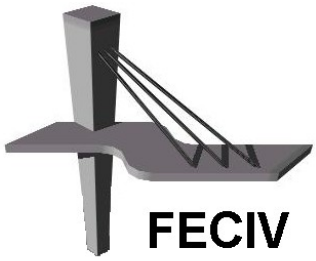
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO

MARCOS AUGUSTO MACEDO ARAÚJO VILELA



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil
Uberlândia

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Marcos Augusto Macedo Araújo Vilela

METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de Concentração: Engenharia Urbana

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

Uberlândia
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU – MG, Brasil

V699m Vilela, Marcos Augusto Macedo Araújo, 1985-
Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto [manuscrito] / Marcos Augusto Macedo Araújo. - 2010.
120 f. : il.

Orientador: José Eduardo Alamy.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Água - Qualidade - Teses. 2. Sensoriamento remoto - Teses. I. Alamy, José Eduardo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 628.16

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

FECIV

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 060/2009

CANDIDATO: Marcos Augusto Macedo Araújo Vilela

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho

TÍTULO: "Metodologia para monitoramento da qualidade da água de reservatórios utilizando sensoriamento remoto".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana

LINHA DE PESQUISA: Planejamento e Infra-estrutura Urbana

DATA DA DEFESA: 23 de agosto de 2010

LOCAL: Sala de Apoio I da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14:10 - 16:30

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às argüições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

(X) APROVADO

( ) REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof.ª Dr.ª Liliane Lazzari Albertin – UNESP/SP**

Membro: **Prof. Dr. André Luiz de Oliveira – FECIV/UFU**

Uberlândia, 23 de agosto de 2010.

A Carolina C Melo,
pelo apoio, compreensão,
amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Professor Doutor José Eduardo Alamy Filho pela orientação e compreensão durante todo o andamento da pesquisa.

Aos Professores Doutores Roberto Castanho, André Luiz de Oliveira e Liliane Lazzari Albertin por todas as sugestões e contribuições na bancas de qualificação e na defesa da dissertação.

À CEMIG e ao Professor Doutor Ricardo P. Coelho pelo apoio e colaboração com este trabalho. Ao Professor Doutor Rodrigo de Nóbrega (Sal) e a todos os amigos que contribuíram para a pesquisa.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os professores e colegas, em particular a secretária Sueli, que sempre pude contar com grande cooperação e apoio.

E principalmente aos meus pais, José Augusto e Marilda, minhas irmãs e familiares que sempre me acompanham e colaboram para meu crescimento pessoal e profissional.

"O futuro não é um lugar onde estamos indo, mas um lugar que estamos criando. O caminho para ele não é encontrado, mas construído e o ato de fazê-lo muda tanto o realizador quando o destino."

Antoine de Saint-Exupéry

Vilela, M. A. METODOLOGIA PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE RESERVATÓRIOS UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO. 106 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

RESUMO

A qualidade da água é um dos maiores desafios do homem no século XXI, manter a água doce disponível, limpa e potável é uma maneira de se garantir uma boa qualidade de vida. Obter meios de se monitorar a entrada de poluentes, agrotóxicos, esgotos domésticos e industriais, resíduos sólidos e sedimentos em reservatórios e outros ambientes aquáticos são essenciais para o funcionamento de usinas hidrelétricas e para reduzir custos nas etapas de tratamento da água. O sensoriamento remoto é uma tecnologia comprovada para analise espacial, podendo ser empregada para pesquisas de vegetação, solos, rochas, ocupação urbana e para o estudo da água. A partir da necessidade de se monitorar constantemente os ambientes aquáticos e da acessibilidade tecnológica, que torna o sensoriamento remoto uma ferramenta usual para planejadores e executores de projetos ambientais. Este trabalho propõe uma metodologia simples e acessível para se monitorar a qualidade da água de reservatórios, através da tecnologia de sensoriamento remoto. A presente pesquisa utilizou dados pontuais da literatura, acerca da qualidade da água no reservatório de São Simão, situado no baixo curso do Rio Paranaíba, nos quais amostras de água foram coletadas e ensaiadas nos anos de 2002, 2003 e 2004. Nesse contexto, foram analisados três parâmetros de qualidade da água: transparência, clorofila e turbidez. Esses dados foram comparados com as imagens do satélite Land-Sat 5 e Land-Sat 7 da área do reservatório nos mesmos meses das coletas. As imagens foram manipuladas em programas de geoprocessamento, selecionando as bandas do espectro eletromagnético mais adequadas para a análise de cada parâmetro. Dentro dessas bandas, foram estabelecidas faixas de níveis de cinza que foram correlacionadas com as análises da água. Os resultados obtidos foram usados para se estabelecer uma escala de classificação de imagens, que foi utilizada para monitorar alterações na transparência da água, presença de clorofila e turbidez no reservatório de São Simão em 2009. Como desdobramento da metodologia, a correlação entre níveis de cinza das imagens e os dados obtidos na literatura foi utilizada na previsão

