações.

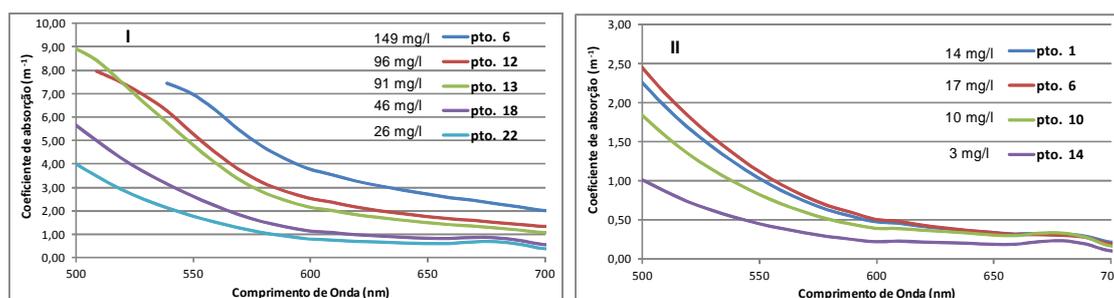


Figura 46 Coeficiente de absorção (a) para os braços do São Francisco (I) e do Paraopeba (II)

Os gráficos mostram que os coeficientes de absorção diminuem a medida que se deslocam no sentido dos maiores comprimentos de onda do espectro. Cabe destacar os maiores valores apresentados no gráfico I devido aos maiores valores de concentração nesse braço.

O gráfico da figura 47 mostra a correlação entre a concentração do material em suspensão e os coeficientes de absorção no comprimento de onda de 550nm, onde predomina a absorção da radiação.

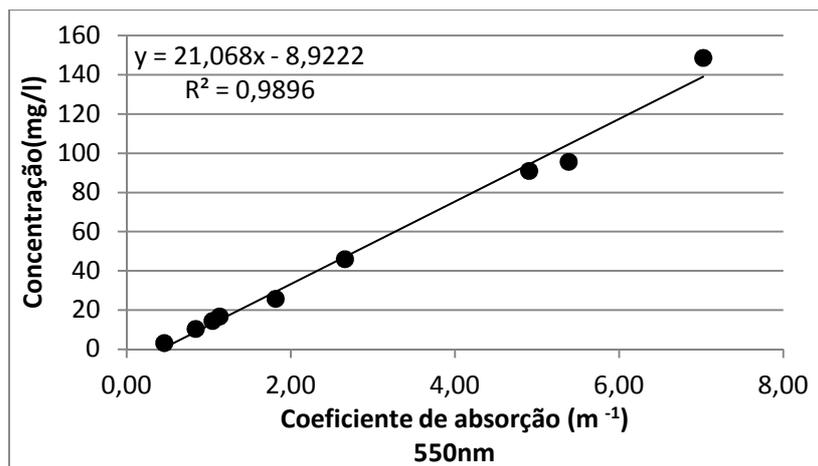


Figura 47 - Correlação entre concentração do material em suspensão e coeficiente de absorção(a).

Esse parâmetro apresenta uma robusta correlação, com R^2 de 0,98. Vale ressaltar que como a absorção é uma propriedade óptica inerente da água, ela somente é influenciada pela constituição do da água misturada com seus componentes opticamente ativos.

5.2.5 - Coeficiente de espalhamento (b) e retroespalhamento (b_b)

O coeficiente de espalhamento foi estimado a partir da equação 23, que relaciona o coeficiente de espalhamento com o coeficiente de atenuação vertical (K_d) com o coeficiente de absorção (a).

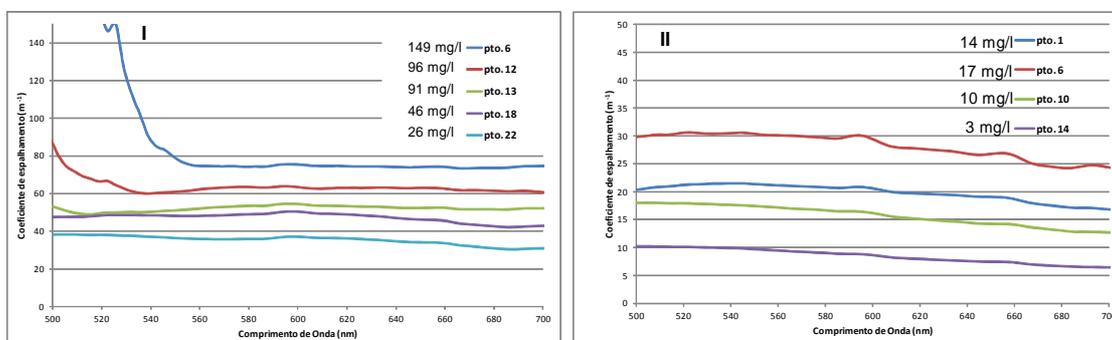


Figura 48 - Coeficiente de espalhamento (b) para os braços para os braços do São Francisco (I) e do Paraopeba (II).

As curvas do ponto 6 e do ponto 12 no gráfico I mostram um comportamento bastante diferente das demais, nos comprimentos de onda entre 500nm e 550nm. Esse fato pode ser explicado pelos valores de concentração maiores nesse pontos, e também pelo fato de que essas medidas são obtidas na sub-superfície, portanto, nessa faixa espectral a absorção dos sedimentos e do CDOM, na camada superior a profundidade de medição, pode estar mascarando o retroespalhamento nessas curvas, causando esse efeito ruidoso. As demais curvas apresentam um comportamento exponencial com relação a concentração.

A figura 49 mostra a curva de correlação para os coeficientes de espalhamento e concentração do material em suspensão.

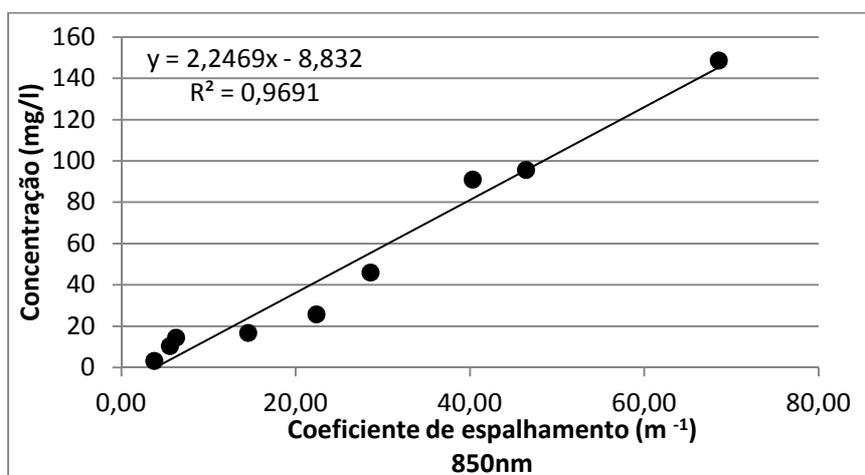


Figura 49 - Correlação entre concentração do material em suspensão e coeficiente de espalhamento (b).

Esse parâmetro apresenta uma robusta correlação com o material em suspensão, com R² de 0,96.

O coeficiente de retroespalhamento foi estimado a partir da equação 22, que relaciona o coeficiente de retroespalhamento com a reflectância volumétrica e com o coeficiente de absorção (a), figura 50.

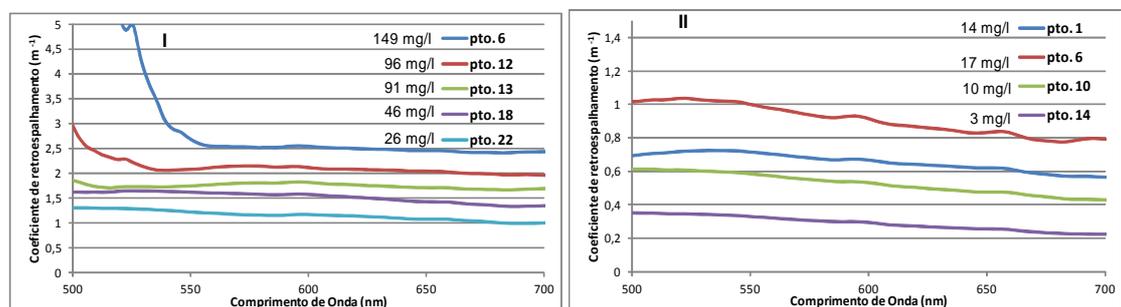


Figura 50 - Coeficiente de retroespalhamento (b_b) para os braços para os braços do São Francisco (I) e do Paraopeba (II).

O coeficiente de retoespalhamento (b_b) apresenta curvas extremamente semelhante ao coeficiente de espalhamento, porém se diferenciam em termos de magnitude do coeficiente. Isso ocorre devido á interação entre o comprimento de onda e o diâmetro da partícula do material em suspensão (Teoria de Mie e Rayleigh). O espalhamento ocorre em todas as direções enquanto que o retroespalhamento ocorre em uma direção definida.

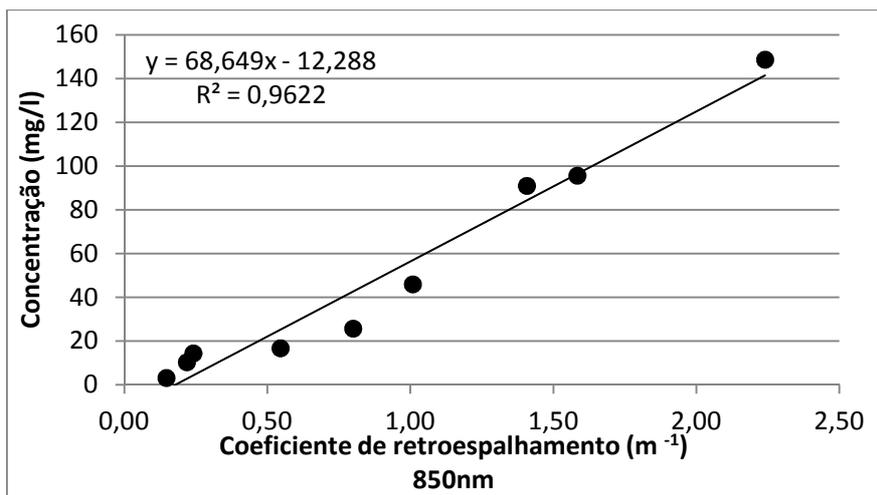


Figura 51 - Correlação entre concentração do material em suspensão e coeficiente de retroespalhamento (b_b).

A correlação entre o material em suspensão e o retroespalhamento se apresenta de maneira bastante robusta, com valores de R² igual a 0,96.

5.3 - Processamento Dados MODIS

A série temporal de 12 anos das imagens MODIS processadas com o algoritmo MOD3R foram classificadas e selecionadas por critérios de qualidades, como ângulo da incidência solar, ângulo de visada do sensor, presença de aerossóis e presença ou ausência de nuvens a partir dos dados da banda de qualidade MODIS A1. Das 1024 imagens analisadas (Terra e Aqua), 82% obtiveram qualidade aceitável e foram usadas para obter estimativas de reflectância da água. Os 18% restantes das imagens não foram aproveitadas, e isso pode estar relacionado à resolução efetiva do sensor (que muda em função do ângulo de visada), cobertura de nuvens (período chuvoso), largura do braço (poucos pixels puros amostrados) e hidrologia (variação do nível do reservatório).

Os resultados apresentados nesse item são séries temporais de reflectância da água ao longo do braço do rio Indaiá para as 8 regiões de interesse (mascaras). As análises foram centradas na banda 2 das imagens MODIS (produto de reflectância da superfície 250m) referente ao comprimento de onda do infravermelho (NIR).

O objetivo de análise desse resultado é verificar a capacidade das imagens MODIS de acompanhar a sazonalidade das variações de reflectância no reservatório. Para tanto, apenas nessa etapa do trabalho, os resultados serão comparados a uma pequena série histórica de descarga sólida disponibilizada pela CEMIG para a bacia do rio Indaiá.

A figura 52 mostra a variação das reflectâncias da banda 2 para esta região do reservatório num período entre março de 2000 e março de 2013.

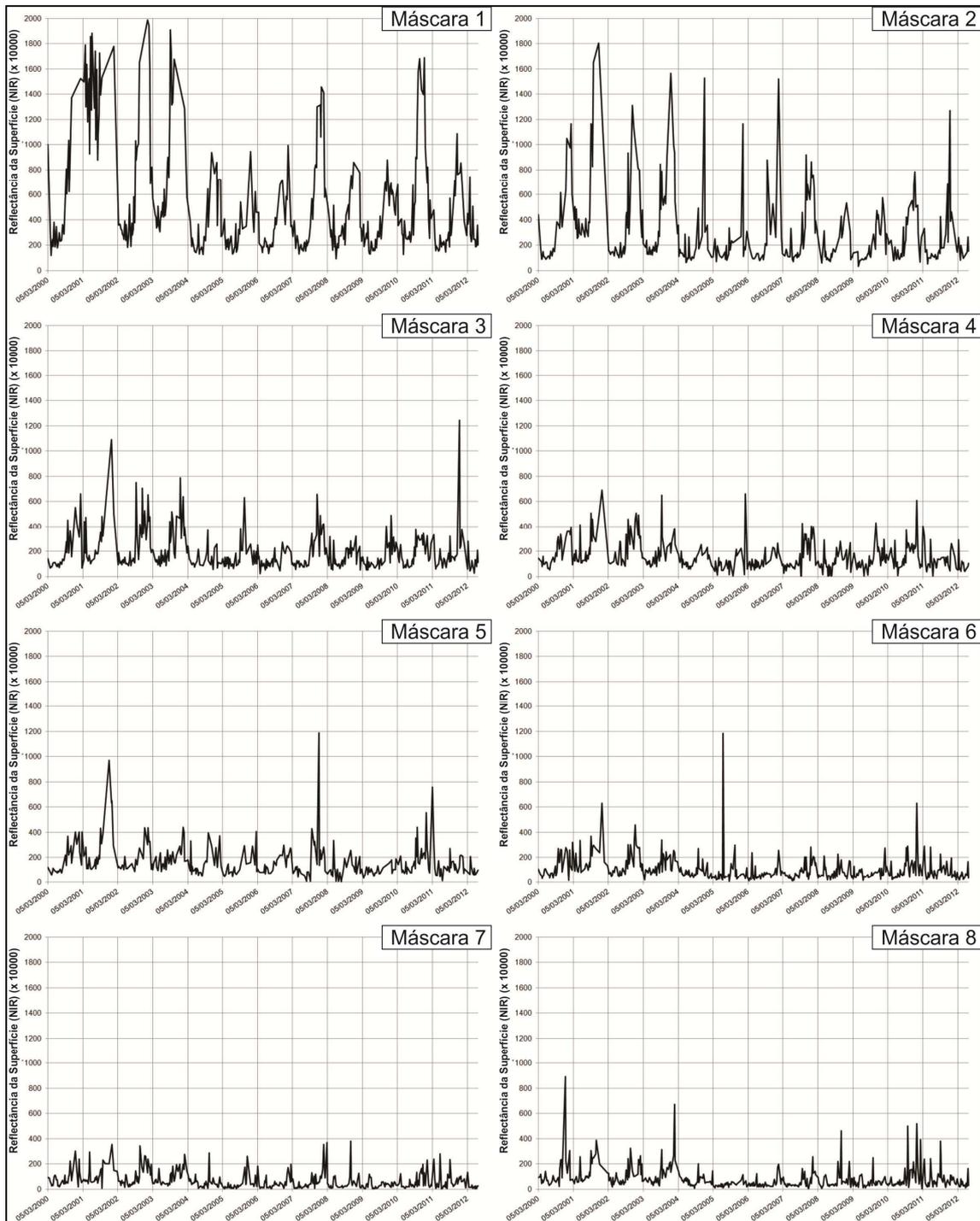


Figura 52 - Variação temporal dos valores de reflectância da superfície da água na região do infravermelho do MODIS nas máscaras analisadas no braço do rio Indaiá

Os gráficos das análises temporais da reflectância da água permitem observar um ciclo sazonal bem definido por altos valores de reflectância nos meses de chuva e baixos valores nos meses de seca. É caracterizado também uma forte variação da reflectância ao longo do braço do reservatório no sentido da montante à jusante, com

valores de reflectância que chegam a 2000 na máscara 1 e valores baixos de 100 e 50 nas máscaras 7 e 8. Um comportamento que chama a atenção são os altos valores de reflectância nos anos de 2000 a 2004 das primeiras máscaras analisadas. Essa diferença na reflectância pode estar diretamente relacionada com o nível da água do reservatório Três Marias, que nos anos de 2000 a 2003 operou com o nível entre 10 a 30% de sua capacidade nos meses mais secos (ONS, 2012).

Outro padrão de variação que pode ser visto nos dados MODIS é a diminuição da reflectância no sentido montante-jusante a medida que as máscaras afastam-se do encontro do rio com o reservatório.

A primeira análise de consistência dos dados de reflectância MODIS para fins de estudo das concentrações do material suspenso no reservatório foi feita comparando a descarga sólida registrada pela estação de monitoramento da CEMIG no rio Indaiá. Estes dados foram disponibilizados apenas para uma série histórica de um período de 4 anos (1999 a 2002).

A figura 53 apresenta a relação da série de descarga sólida diária da estação de monitoramento hidrossedimentológico do rio Indaiá, com as estimativas de reflectância da água dos dados MODIS (8 dias) nas bandas do vermelho e infravermelho em 2 ciclos sazonais hidrológicos.

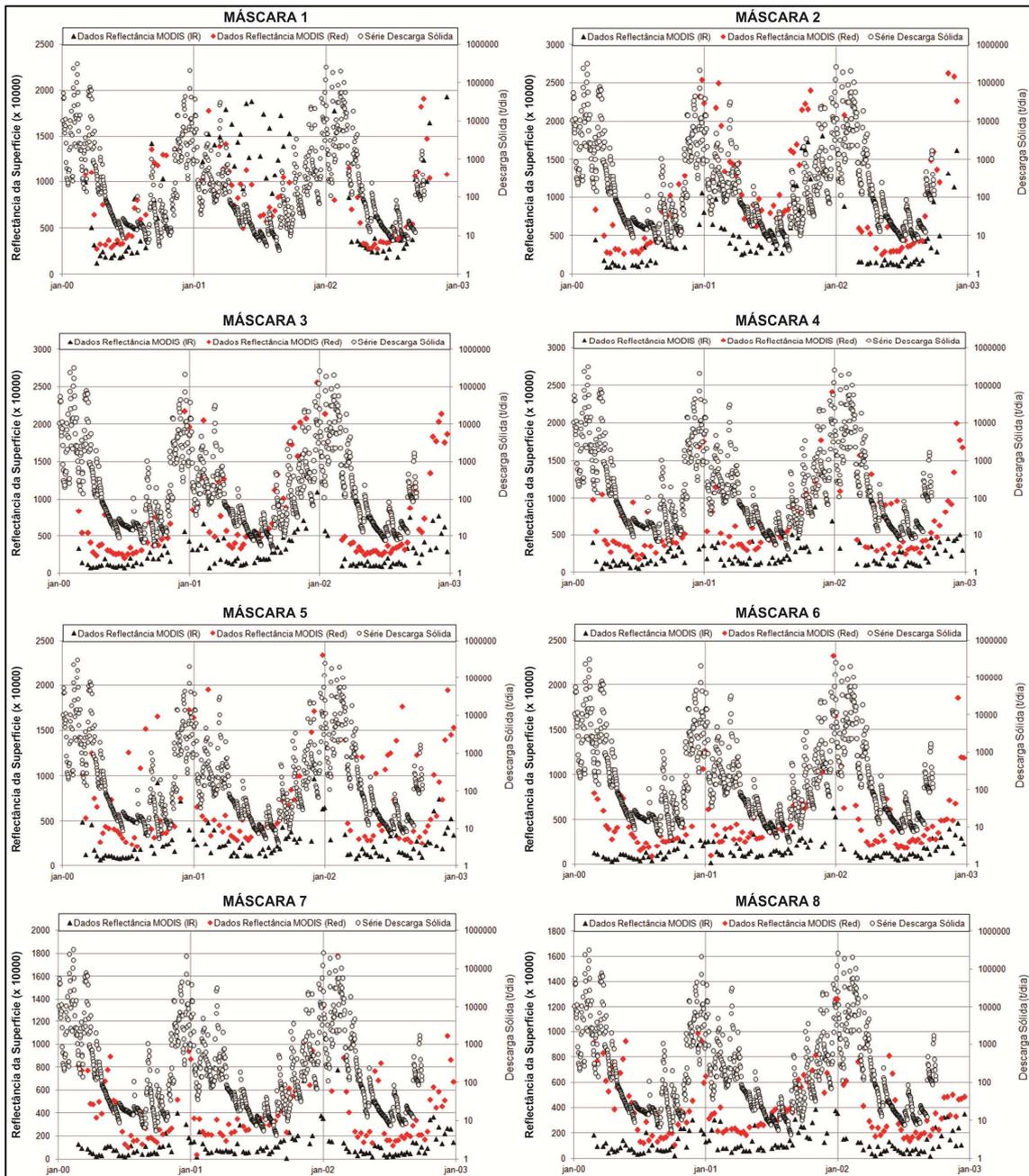


Figura 53 - Comparação entre a variação do fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá com a reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho.