da distribuição espacial dos parâmetros ao longo da área do reservatório. Os resultados revelam que a metodologia proposta constitui uma ferramenta interessante e de baixo custo para monitorar variações espaciais e temporais de transparência, concentração de clorofila e turbidez em reservatórios.

Palavras-chave: Monitoramento. Qualidade da Água. Sensoriamento Remoto.

Vilela, M. A. METHODOLOGY FOR MONITORING WATER QUALITY OF RESERVOIRS USING REMOTE SENSING. 106 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia 2010.

ABSTRACT

Water quality is one of the greatest challenges of the twenty-first century man, keep fresh water available, clean and safe water is one way to ensure good quality of life. Obtain means of monitoring the entry of pollutants, pesticides, industrial and domestic sewage, solid waste and sediments in reservoirs and other aquatic environments are essential to the operation of hydroelectric plants and to reduce costs in the stages of water treatment. Remote sensing is a proven technology for spatial analysis and can be used for surveys of vegetation, soil, rock, urban occupation and to study the water. From the need to constantly monitor the aquatic environment and accessibility of technology, which makes the remote sensing of a usual tool for planners and executors of environmental projects, this paper proposes a simple and affordable methodology for monitoring the water quality of reservoirs, through remote sensing technology. This research used data points from the literature, about the quality of water in the reservoir of San Simon, located in the lower course of Paraíba River, where water samples were collected and tested in the years 2002, 2003 and 2004. In this context, we analyzed three parameters of water quality: transparency, chlorophyll and turbidity. These data were compared with images from the satellite Land and Land-Sat 5-Mon 7 of the reservoir area in the same months of collections. The images were manipulated in GIS programs, selecting the bands of the electromagnetic spectrum more suitable for the analysis of each parameter. Within these bands were established bands of gray levels which were correlated with the analysis of water. The results were used to establish a rating scale of images, which was used to monitor changes in water transparency, presence of chlorophyll and turbidity in the reservoir of San Simon in 2009. As an extension of the methodology, the correlation between gray levels of images and data from the literature was used to predict the spatial distribution of parameters along the reservoir area. The results show that the proposed methodology is an interesting tool and inexpensive to monitor spatial and temporal variations of transparency, chlorophyll and turbidity in reservoirs.

Keywords: Monitoring. **Water Quality. Remote Sensing.**

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

%	Porcentagem
m	Metros
km	Quilômetros
m²	Metros Quadrados
km²	Quilômetros Quadrados
MW	Mega-Watts
°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrômetro
mg	miligramas
m³	Metros Cúbicos
W	Oeste
E	Leste
N	Norte
S	Sul

ABREVIATURAS

EIA	Estudo de Impactos Ambientais
RIMA	Relatório de Impactos Ambientais
LP	Licença Prévia
LI	Licença de Implantação
LO	Licença de Operação
CGH	Central de Geração Hidrelétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica

UHE	Usina Hidrelétrica
BIG	Banco de Informação da Geração
REM	Radiação Eletro Magnética
SR	Sensoriamento Remoto
ETM +	Enhanced Thematic Mapper Plus
GPS	Global Position System
UTM	Universal Transversa de Mercator
SAD69	South American Datum 1969
GLCF	Global Land Cover Facility
EUA	Estados Unidos da América

SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CEMIG	Companhia Energética do Estado de Minas Gerais
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PIB	Produto Interno Bruto
GO	Goiás
MG	Minas Gerais
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

Listas

Lista de figuras

Figura 1: Concentração das usinas hidrelétricas no Brasil nos anos de 1950 e 2000.....12
Figura 2: Espectro Eletromagnético.....19
Figura 3: Bandas espectrais do satélite Land-Sat.....20
Figura 4: Diferentes representações matriciais para um mapa.....24
Figura 5: Curvas de resposta espectral padrão da água, solo e vegetação.....26
Figura 6: Coeficiente de absorção da água pura.....28
Figura 7: Coeficiente de espalhamento da água pura.....29
Figura 8: Coeficiente de absorção da clorofila a diferentes concentrações.....30
Figura 9: Espectro de Absorção de Matéria Orgânica Dissolvida na Água.....31
Figura 10: Software ENVI - Georreferenciamento de imagens.....45
Figura 11: Software ENVI. Georreferenciamento de imagens.....46
Figura 12: Software ENVI. Definição de Regiões de interesse.....47
Figura 13: Software ArcGis. Sobreposição dos pontos de coleta.....47
Figura 14: Software ArcGis. Identificação dos valores de nível de cinza.....48
Figura 15: Software ArcGis. Identificação dos valores de nível de cinza.....49
Figura 16: Imagem Land-Sat-5 de Janeiro de 2003.....53
Figura 17: Tabela de Atributos de layer correspondente a área do reservatório da imagem de 09-07-2009.....56
Figura 18: Imagem Land-Sat-5 de Janeiro de 2004, banda 2 representando os pontos coletados em campo.....57
Figura 19: Escala de absorção de REM.....59
Figura 20: Localização dos pontos de coleta para transparência da água 60
Figura 21: Relação de transparência da água com comportamento espectral do reservatório.....60
Figura 22 – Relação entre valores numéricos de transparência e nível de cinza para a banda 1 62

Figura 23 Escala de absorção de REM para banda 1.....63
Figura 24: Relação de clorofila com comportamento espectral do reservatório 68
Figura 25: Localização dos pontos de coleta para clorofila 69
Figura 26: Relação entre concentração de clorofila e nível de cinza para a banda 2.....70
Figura 27: Escala de absorção de REM para banda 2.....71
Figura 28: Relação de turbidez com comportamento espectral do reservatório.....77
Figura 29: Distribuição dos pontos de coleta de turbidez.....78
Figura 30 – Relação entre níveis de cinza para a banda 3 e valores numéricos de turbidez da água.....79
Figura 31: Escala de absorção de REM para banda 3.....80
Figura 32 – Esquema da rede de pontos coletada na imagem e da transformação de níveis de cinza em parâmetro de qualidade da água.....86
Figura 33 – Curva de ajuste entre níveis de cinza e transparência.....87
Figura 34 – Classes de níveis de cinza da banda 1, para a imagem de junho de 2009. Esquema da área selecionada e da rede de pontos utilizada para aplicação da metodologia.....87
Figura 35 – Curvas de contorno com valores estimados de transparência e iso-superfícies de transparência.....88
Figura 36 – Curva de ajuste entre níveis de cinza e teores de clorofila 89
Figura 37 – Classes de níveis de cinza da banda 2, para a imagem de junho de 2009. Esquema das áreas selecionadas para estimativa de concentrações de clorofila.....90
Figura 38 – Redes de pontos onde foram coletados os níveis de cinza para a banda 2.....90
Figura 39 – Curvas de contorno com valores estimados de clorofila e iso-superfícies de concentração.....92
Figura 40 – Curvas de contorno com valores estimados de clorofila e iso-superfícies de concentração.....93
Figura 41 – Curva de ajuste entre níveis de cinza e turbidez da água 94
Figura 42 – Classes de níveis de cinza da banda 3, para a imagem de junho de 2009. Esquema da área selecionada e da rede de pontos utilizada para aplicação da metodologia.....95
Figura 43 – Curvas de contorno com valores estimados de turbidez e iso-superfícies de turbidez.....96
Figura 44 – Fluxograma que resume a metodologia proposta neste trabalho.....99