Os dados de reflectância MODIS da máscara 1 não se relacionam muito bem com os dados de vazão sólida no período de seca no ano de 2001. É provável que o baixo nível da água no reservatório naquele período favoreceu o crescimento de vegetação ciliar ou plantas aquáticas, eliminando imagens com a qualidade necessária para esse período. Esses tipos de alvos podem ter gerado altos valores de reflectância na máscara 1, no ano de 2001, pois a assinatura está próxima ao padrão da resposta

espectral de alvos como vegetação (baixo no vermelho e alto no infravermelho) e não com a reflectância da água.

Nas outras máscaras, é possível notar uma boa relação entre a resposta da reflectância dos dados MODIS com a descarga sólida de sedimentos. Quando a descarga sólida aumenta no rio, a reflectância no braço calculada nas bandas do vermelho e infravermelho aumenta. Observa-se que essa relação é contínua ao longo do ciclos sazonal.

Uma melhor visualização da relação entre reflectância dos dados MODIS e a descarga sólida de sedimentos pode ser observada no gráfico da figura 54. Esse gráfico mostra com mais detalhe a resposta das bandas vermelha e infravermelha na máscara 2 para os meses janeiro-2000/janeiro-2001 e janeiro-2001/janeiro-2002.

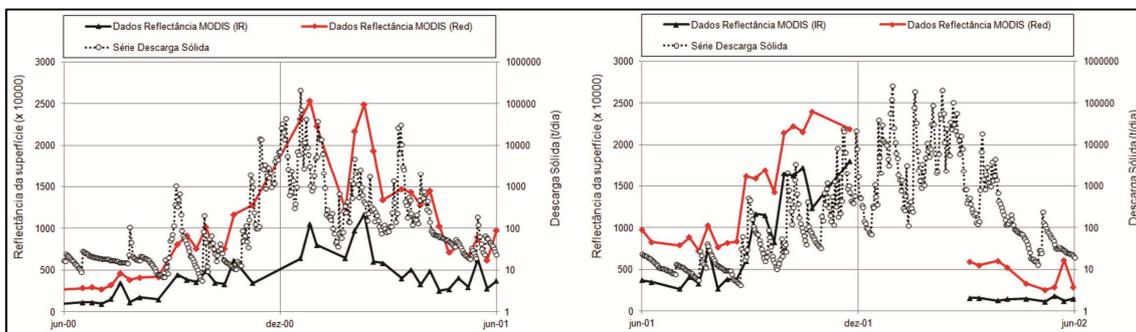


Figura 54 - Comparação entre a variação do fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá com a reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho - Detalhe da máscara 2 para os meses janeiro-2000/janeiro-2001 e janeiro-2001/janeiro-2002.

Nota-se que alguns dados de reflectância do MODIS não foram aproveitados devido aos critérios de qualidade na rotina de processamento do MOD3R. Os gráficos mostram uma robusta relação entre as variações de reflectância registrada pelos sensor MODIS com a descarga sólida monitorada pela estação da CEMIG.

5.4 - Estimativa de concentração de sedimentos a partir dos dados MODIS

5.4.1 - Definição da curva de calibração

As curvas de correlação entre reflectância de sensoriamento remoto e concentração de sedimentos foram calculadas utilizando todos os dados levantados nas três campanhas descritas anteriormente. Conforme descrito, as correlações são estabelecidas para dois comprimentos de onda: 670nm e 860 nm, vermelho e NIR respectivamente. Os da espectrorradiometria de campo foram utilizados para simular a resposta do sensor MODIS.

Para simular os valores de reflectância do MODIS a partir da radiometria de campo, o algoritmo matemático leva em consideração parâmetros de configuração do sensor MODIS, como por exemplo o ganho aplicado para cada banda. Para isso foi calculada uma média ponderada conforme a posição das bandas do sensor MODIS, de acordo com a figura 55.

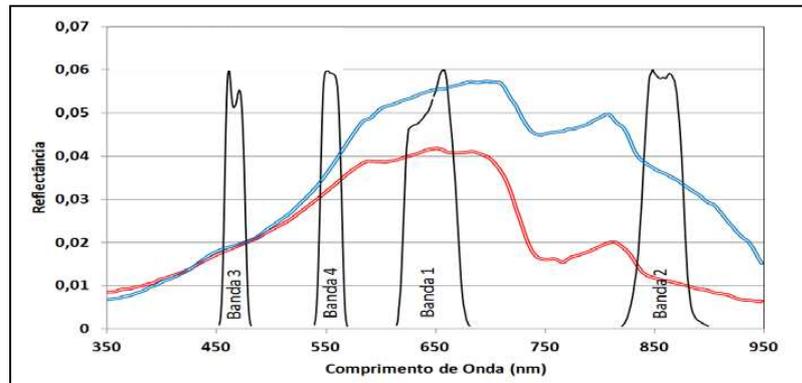


Figura 55 - Reflectância medidas em campo e a posição e largura espectral das bandas MODIS. Fonte: Villar, 2013

Cabe ressaltar que as medidas de reflectância do sensor MODIS são por unidade de área e as medidas do espectrorradiômetro TriOS por unidade de ângulo sólido (esterradiano). Portanto, os valores medidos pelo espectrorradiômetro devem ser multiplicados por π para que possam ser comparadas com os dados do sensor MODIS.

Após a simulação dos dados MODIS a partir a espectrorradiometria de campo, foram estabelecidas as curvas de correlação entre a reflectância medida pelo sensor MODIS e os valores de concentração do material em suspensão mensurados em campo.

O gráfico da figura 56 mostra a curva de correlação para os comprimento de onda do vermelho.

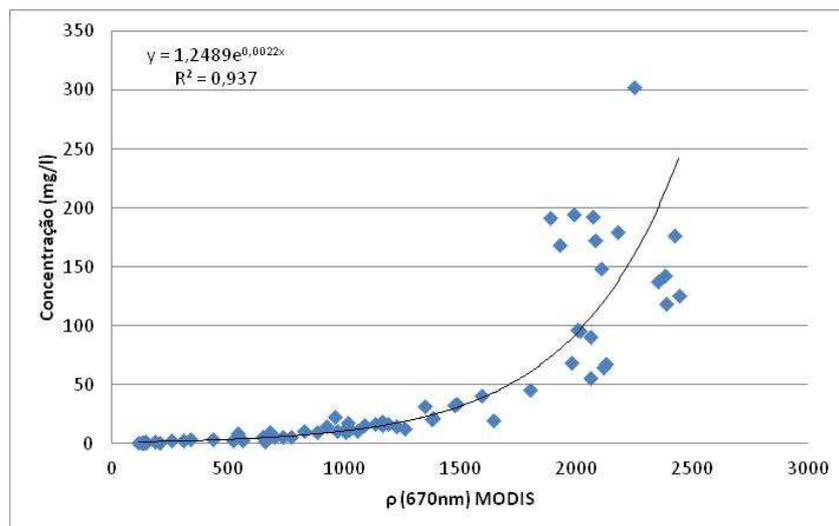


Figura 56 - Correlação entre reflectância da banda 1 do sensor MODIS e concentração de sedimentos medidos em campo.

O gráfico da figura 56 mostra uma boa correlação com a concentração do material em suspensão. Para a correlação estabelecida para o comprimento de onda do vermelho (670 nm) o R^2 foi de aproximadamente 0,94 para uma função exponencial. Nessa curva de correlação é possível perceber que a partir dos valores de reflectância de 1500, a resposta espectral nesse comprimento de onda satura, evidenciado pela dispersão dos pontos com relação a reta acima desse valor. Esse fato mostra que a reflectância nesse comprimento de onda é um bom estimador da concentração de sedimentos para águas mais limpas, com menor quantidade de sedimento.

O gráfico da figura 57 mostra a correlação entre o material em suspensão e a reflectância no comprimento de onda do infra-vermelho (860nm).

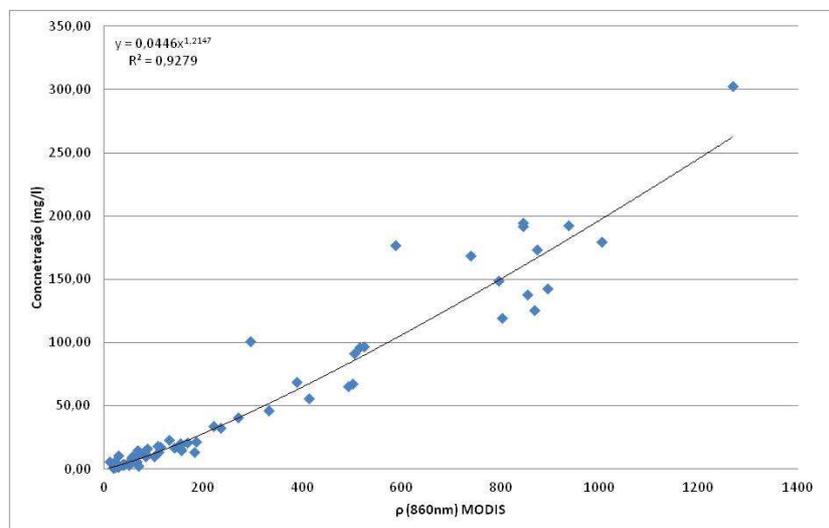


Figura 57 - Correlação entre reflectância da banda 2 do sensor MODIS e concentração de sedimentos medidos em campo.

A correlação estabelecida entre o material em suspensão e os valores de reflectância no infra-vermelho (860nm) apresenta um R^2 de aproximadamente 0,93 para uma função de potência. A variação dos valores de concentração vai de 1,05 mg/l até 302,73 mg/l, o que mostra que a reflectância nesse comprimento de onda pode ser um bom estimador da concentração do material em suspensão para regiões do reservatório com diferentes concentrações de sedimento.

Esses resultados mostram uma boa possibilidade de usar os dados do sensor MODIS para fazer estimativas de concentração de sedimentos em suspensão.

5.3.2 - Estimativas de concentração de material em suspensão

A curva de correlação para a banda do vermelho mostra um comportamento mais robusto até os valores de reflectância de 1500, do sensor MODIS, nesse comprimento de onda. A partir desse valor, os dados apresentam uma saturação. Da

mesma forma a curva de correlação para a banda do infra-vermelho apresenta uma boa correlação, porém sem apresentar uma saturação. Essa característica mostra que uma boa maneira de estimar a concentração de sedimentos da curva de correlação definida para as bandas MODIS é usar a equação definida pela correlação do vermelho para valores de reflectância MODIS até 1500, na banda do vermelho e, para os valores acima de 1500 nessa banda será utilizada a equação definida pela curva do infravermelho. Para tanto serão utilizadas as seguintes equações:

Para o comprimento de onda do vermelho:

$$MES = 1,2489e^{0,0022 \text{ refMODIS}} \quad (31)$$

Para o comprimento de onda do infra-vermelho:

$$MES = 0,0046 \times \text{refMODIS}^{1,2147} \quad (32)$$

onde,

- ✓ *MES* é a concentração do material em suspensão;
- ✓ *refMODIS* é a reflectância do sensor MODIS.

5.3.3 - Validação das concentrações estimadas a partir dos dados MODIS

Os padrões de entrada de sedimentos nos braços do reservatório detectados por satélite são difíceis de validar porque não existe um banco de dados de valores de concentração de sedimentos dentro do reservatório.

Portanto, para validar os dados de concentração estimados pelo sensor MODIS foi feita uma comparação entre os dados estimados e os dados levantados nas campanhas de campo. Para tanto, foi comparado os valores médios mensais estimados pelo MODIS para os mesmo período das campanhas. Para as campanha de março de 2012 no braço do Indaiá e de março de 2013 nos braços do São Francisco, foi utilizado o valor médio do mês de março para toda a série histórica do sensor MODIS, e para a campanha de janeiro de 2012 foi utilizado o valor médio do mês de janeiro, também para a série histórica MODIS. A comparação entre os padrões espaciais registrados no campo e determinado por satélite é considerada como uma primeira validação dos resultados obtidos com as imagens MODIS.

Para comparar o valor das máscaras com os valores dos pontos de coleta foi estabelecida uma relação de distância em quilômetros, para os dados comparados, calculados com o software ArcGis 10. A distância entre os pontos foi calculada de maneira direta, ou seja, apenas medindo as distâncias entre cada ponto. Para as máscaras

foi utilizado o centroide de cada polígono, e posteriormente calculada a distância entre os centroides.

Os gráficos da figura 58 mostram as comparações entre os valores de concentração mensurados e estimados.

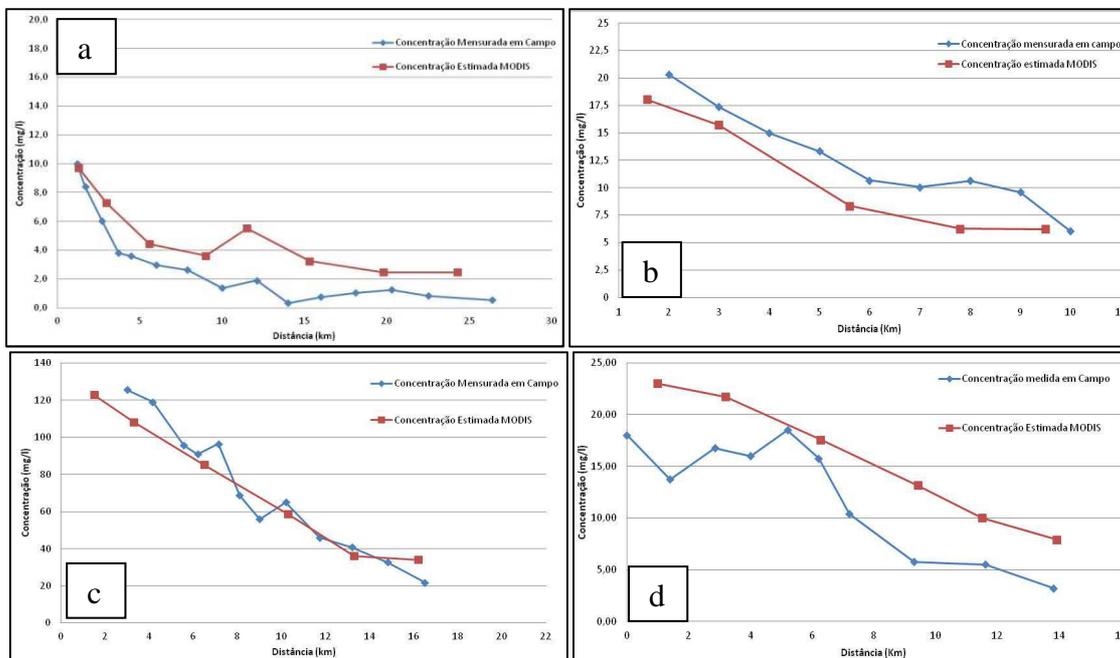


Figura 58 - Comparação entre as concentrações mensuradas em campo e estimadas pelo sensor MODIS para as campanhas de março de 2012 no Indaiá (a), janeiro de 2013 no Indaiá (b), março de 2013 no São Francisco e março de 2013 no Paraopeba.

Os dados estimados a partir do sensor MODIS mostram uma coerência significativa com a medição de concentração *in situ*, a pesar das diferenças em termos de valores absolutos. Essa diferença dos valores pode estar associada as condições hidroclimáticas de cada período de levantamento de campo. Pode se perceber através dos gráficos da figura 58 que o satélite consegue acompanhar muito bem a variação espacial das concentrações ao longo dos perfis levantados, mesmo não registrando algumas variações registradas nos dados de campo, como pode ser visto nos gráficos "c" e "d" da figura 58.

Dessa maneira, pode se considerar como um ótimo resultado o fato do que as imagens do sensor MODIS mostram a capacidade de acompanhar o padrão de variação das concentrações numa extensão menor do que 5 km.

5.4 - Análise da dinâmica de fluxos de sedimento no reservatório

O resultado das análises de dinâmica de fluxos no reservatório estão divididos em dinâmica espacial e dinâmica temporal.

5.4.1 - Dinâmica Temporal

A resposta do comportamento temporal das concentrações estimadas a partir da reflectância, ao longo dos braços do analisados, possibilita entender alguns processos do comportamento da entrada do fluxo de sedimentos. As figuras 59, 60 e 61 apresentam médias mensais para cada máscara analisada nos braços do Indaiá, São Francisco e Paraopeba, respectivamente.

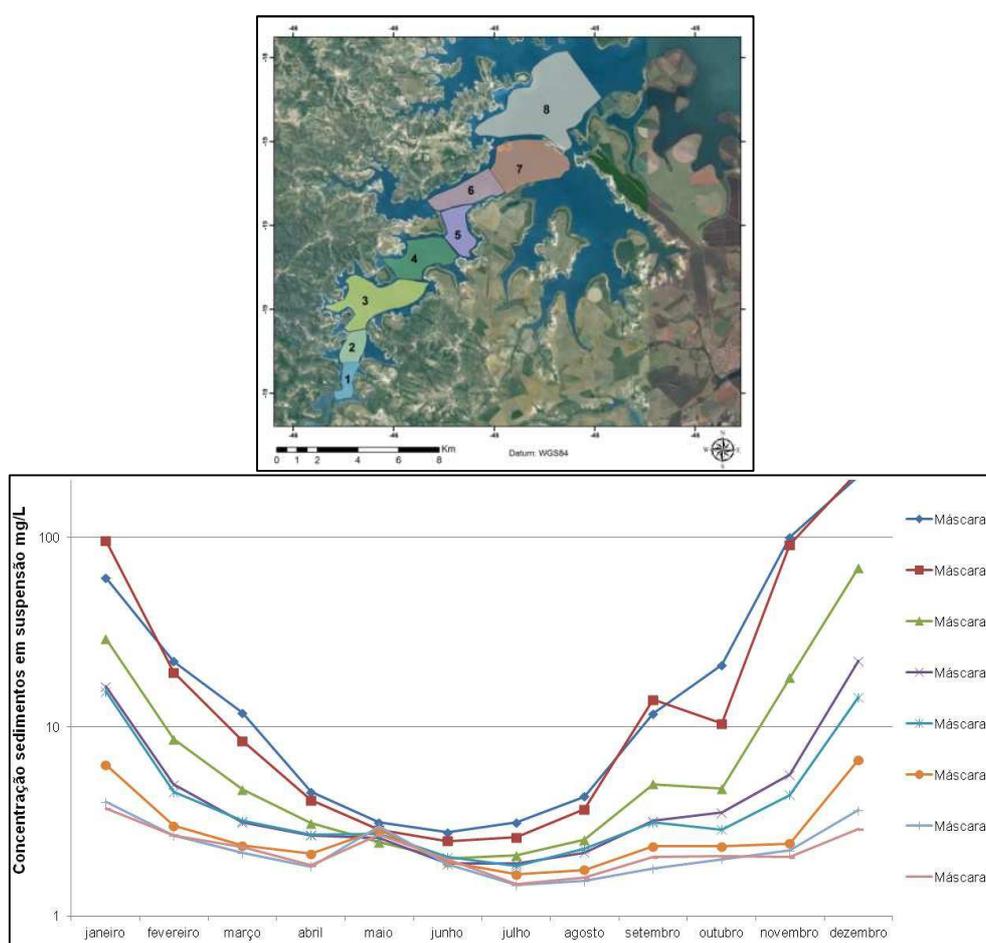


Figura 59 - Variação temporal dos valores de concentração estimados por máscara de análise no braço do Indaiá.

As médias estimadas de concentração de sedimentos possibilitam observar que: existem fortes valores de concentração nos meses de chuva, principalmente nas 2 primeiras máscaras e o gradiente espacial de concentração é maior nos meses de chuva (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro). Nas máscaras 5, 6, 7 e 8 pode ser observado um aumento dos valores médios de concentração no mês de maio.

Esse fato mostra a possibilidade de registrar com dados de satélites possíveis fenômenos de aporte de sedimentos dentro do reservatório que possam vir a colaborar com o assoreamento e não são registrados pelas estações de monitoramento nos rios.

A variação temporal no braço do São Francisco é apresentada na figura 60. Como observado no braço do Indaiá, os valores altos de concentração ocorrem no período de chuvas mais intensas. O São Francisco é caracterizado por valores maiores de concentração do material em suspensão.