Lista de Quadros

Quadro 1: Informações morfométricas e hidrológicas sobre o reservatório de São Simão (MG/GO). Dados fornecidos pela CEMIG.....5
Quadro 2: Informações sobre as bandas espectrais do satélite Land-Sat. Fonte INPE.....21
Quadro 3:Resolução do Satélite Land-Sat 7. Fonte Embrapa 22
Quadro 4: Valores de clorofila-a coletados durante a pesquisa.....38
Quadro 5: Valores de cyanobactérias coletados durante a pesquisa.....39
Quadro 6: Valores de chlorophyta coletados durante a pesquisa.....39
Quadro 7: Valores de chrysophyta coletados durante a pesquisa.....40
Quadro 8: Valores de chryptophyta coletados durante a pesquisa.....40
Quadro 9: Valores de fitoplâncton coletados durante a pesquisa.....41
Quadro 10: Valores de sólidos totais coletados durante a pesquisa.....41
Quadro 11: Valores para turbidez coletados durante a pesquisa.....42
Quadro 12: Valores para transparência coletados durante a pesquisa.....43
Quadro 13– Níveis de Cinza na banda 1 da imagem de Abril de 2002.....49
Quadro 14– Níveis de Cinza na banda 2 da imagem de Abril de 2002.....50
Quadro 15– Níveis de Cinza na banda 3 da imagem de Abril de 2002.....50
Quadro 16– Níveis de Cinza na banda 1 da imagem de Agosto de 2002.....50
Quadro 17– Níveis de Cinza na banda 2 da imagem de Agosto de 2002.....51
Quadro 18– Níveis de Cinza na banda 3 da imagem de Agosto de 2002.....51
Quadro 19– Níveis de Cinza na banda 1 da imagem de Fevereiro de 2003.....52
Quadro 20– Níveis de Cinza na banda 2 da imagem de Fevereiro de 2003.....52
Quadro 21– Níveis de Cinza na banda 3 da imagem de Fevereiro de 2003.....52
Quadro 22– Níveis de Cinza na banda 1 da imagem de Janeiro de 2004.....53
Quadro 23– Níveis de Cinza na banda 2 da imagem de Janeiro de 2004.....54
Quadro 24– Níveis de Cinza na banda 3 da imagem de Janeiro de 2004.....54
Quadro 25 – Relação entre o intervalo espectral e os parâmetros medidos em campo.....58

Listas de Mapas

Mapa 1: Localização da Bacia do Rio Paraná e Usinas Hidrelétricas em Funcionamento.....6

Mapa 2: Localização da Bacia do Rio Paranaíba e Usinas Hidrelétricas em Funcionamento.....7
Mapa 3: Localização do Reservatório de São Simão 8
Mapa 4: Hidrografia e Distribuição dos Reservatórios e Lagos Naturais no Brasil em 1999.....13
Mapa 5: Localização dos pontos de coleta de amostras de água 36
Mapa 6: Absorção de REM na Banda 1 da Imagem Land-Sat 5 de 14/01/2009.....65
Mapa 7: Absorção de REM na Banda 1 da Imagem Land-Sat 5 de 22/05/2009.....66
Mapa 8: Absorção de REM na Banda 1 da Imagem Land-Sat 5 de 06/06/2009.....67
Mapa 9: Absorção de REM na Banda 1 da Imagem Land-Sat 5 de 09/07/2009.....68
Mapa 10: Absorção de REM na Banda 2 da Imagem Land-Sat 5 de 14/01/2009.....73
Mapa 11: Absorção de REM na Banda 2 da Imagem Land-Sat 5 de 22/05/2009.....74
Mapa 12: Absorção de REM na Banda 2 da Imagem Land-Sat 5 de 06/06/2009.....75
Mapa 13: Absorção de REM na Banda 2 da Imagem Land-Sat 5 de 14/01/2009.....76
Mapa 14: Absorção de REM na Banda 3 da Imagem Land-Sat 5 de 14/01/2009.....81
Mapa 15: Absorção de REM na Banda 3 da Imagem Land-Sat 5 de 22/05/2009.....82
Mapa 16: Absorção de REM na Banda 3 da Imagem Land-Sat 5 de 06/06/2009.....83
Mapa 17: Absorção de REM na Banda 3 da Imagem Land-Sat 5 de 14/01/2009.....84