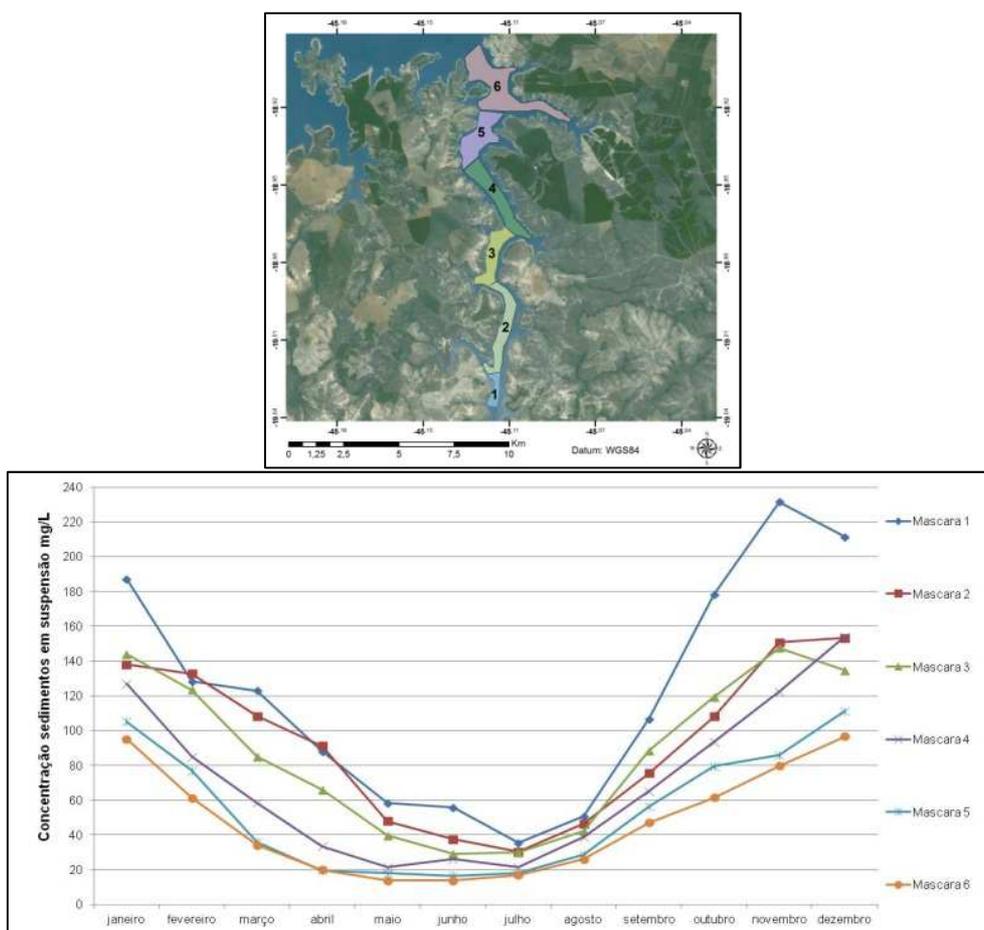


Figura 60 - Variação temporal dos valores de concentração estimadas por máscara de análise no braço do São Francisco.

A máscara quatro apresenta um leve aumento na concentração entre os meses de maio e junho. A partir do mês de julho os valores começam a aumentar, porém isso acontece de forma mais abrupta a partir do mês de setembro. Entre os meses de novembro e dezembro tanto a máscara 1 quanto a máscara 3 apresenta uma queda no valor de concentração.

No braço do Paraopeba (figura 61), o comportamento sazonal é marcado, mais uma vez, pela período de chuvas intensas, com maiores valores de concentração ao

longo do reservatório. Os valores de concentração no período de seca diminuem consideravelmente e mostram bastante estáveis nessa época do ano.

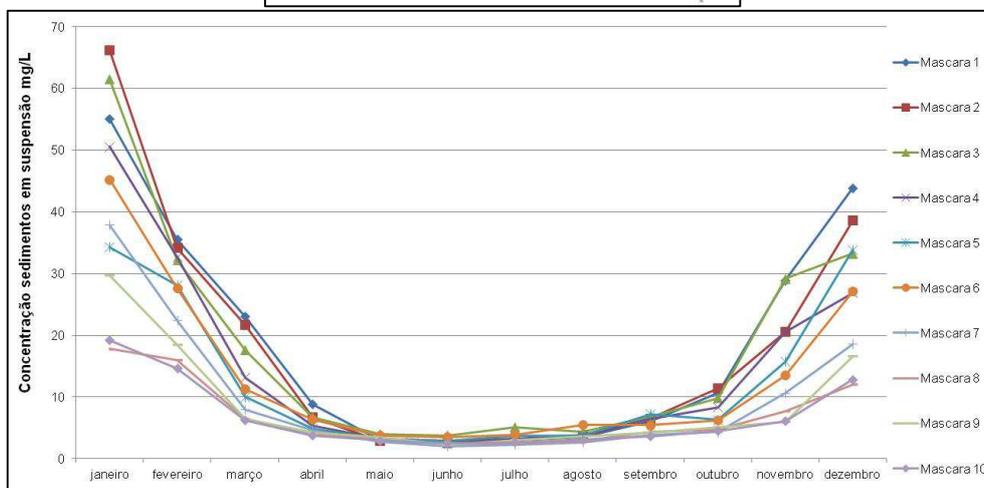
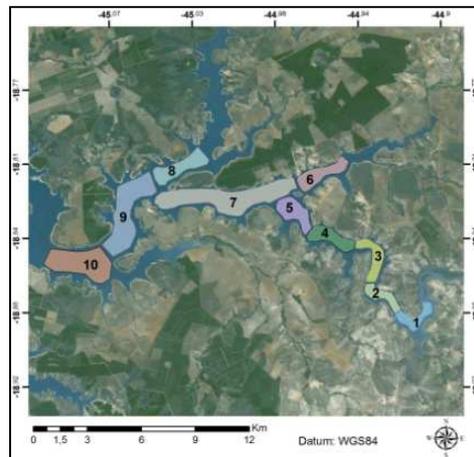


Figura 61 - Variação temporal dos valores de concentração estimadas por máscara de análise no braço do Paraopeba.

5.4.2 - Dinâmica Espacial

Para estudar a variação espacial da dispersão da pluma de sedimentos no reservatório foram analisadas a variação das médias mensais para cada máscara de análise. Os resultados mostram a variação da concentração estimada por satélite em função da distância ao longo do perfil analisado pelas máscaras (figuras 62, 63 e 64).

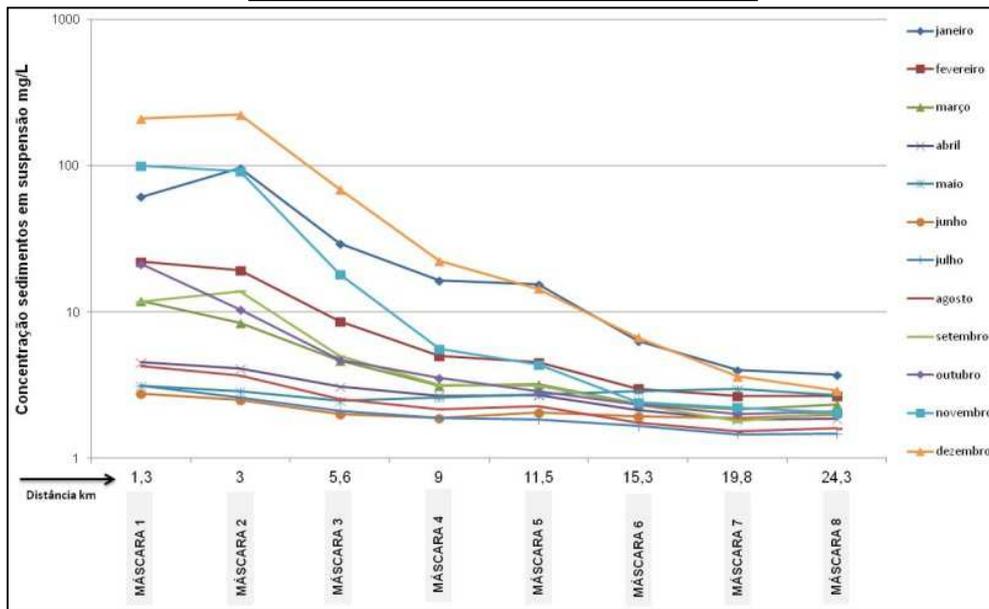
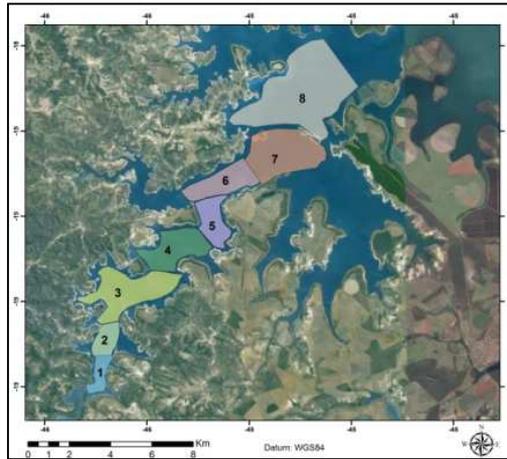


Figura 62 - Variação espacial da medias mensais dos valores de concentração estimadas por máscara de análise no braço do Indaiá.

No braço do Indaiá pode se observar que os valores altos de concentração se dispersam ao longo dos primeiros três quilômetros, no período de chuvas mais intensas. Do quilômetro três em diante as concentrações passam a diminuir, caracterizando um possível depósito do material em suspensão. No período de seca, as concentrações se mostram bastante estáveis, não variando de maneira significativa até o último trecho analisado, vinte e quatro quilômetros adiante.

No braço do São Francisco (figura 63), para o período de chuvas intensas, a concentração é alta e diminui até o quilômetro três, máscara 2. Nesse braço é possível observar concentrações em torno de 100 mg/l até o mês de abril, nos três primeiros quilômetros.

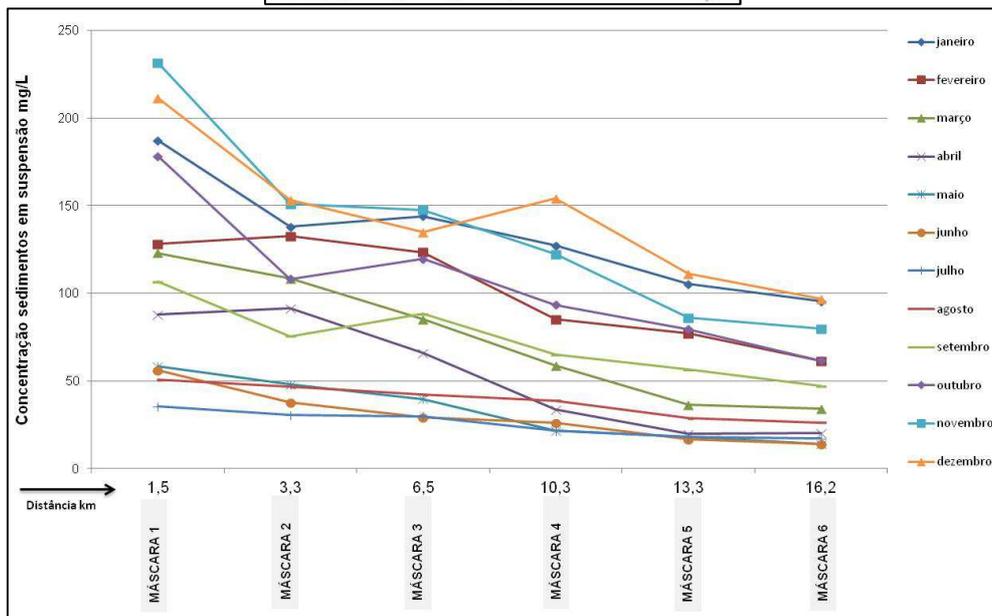
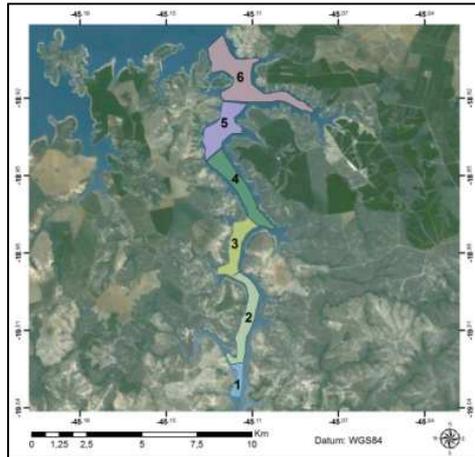


Figura 63 - Variação espacial da médias mensais dos valores de concentração estimadas por máscara de análise no braço do São Francisco.