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....01

1.2 OBJETIVOS.....02

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 03

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....09

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 10

2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL.....10

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS.....14

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO.....17

2.4 ALGUNS ESTUDOS ANTERIORES 32

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....35

3.1 COLETA DE DADOS.....35

3.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....43

CAPÍTULO 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....57

4.1 TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA.....59

4.2 CLOROFILA.....68

4.3 TURBIDEZ.....77

4.4 EXTRAPOLAÇÃO DA METODOLOGIA: ESTIMATIVA DE VALORES NUMÉRICOS APROXIMADOS DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA A PARTIR DA IMAGEM DO SATÉLITE 85

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....97

REFERÊNCIAS.....101

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No século XX, a utilização dos recursos naturais aumentou proporcionalmente ao incremento populacional. O funcionamento de cidades, pólos industriais e agricultura são dependentes do uso de água continental, sendo a manutenção da qualidade deste recurso imprescindível. Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2009), 97,5% da água disponível na Terra é salgada e 2,493% estão concentrados em geleiras ou regiões subterrâneas de difícil acesso; restando apenas 0,007% de água doce para o uso humano, disponível em rios, lagos, no subsolo e na atmosfera. O represamento, provocado pela construção de usinas hidrelétricas, embora regularize a vazão, torna esta água ainda mais vulnerável, no que diz respeito ao tempo de permanência de poluentes na massa líquida.

Segundo dados da ANA, de 2009, o Brasil detém 12% dos 0,007% de água doce disponível no mundo. Porém esta situação, apesar de parecer cômoda, é enganadora, pois 70% dessa água está na bacia amazônica, que possui apenas 7% da população. Na região Sudeste, que possui a maior concentração populacional (42,63%) dispõe-se de apenas 6% dos recursos hídricos, e a região Nordeste, que abriga 28,91% da população, dispõe apenas de 3,3%. Portanto, apenas 30% dos recursos hídricos brasileiros estão disponíveis para 93% da população.

Em 1995, um relatório do Banco Mundial já mencionava que cerca de 80 países, concentrando cerca de 40% da população mundial, já estavam sujeitos à escassez de água, com projeções de agravamento do quadro a partir do crescimento da população e do consumo humano, que duplica a cada 25 anos, aproximadamente.

Conservar a qualidade da água doce disponível para consumo é um desafio que está presente para todos. A despeito disto, a situação continua se agravando constantemente, com o afluxo de esgotos e outros poluentes em corpos hídricos e com desmatamentos da vegetação nativa, provocando assoreamentos de rios e reservatórios.

A exploração da água seja para fins de consumo humano, irrigação ou geração de energia, bem como o afluxo de nutrientes, sedimentos em suspensão, dentre outras substâncias, podem provocar desequilíbrios nos corpos hídricos. Ocorrem, atualmente,

campanhas de conscientização para o uso racional, evitando desperdícios e poluições em ambientes aquáticos, porém a demanda é crescente, e o afluxo de poluentes, seja por fontes difusas ou pontuais, não pode ser desprezado, todos estes fatores somados a má distribuição dos recursos tornou a água escassa em várias regiões do mundo. A demanda por energia elétrica e a conseqüente construção de barragens também são agentes que ocasionam transformações em corpos hídricos, tornando-os vulneráveis a alterações de sua constituição. Manter a qualidade da água em reservatórios é um desafio para os gestores de usinas, sendo necessário realizar medições constantes em diversos pontos do reservatório, visando a identificar locais sujeitos a alterações e mais propícios a impactos.

O monitoramento da qualidade da água é importante para se conhecer pontos problemáticos e o comportamento da dinâmica de um ambiente aquático. Nesse aspecto, trabalhos de campo são essenciais para coletar e analisar amostras de água visando à identificação dos agentes poluidores e à quantificação dos seus impactos. Todavia, estes trabalhos são dispendiosos e com elevado custo financeiro. Adicionalmente, considerando as dimensões do sistema hídrico brasileiro, dificilmente se organizam campanhas de campo constantes em todos os reservatórios, lagoas e rios.

É neste contexto que o sensoriamento remoto se consolida como uma alternativa para se fazer uma estimativa da qualidade da água dos rios, lagos e oceanos. O potencial do sensoriamento remoto é destacado principalmente no direcionamento de trabalhos de campo, proporcionando um monitoramento constante e de baixo custo, identificando possíveis pontos críticos para coletas de amostras de água, auxiliando no monitoramento da qualidade do ambiente aquático.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver uma metodologia capaz de correlacionar parâmetros limnológicos que produzem alterações na qualidade da água em reservatórios, com dados obtidos através de sensores remotos.

1.2.2 OBJETIVO ESPECIFICO

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um modelo de monitoramento de qualidade da água através da utilização de sensoriamento remoto, que possa ser aplicado em reservatórios e outros ambientes aquáticos.
- Verificar quais parâmetros de qualidade da água, que foram medidos em campo, podem ser identificados através de imagens de satélites.
- Verificar quais intervalos espectrais são correlacionáveis com cada um dos parâmetros identificados.
- Estimar valores numéricos aproximados da qualidade da água a partir das imagens de satélite.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Durante o desenvolvimento da pesquisa, a escolha da área de análise tornou-se o principal desafio, pois seria necessária a manipulação de dados confiáveis coletados em campo e, devido ao elevado custo dos levantamentos e análise dos materiais coletados, além da necessidade de tempo para campanhas de campo periódicas, tornou-se inviável realizar-se, no âmbito da presente pesquisa, as coletas dos dados.

Seguiu-se então uma busca por estudos já realizados e publicados que continham os resultados de amostras de água. A busca por dados foi iniciada na Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), que indicou um trabalho desenvolvido no reservatório de são Simão GO, nos anos de 2002, 2003 e 2004.

Este trabalho foi organizado pelo Professor Dr. Ricardo M. Pinto Coelho, coordenador do Laboratório de Gestão de Reservatórios do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais, em convênio com a CEMIG, onde foi analisada a qualidade da água, o aporte de fósforo e a presença de cianobactérias, para um estudo que buscou caracterizar o processo de eutrofização e a degradação da qualidade de água, sofridos no reservatório durante esses 3 anos.

Os dados deste projeto, intitulado “O Aporte de Fósforo e a Presença de Cianobactérias no Reservatório de são Simão” de 2004, encontram-se publicados na literatura e foram cedidos para serem utilizados nesta dissertação.

A região em análise é o reservatório da usina hidrelétrica de São Simão, localizado no Rio Paranaíba, na bacia hidrográfica do rio Paraná.

A bacia do rio Paraná abrange uma área de 879.860 km², distribuídos em sete Unidades da Federação: Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e o Distrito Federal. Concentra 60% da capacidade hidrelétrica instalada no Brasil, sendo que, nesta bacia, destacam-se as sub-bacias Rio Paranaíba, Grande, Paranapanema e Iguaçu, com índices que variam de 10,1% a 13,2% da capacidade instalada no País, de acordo com dados da ANEEL (2003). O mapa 1 mostra a localização da bacia do Rio Paraná e as usinas hidrelétricas em funcionamento na bacia, no ano de 1999, de acordo com a ANEEL.