Pode se observar também um aumento no mês de junho entre as máscaras 3 e 4. No mês de setembro esse aumento se dá entre as máscaras 2 e 3.

No Paraopeba a curva referente ao mês de janeiro apresenta um aumento na concentração estimada entre a máscara 1 e 2 e o mesmo acontece entre as máscaras 5 e 7. Cabe ressaltar que o gráfico mostra apenas as máscaras do perfil longitudinal principal do reservatório sem considerar as máscaras 6 e 8, que são pequenos braços do reservatórios, alimentado por pequenas bacias hidrográficas.

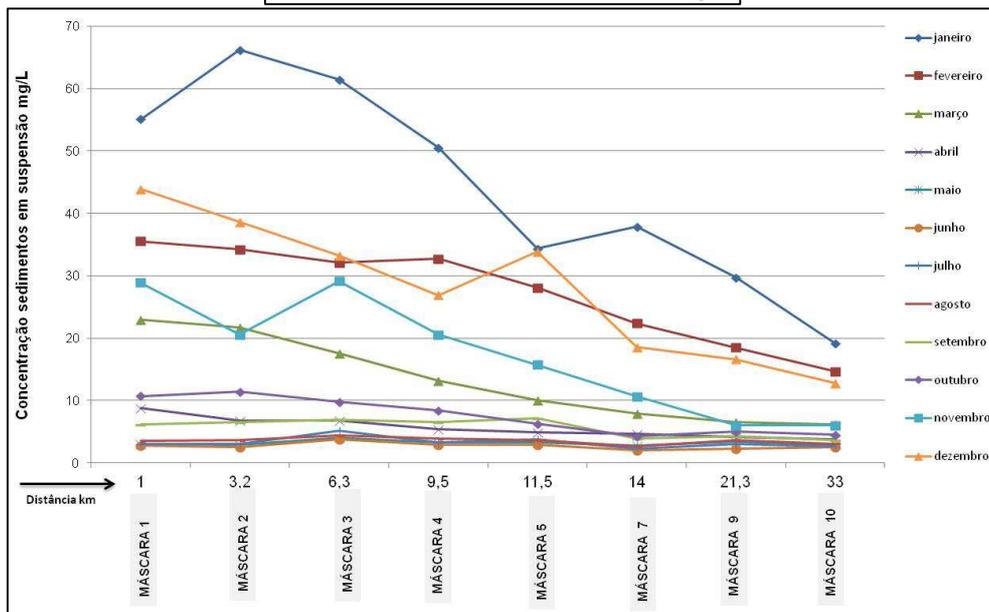
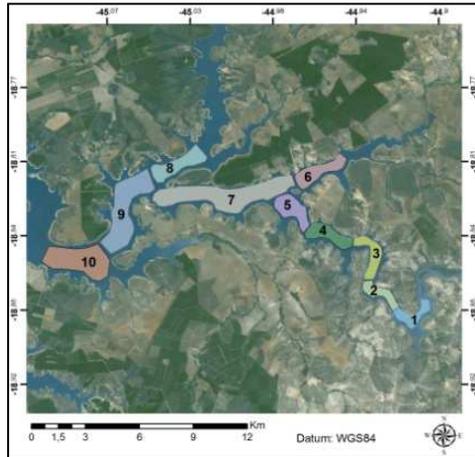


Figura 64 - Variação espacial da medias mensais dos valores de concentração estimadas por mascara de análise no braço do Paraopeba.

No mês de dezembro também é observado um aumento nos valores de concentração entre as máscaras 4 e 5, o mesmo acontecendo para o mês de novembro nas entre as máscaras 2 e 3.

No período de seca as baixas concentrações estimadas apresentam um comportamento estável, sem alterações significativas ao longo do perfil analisado.

Conclusões

De acordo com os objetivos propostos por esta pesquisa, as conclusões podem ser analisadas sobre dois pontos de vista: o primeiro se refere aos resultados alcançados; e em segundo, a proposta metodológica de integração de dados para atingir os objetivos da tese, e do projeto de pesquisa no qual ela está inserida, e responder os questionamentos a cerca da hipótese de trabalho.

A hipótese de trabalho formulada para essa pesquisa de doutorado foi testar a possibilidade de uma análise das variações, tanto ao longo do tempo quanto ao longo do espaço, da concentração do material em suspensão no reservatório de Três Marias, utilizando como fontes de informação as propriedades ópticas da água e o uso sistemático de dados do sensor MODIS.

A partir dos resultados atingidos durante a pesquisa pode se afirmar que:

- A área de trabalho definida apresentou uma diversidade de tipos de água. Esse fato proporcionou a obtenção de uma variedade de parâmetros que foi fundamental para a qualidade dos resultados obtidos.
- O produto de reflectância de superfície (MOD09 e MYD09) mostrou-se muito eficiente para estudar os fluxos de sedimento no reservatório, corroborando com as análises dos dados obtidos *in situ*. Pode se constatar uma robusta correlação entre os dados de do sensor MODIS com a espectrorradiometria de campo e concentração do material em suspensão medidos nas campanhas de campo;
- O uso de espectrorradiometria de campo de acordo com os protocolos de medição *in situ* utilizados nesse trabalho se mostraram bastante eficazes na determinação das propriedades ópticas (POI e POA) das águas no reservatório de Três Marias;
- As propriedades ópticas da água se mostram como um parâmetro bastante eficaz para estimar a concentração do material em suspensão e caracterizar a presença de constituintes opticamente ativos no corpo d'água. Além da possibilidade de calibrar as respostas espectrais do sensor MODIS para fins de estimativas de concentração e identificação dos componentes opticamente ativos na água do reservatório;
- O algoritmo MOD3R é uma ferramenta automatizada muito eficiente para a aplicação de dados do sensor MODIS para fins de monitoramento das variações

espaciais e principalmente temporais, devido a excelente capacidade de processamento de dados (mais de 500 imagens da área de estudo) e automatização do processo.

- As vantagens oferecidas pelo algoritmo MOD3R e a integração com os dados levantados *in situ* permitiram uma constatação bastante satisfatória do comportamento sazonal da entrada e dispersão da pluma de sedimentos no reservatório. Em alguns trechos foi possível identificar aporte de sedimentos no reservatório não detectados pelas estações de monitoramento nos tributários. A validação dos dados mostra a vantagem de utilização das técnicas apresentadas para entender a variabilidade da pluma de sedimentos dentro do reservatório.

Diante dos resultados analisados na pesquisa pode se afirmar que a proposta metodológica, tanto em termos de protocolos de medição em campo, quanto em termos de integração dos dados, atingiu os objetivos definidos na tese, além de responder de maneira afirmativa a hipótese de trabalho formulada.

Recomendações

Levando em consideração os resultados obtidos, algumas recomendações podem ser feitas para a continuidade dessa linha de pesquisa

As primeiras recomendações são referentes às necessidades observadas durante a pesquisa para definir uma proposta metodológica com aplicações mais abrangentes. Para estimativas mais eficientes há necessidade de se coletar mais elementos amostrais, i.e., obtenção de variáveis limnológicas adicionais, tais como carbono orgânico dissolvido e fitoplâncton para obtenção de resultados mais concludentes no que diz respeito a interpretação das propriedades ópticas, além da necessidade de se fazer um estudo sazonal do ambiente em estudo.

Recomendar-se também caracterizar o material em suspensão em termos de granulometria e mineralogia para obter um melhor entendimento da influência desse constituinte opticamente ativo nas propriedades ópticas da água do reservatório.

Algumas análises de granulometria e mineralogia já foram realizadas, porém ainda se mostram incipientes para subsidiar um melhor entendimento do comportamento espectral da água e, portanto, carecem de uma maior quantidade de análises.

Também seria interessante correlacionar as concentrações de sedimentos nas profundidades amostradas com as medições de espectrorradiometria de campo que são feitas em subsuperfície, tais como coeficiente de atenuação vertical da luz e reflectância volumétrica.

O grupo de pesquisa pretende continuar com os estudos que relacionam a utilização de sensores remotos para o monitoramento da qualidade das águas continentais em diferentes escalas. Para tanto se sugere o uso de outros sistemas sensores orbitais e veículos aéreos não tripulados. No que se refere ao uso de outros sistemas sensores, pretende-se analisar os limites das resoluções espaciais, temporais, radiométricas e espectrais para fins de estimativas dos COA em corpos d'água de dimensões variáveis.

Há também o interesse em elaborar uma biblioteca espectral dos diferentes tipos de águas continentais e testar análise de curvas espectrais (remoção de contínuo entre outras) para identificar as assinaturas espectrais das águas e os componentes nela misturados de maneira mais detalhada.

No que diz respeito as propriedades ópticas das águas novas possibilidades estão surgindo devido a aquisição, por parte do projeto, de mais um espectrorradiômetro da família TRIOS - RAMSES. Esse equipamento, denominado OSCAR, é um sensor capaz de medir o coeficiente de absorção da água. Trata-se de um espectrorradiômetro ativo que trabalha no intervalo espectral entre 360 e 750 nm com uma acurácia de 0,5nm (figura 65).



Figura 65 - Espectrorradiômetro OSCAR - TRIOS RAMSES

Na campanha de 2013 já foram analisadas algumas amostras de absorção dos compostos dissolvidos na água e dos elementos totais (mistura água mais constituintes). Porém este é um sensor recém adquirido, bastante novo e ainda não se definiu um protocolo de medição adequado. A equipe está em fase de pesquisa sobre as medições com esse novo equipamento. A empresa fabricante também não tem um protocolo de medição definido e tem trocado experiências com a equipe a fim de entender a melhor maneira de analisar as propriedades de absorção dos COA por meio das medidas com o OSCAR.

Quanto a aplicação em estudos dinâmicos a metodologia proposta foi capaz de constatar variações no comportamento do corpo d'água. Porém a constatação gera a expectativa de entender os fenômenos ambientais que se integram nos mais diversos processos. Por exemplo, os picos de aumento apresentados nas análises de dinâmica espacial nos braços monitorados podem ser explicados por meio da relação entre fenômenos que ocorrem na bacia, como manejo de solos em área de cultivo e escoamento superficial proveniente das margens do reservatório.

O que se recomenda agora é uma análise integrada com dados de uso do solo na bacia hidrográfica, escoamento superficial entre outros parâmetros que atuam de maneira integrada nos processos de geração, transporte e deposição de sedimentos em

reservatórios. Com isso, além de se constatar a dinâmica de fluxos pode ser possível entender os fatores que influenciam na variações sazonais e espaciais dos dados.

As próximas etapas dessa pesquisa envolvem:

- Estabelecer uma relação entre a série histórica (descarga líquida e descarga sólida) monitorada nas estações instaladas nos tributários do reservatório com o comportamento da pluma de sedimentos estimados por satélite.
- Avaliar os regimes de precipitação na bacia e sua influência com a hidrologia da bacia;
- Testar a possibilidade de uso das informações estimadas por sensores remotos como dados de *input* em modelos hidrológicos e limnológicos.

Referências Bibliográficas

ADAMS, J.B., SABOL, D. E., KAPOV, V., FILHO, R.A, ROBERTS, D.A., e SMITH, M. O., 1995, **Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to land-cover change in the Brazilian Amazon**: Remote Sensing of Environment v. 52, p. 137-154.

ALCÂNTARA, E. H. **Análise da turbidez na planície de inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/TERRA**. 2006. 220 p. (INPE-14621-TDI/1200). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do Rio São Francisco** /Agência Nacional de Águas, Superintendência de Usos Múltiplos. Brasília, v. 3, n. 10, p. 1-15, out. 2008.

ANDERSON, L.O.; LATORRE, M.L. SHIMABUKURO, Y.E.; ARAI, E. e CARVALHO JÚNIOR, O.A. **Sensor MODIS: uma abordagem geral**. São José dos Campos: INPE, 2003.

ATKINSON, P. M. **Optimal ground-based sampling for remote sensing investigations: estimating the regional mean**. International Journal of Remote Sensing, v. 12, p. 559-657, 1991.

AUSTIN, R. W. 1974. **The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface**, p. 317-344. In N. G. JERLOV e E. STEEMANN NIELSEN [eds.], Optical aspects of oceanography. Academic.

BARBOSA, C.C.F. **Sensoriamento remoto da dinâmica de circulação da água do sistema planície de Curuaí/ Rio Amazonas**. 2005. 282 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

BARKER, J.L.; HARDEN, M.K.; ANUTA, E.A.; SMID, J. e HOUGHT, D. **MODIS spectral sensitivity study: requirements and characterization**. Washington: Nasa, Oct, 1992, 84p.

BARNES, W.L.; PAGANO, T.S.; SALOMONSON, V.V. **Pre-launch characteristics of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1**.

IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v.36, n.4 , July, p.1088-1100, 1999.

BRASIL. (2002). **Plano Diretor de Recursos Hídricos das Bacias de Afluentes do Rio São Francisco em Minas Gerais**. MMA, SRH, Seapa/MG, Ruralminas, Semad/MG e Igam, Brasília-DF.

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.

BUKATA, R. P.; JEROME, J. H.; KONDRATYEV, K. y.; POZDNYAKOV, D. V. **Optical properties and remote sensing of inland coastal water**. Florida, CRC Press, 1995.

CETESB - **variáveis da qualidade da água: Governo do Estado de São Paulo**. Disponível em:<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp#topo>. Acesso em: 15 jun. 2007.

CARVALHO N. O. FILIZOLA N. P., SANTOS P.M.C. dos, LIMA J.E.F.W. 2000. **Guia de Avaliação de assoreamento de reservatórios**. ANEEL, Brasília, 132p.

CARVALHO, N.O. (2001). **Produção de Sedimentos em Função da Variabilidade Climática: O Estudo de Caso da Área Contribuinte ao Reservatório de Três Marias, Região do Alto São Francisco**. Projeto BRA/00/029, ANEEL, PNUD, CT Brasil, Brasília, DF, 51p

CARVALHO, J. C.; BARBOSA, C. C.; NOVO, E. M. L. M.; MANTOVANI, J. E.; MELACK, J. M.; PEREIRA FILHO, W. **Applications of quantitative analysis techniques to monitor water quality of Curuai Lake, Brazil**. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2003, Toulouse, France.

CHEN, Z.; Hu, C.; MULLER-KARGER, F. **Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery**. Remote Sens. Environ. 2007, 109, 207-220.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. (Brasil) **Projeto Análise de Consistência de Dados Pluviométricos – Bacia do Rio São Francisco. Sub-Bacias 40 a 44: Relatório Técnico Parcial. Sub-Bacia 40**. Belo Horizonte, DNAEE/CPRM, 1995a, 3v.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. (Brasil) **Projeto Análise de Consistência de Dados Pluviométricos – Bacia do Rio São Francisco. Sub Bacias 40 a 44: Relatório Técnico Parcial. Sub-Bacia 41.** Belo Horizonte, DNAEE/CPRM, 1995b, 3v.

CORAZZA, R. **Relacoes entre variaveis espectrais e limnologicas no Reservatorio da Usina Hidreletrica Dona Francisca – RS.** 2010. 103f. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

CURRAN, P.J, HANSOM J.D, PLUMRNER S.E; PEDLEY MI. **Multispectral remote sensing of nearshore suspended sediments: a pilot study,** International Journal of Remote Sensing, 8:103-112, 1987.

CURRAN, P.J., e NOVO, E.M.M., 1988, **The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review:** Journal of Coastal Research, v. 4, p. 351-368.

DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing.** 240 p. Thesis – University of Amsterdam, 1993.

DEKKER, R. J. V.; PETERS S. W. M., **Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data.** International journal of remote sensing, v. 23, 15-35. 2002

DEMETRIADES-SHAH, T.D. et al. 1990. **High resolution derivative spectra in remote sensing.** Remote Sens. Environ. 33: 55-64.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (2006). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 306p.

ENNER, H.A.; NOVO, E. M.; STECH J.L. (Org.): **Novas tecnologias para o estudo de reservatórios hidrelétricos e grandes lagos.** 125 ed. São José dos Campos.: Parênteses. 2011.v. 1, p. 1-95.

ENNES, R.; REJANE, M.L.B.T.: **Simulação espectral de dados multiespectrais do comportamento espectral de um corpo d'água a partir de dados hiperespectrais.** In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010 p. 001 - 006

ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

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.

FERREIRA, A.B.; PEREIRA FILHO, W.: **Avaliação da refletância espectral de corpos d'água em santa maria-rs por meio de espectrorradiometria de campo**. In: geo-ambiente online, ISSN 1679-98860, Jataí-GO n.13 jul-dez/2009.p194 - 207.

FICHTELMANN, B. **Automação de SR com Base num Exemplo de Monitoramento Operacional de Clorofila no Mar Báltico**. In.: BLASHKE, T.; KUX, H. (Orgs.). **Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores: metodos inovadores**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, p. 253-262.

FRANZ, B.A.; KWIATKOWSKA, E.J.; MEISTER, G.; MCCLAIN, C.R. **Utility of MODIS-Terra for Ocean Color Applications**. SPIE, v. 6677, 2007.

FROIDEFOND, D, e DOXARAN, D., 2004, **Téledétection optique appliquée à l'étude des eaux côtières: Téledétection**, v. 4, p. 579–597.

GIARDINO, C., BRANDO V.E, DEKKER A.G, STRÖMBECK N., CANDIANI G. 2007. **Assessment of water quality in Lake Garda (Italy) using Hyperion**. Remote Sensing of Environment 109. Pp. 183–195

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

GOODIN, D. G.; HAN, L.; FRASER, R. N.; RUNDQUIST, C.; STEBBINS, W. A.; SCHALLES, J. F. **Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra**. Photogramm. Eng. Remote Sensing, v.59, n.4, p.505-510, 1993.

GORDON, H. R., 1973, **Simple calculation of the diffuse reflectance of the ocean: Applied Optics**, v. 12, p. 2803-2804.

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

HELLER, L.; PÁDUA, W. L. de. **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 859 p.

IOCCG.. **Remote sensing of inherent optical properties: fundamentals, tests of algorithms, and applications**. 2006. 126 p. (5).

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

JERLOV, N. G., 1976, **Marine Optics: Elsevier Scientific Pub**: Amsterdam, 231 p.

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.

JUSTICE, C.O., TOWNSHEND, J.R.G., VERMOTE, E.F., MASUOKA, E., WOLFE, R.E., e SALEOUS, N., 2002, An overview of MODIS land data processing and product status: *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 3-15.

KAMPEL, M.; LORENZETTI, J.A.; BENTZ, C.M.; NUNES, R.A.; PARANHOS, R.; RUDORFF, F.M.; POLITANO, A.T. **Simultaneous measurements of chlorophyll concentration by Lidar, fluorometry, abovewater radiometry, and ocean color MODIS images in the Southwestern Atlantic**. *Sensors*. v. 9, p. 528-541, 2009

KIRK, J. T. O., 1991, **Volume scattering function, average cosines, and the underwater light field**,: *Limnology and Oceanography*, v. 36, p. 455-467.

KIRK, J. T. O., 1981, **A Monte Carlo study of the nature of the underwater light field in, and the relationships between optical properties of, turbid yellow waters**: *Australian Journal of Marine & Freshwater Research*, v. 32, p. 517-532.

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

KAMPEL, M.; 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.