A bacia do Paraná é responsável por mais de 40% do PIB brasileiro, apresenta o maior e mais desenvolvido parque industrial do país e diversificadas atividades agropecuárias, o que apresenta relação direta com os usos da água e potenciais impactos negativos, qualitativos ou quantitativos.

A bacia do Rio Paranaíba é a segunda maior unidade da bacia do Paraná, com 25,4% de sua área, que corresponde a uma área de drenagem de 222.767 km², ocupando parte dos estados de Goiás (65%), Minas Gerais (30%), Distrito Federal (3%) e do Mato Grosso do Sul (2%). O mapa 2 indica a localização da bacia do Rio Paranaíba e as principais usinas hidrelétricas em funcionamento, no ano de 1999, de acordo com a ANEEL.

O rio Paranaíba nasce no município de Rio Paranaíba – MG, na serra da Mata da Corda, percorre 1160 km até sua foz, no encontro com o rio Grande, desde a cota de 1.100m até 328m de altitude, possuindo uma declividade média de 0,495m/Km.

Os principais afluentes da margem direita do rio Paranaíba são os rios Corumbá, São Marcos, Claro, Verde, dos Bois, e o Turvo, já da margem esquerda são os rios Tijuco, Da Prata, Quebra Anzol e Araguari. De acordo com dados de 2001 do IBGE a população da bacia do Paranaíba é de 8,5 milhões de habitantes, concentrando-se aproximadamente 92% em áreas urbanas. Esta ocupação abrange 193 municípios com densidade demográfica de 38 hab/km². De acordo com projeção realizada pelo IBGE, até 2020, a bacia do Paranaíba terá uma população de mais de 18 milhões de habitantes.

A ocupação do solo nesta região é guiada pela agropecuária, abrangendo a criação de bovinos de corte e leite, suínos, galináceos, além de grandes regiões de monocultura, onde se destacam a cana-de-açúcar, a soja, o milho e o café. A ocupação desta área ocorreu principalmente a partir da década de 1970, com a mecanização das lavouras e o desmatamento do Cerrado, vegetação nativa da região.

Esta ocupação, na sua maior parte, não respeitou os limites das áreas de preservação permanente e as matas nativas, provocando intensos impactos ambientais, como processos erosivos, assoreamento, extinção de espécies de fauna e flora e poluição de mananciais.