- LANNA, A.E.; **Gestão dos Recursos Hídricos**. In: Tucci, C.E.M.. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2007. Cap. 19, p. 728- 768.
- 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.
- LEWIS, J. **Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation**. Water Resour, Arcata, v.32, n.7, p.2299-2310, 1996.
- LEWIS, J. E EADS, R. **Automatic real-time control of suspended sediment sampling based up on high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity**. In: Proceedings.Federal Interagency Workshop: Sediment Technology for the 21st Century. St. Petersburg, FL, February 17-19. 1998.
- LIU, Y.; ISLAM, M. A.; GAO, J. **Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing**. Progress in Physical Geography, v. 27, n. 1, p. 24-43, 2003.
- LOBO, F. L., **Biblioteca espectral: determinação de espectros de referência para a classificação de tipos de águas das areas alagáveis da Amazônia**, São José dos Campos INPE, 2009. 129p. ; (INPE-15748-TDI/1493) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)
- LOUREIRO, D. D. T. **Métodos atuais e novas tecnologias para o monitoramento do transporte de sedimentos em rios: necessidade de dados e incertezas envolvidas**. 2008. 91p.. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.
- MACEDO. I.L. **Estudos de modelos em ambiente de geoprocessamento para previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: O caso da bacia do rio Indaiá - UHE Três Marias, MG**. 2009. 340 f. Tese (Doutorado) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2009.
- MANGIAROTTI S., MARTINEZ J.M., BONNET, M.P., BUARQUE D., FILIZOLA N. and MAZZEGA P.. **Discharge and Suspended Sediment Flux Estimated along the Mainstream of the Amazon and the Madeira Rivers (from in situ and MODIS**

Satellite Data). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, in press

MARTINEZ, J.M., MAURICE-BOURGOIN, L., MOREIRA-TURCQ, P., e GUYOT, J. L., 2004, **Use of MODIS and MERIS data for the water quality monitoring of Amazonian rivers and floodplain lakes:** LBA Third International Conference.

MARTINEZ, J.M., GUYOT, J.L., FILIZOLA, N., e SONDAG, F., 2009, **Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data:** *Catena*, v. 79, p. 257-264.

MARTINEZ, J. M., ESPINOZA, R., COCHONNEAU, LE HESRAN,E., GUYOT, J. L., Submetido. **Surface water quality monitoring of rivers with MODIS data - Application to the Amazon River:** *Remote Sensing of Environment*.

Meneses P.R e Almeida T. - **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto** - Editora UNB (2012). Brasília

MENESES, P. R. **Fundamentos de radiometria óptica spectral.** In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (orgs). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais.** Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. p. 15-39.

MERTES, L.A.K., Smith, C.T., e ADAMS, J.B., 1993, **Estimating Suspended Sediment Concentrations in Surface Waters of the Amazon River Wetlands from Landsat Images:** *Remote Sens. Environ.*, v. 43, p. 281- 301.

MILLER, R. L. & MCKEE, B. A., **Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentration of total suspended matter in coastal waters,** *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 93, 259-366.

MOBLEY, C. D., 1999, **Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements:** *Applied Optics*, v. 38, p. 7442-55.

MOLLERI, G. S. F. *et al.* **Comparação entre as respostas espectrais dos sensores modis/terra e wfi/cbers-2 para o monitoramento do material em suspensão na foz do rio Amazonas.** In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, Brasil: INPE, 2007. p. 977-984

MOREIRA, A .M. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação.** Ed Editora UFV, 3ª Ed., Viçosa MG, 2005.

- MOREL, A. e PRIEUR, L. 1977. **Analysis of variations in ocean color. Limnology and Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 709.
- MOREL A. e GENTILI B., 1993. **Diffuse reflectance of oceanic waters.II. Bidirectional aspects, Appl. Opt.** 32, 6864–6879.
- MOREL, A.; BÉLANGER, S.. **Improved detection of turbid waters from ocean color sensors information.** In: Remote Sensing of Environment , 2006102, 237–249.
- NASA, (2002). **MODIS web.** <Http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/MODIS/index.html> Acesso em dezembro 2012.
- NASCIMENTO, R. F. F.: **Utilização de dados MERIS e in situ para a caracterização bio-óptica do reservatório de Itumbiara, GO.** São José dos Campos: INPE, 2011.
- NELLIS, M.D., HARRINGTON, J.A., Wu, J., **Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir, Kansas: 1993** Geomorphology, Volume 21, Issues 3–4, January 1998, Pages 281-293
- NOVO, E. M. L. M. **Comportamento Espectral da Água.** In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (orgs). **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais.** Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. p.203-222.
- NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.C.F.; FREITAS, R.M.; SHIMABUKURO, Y.; MELACK, J.; PEREIRA-FILHO, W. Seasonal changes in chlorophyll distributions in Amazon floodplain lakes derived from MODIS images. **Japanese Journal of Limnology**, v. 7, n. 2, p. 1-7, August 2006.
- NOVO, E.M.L.M.; BARBOSA, C.; FREITAS, R.M.. **Sistemas aquáticos continentais.** In: RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Orgs.) **O Sensor MODIS e suas aplicações no Brasil.** São José dos Campos: A. Silva Vieira Ed., 2007. p. 265-275. Cap. 19
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** 4 ed. Edgard Blücher, 2010.
- NOVO, E.M.L.M.; TUNDISI, J.G.; **Sensoriamento Remoto de águas interiores: perspectivas.**In: V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto,1988, Natal. Anais.

São José dos Campos: INPE, 1988. p. 13-21. ISBN 978-85-17-00050-8. (INPE-4875-PRE/1486). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/marte@80/2008/07.22.18.18>>. Acesso em: 11 fev. 2013.

NOVO, E.M.L.M., HAMSOM, J.D., e CURRAN, P.J., 1989, **The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentrations**: International journal of remote sensing, v. 10, p. 1283- 1289.

NOVO, E. M. L. M.; SHIMABUKURO, Y. E. **Aplicação do modelo de mistura na decomposição do espectro de reflectância da água em espectros de seus componentes opticamente ativos: uma avaliação**. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1993, Curitiba. Anais. São José dos Campos: INPE, 1993. v.3, p.96-108. ISBN 978-85-17-000546. Disponível em: <http://urlib.net/rep/dpi.inpe.br/marte@80/2008/06.04.14.48?languagebutton=pt-BR>> Acesso em: 12 fev. 2013.

OLMANSON, L. G.; BREZONIK, P. L.; BAUER, M. E.: **Airborne hyperspectral remote sensing to assess spatial distribution of water quality characteristics in large rivers: The Mississippi River and its tributaries in Minnesota**. In: Remote Sensing of Environment. 130 (2013) 254–265

ONS - Operador nacional do Sistema Elétrico: **Previsão de vazões diárias ao reservatório de Três Marias usando a técnica de redes neurais** - Relatório Técnico. Brasil, 2012

PINTO, E. J. A.: **Estudo de indicadores climáticos para a previsão de longo termo de vazões na bacia do Alto São Francisco**– 2005. - Tese de Doutorado Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais 269p., Belo Horizontes - 2005.

PREISENDORFER, R.W., 1976. **Hydrologic Optics**, Vol 1-6. Washington, Dep. of Commerce.

QUIBELL, G. The effect of suspended sediment on reflectance spectra from freshwater algae. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 177-182, 1991.

ROBERTS, D.A., GARDNER, M., CHURCH, R., USTIN, S., SCHEER, G, GREEN, R. O., 1998, **Mapping chaparral in the Santa Monica mountains using multiple endmember spectral mixture models**: Remote Sensing of Environment, v.65, p.267-279.

RUDORFF, C. M. **Estudo da composição das águas da Planície Amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO1 e de espectrometro de campo visando a compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos.** 2006. 140f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

RUNDQUIST, D. C., HAN, L., SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. **Remote Measurement of Algal Chlorophyll in Surface Waters: The Case for the First Derivative of Reflectance Near 690 nm.** Photogramm. Eng. Remote Sensing. V. 62, n. 2, p. 192 – 200, Feb. 1996.

SATHYENDRANATH, S., e MOREL, A., 1983, **Light emerging from the sea: Interpretation and uses,** in Cracknell, A. P., ed., Remote Sensing Applications in Marine Science and Technology, Dordrecht, Reidel Publishing, p. 323-357.

SAUSEN, T. M. ; BITENCOURT, M. D.; **Estudo de qualidade d'água de reservatórios, utilizando técnicas de sensoriamento remoto: Conceitos metodológicos.**In: Simpósio Latino - Americano de Sensoriamento Remoto, 1986, Gramado.Anais. INPE/ SELPER/ SBC,1986.v.1.p.638-644. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte@80/2009/02.18.12.55/doc/156.pdf> ; Acesso em: 11 fev. 2013.

SPERLING, M. V. **Introdução á qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1996.

TUNDISI, J.G.; TUNDISI, T.M.;**Limnologia**,São Paulo:Oficina de Textos, 2008, 632p.

TRENTIN, A. B. **Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo do comportamento espectral da água no Reservatório Passo Real – RS.** 2009. 98f. Dissertação Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

UDY J, GALL M, LONGSTAFF B, MOORE K, ROELFSEMA C, SPOONER D.R, ALBERT S., Water quality monitoring: a combined approach to investigate gradients of change in the Great Barrier Reef, Australia.**In: Marine Pollution Bulletin Volume 51, Issues 1–4, 2005, Pages 224–238**

VALÉRIO, A.M. **O uso do sensoriamento remoto orbital e de superfície para o estudo do comportamento do corpo de água do reservatório do Manso, MT, Brasil.** Dissertação (Mestrado). INPE-16234-TDI/1551, São José dos Campos - SP, 2009.119p.

VIEIRA DA SILVA, R. C.; NOVO, E. M. L. e PECLY, J. O. G. (1999). **Potencialidades do uso de satélites para o monitoramento da concentração de sedimentos no rio Amazonas.** In: *Hydrological and Geochemical Process in Large Scale Rivers Basins*, Manaus, Dezembro.

VILLAR, R.E.; MARTINEZ, J.M.; FRAIZY P.; ARMIJOS, E.; CORDOBA, H.B.; CRAVE, A.; VAUCHEL, P.; CASIMIRO, W.L.: **Reconstrução de uma série histórica de sedimentos usando imagens de satélite MODIS nos rios da Amazônia peruana.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011, INPE p.5356 - 5363.

VILLAR, R. E.; MARTINEZ, J.M.; GUYOT, J.L.; FRAIZY, P. E.; ARMIJOS, E.; CRAVE, H.; BAZÁN, P. VAUCHEL; W. LAVADO (2012), **The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins**, Journal of Hydrology, Volumes 444–445, Pages 221-228, ISSN 0022-1694, 10.1016/j.jhydrol.2012.04.024.

VILLAR, R.E., J.M. MARTINEZ, M. Le TEXIER, J.L. GUYOT, P. FRAIZY, P. R. MENESES, E. de OLIVEIRA (in press), **A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images**, Journal of South American Earth Sciences, ISSN 0895-9811, 10.1016/j.jsames.2012.11.006.

VILLAR, R.E., **Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares na bacia amazônica a partir de imagens de satélite**, Tese de doutorado. Brasília, 2013. 229p. ; Instituto de geociências da Universidade de Brasília.

WACHHOLZ, F.; PEREIRA FILHO, W.; PEREZ FILHO, A. **Compartimentação aquática espectral dos reservatórios em cascata no alto Jacuí – RS.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 4929-4935.

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.