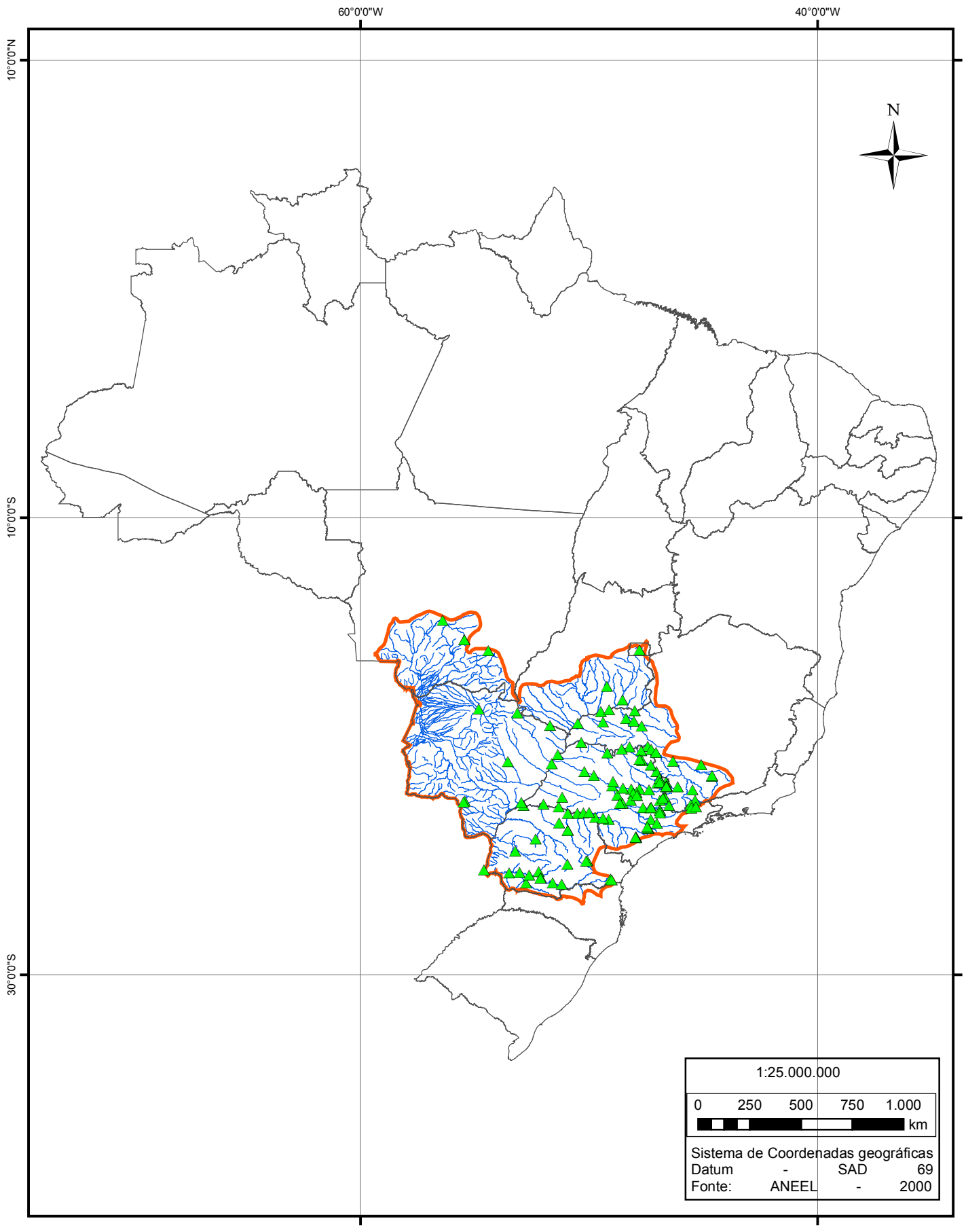
Segundo a ANA, existem conflitos na região da bacia, como insuficiência hídrica para o abastecimento de grandes centros urbanos, devido à deterioração da qualidade das águas pelo lançamento de esgotos domésticos sem tratamento adequado e ao uso indiscriminado para irrigação, sem respeitar as diretrizes estabelecidas na Política Nacional de Recursos Hídricos.

Nesta bacia, está localizada a usina hidrelétrica de São Simão, cujo reservatório está no baixo curso do rio Paranaíba, que divide os estados de Minas Gerais e Goiás. De montante para jusante, o reservatório de São Simão é o último de uma série de três reservatórios: Emborcação, Itumbiara e Cachoeira Dourada. Considerado um reservatório de grande porte com área inundada de 722,25 km², profundidade máxima de 127 m, vazão turbinada de 24.000 m³/s, uma altitude, na barragem, de 404m e coordenadas geográficas 19°01'05" S e 50° 29' 57" W, de acordo com o quadro 1.

A bacia hidrográfica deste reservatório abrange parte do estado de Goiás, possuindo, como tributários, os rios Alegre, Preto, dos Bois, Meia Ponte e São Francisco, drenando uma área com intensa produção agrícola e crescente urbanização. Do lado mineiro, estão os rios Tijuco e Prata, possuindo uma área de drenagem de 171.000 km² (ver, no mapa 3, a localização do reservatório de São Simão).

	Variável	**Valor**	
1	Área do Reservatório	722,25 km^2	
2	Área de Drenagem	171.000 km^2 (estimativa CEMIG)	
3	Profundidade Máxima	127 m	
4	Vazão Máxima	24.000 $m^3.s^{-1}$	
5	Altitude	404 m	
6	Localização	Latitude	S19 01´ 05´´
		Longitude	W 50 29´57´´

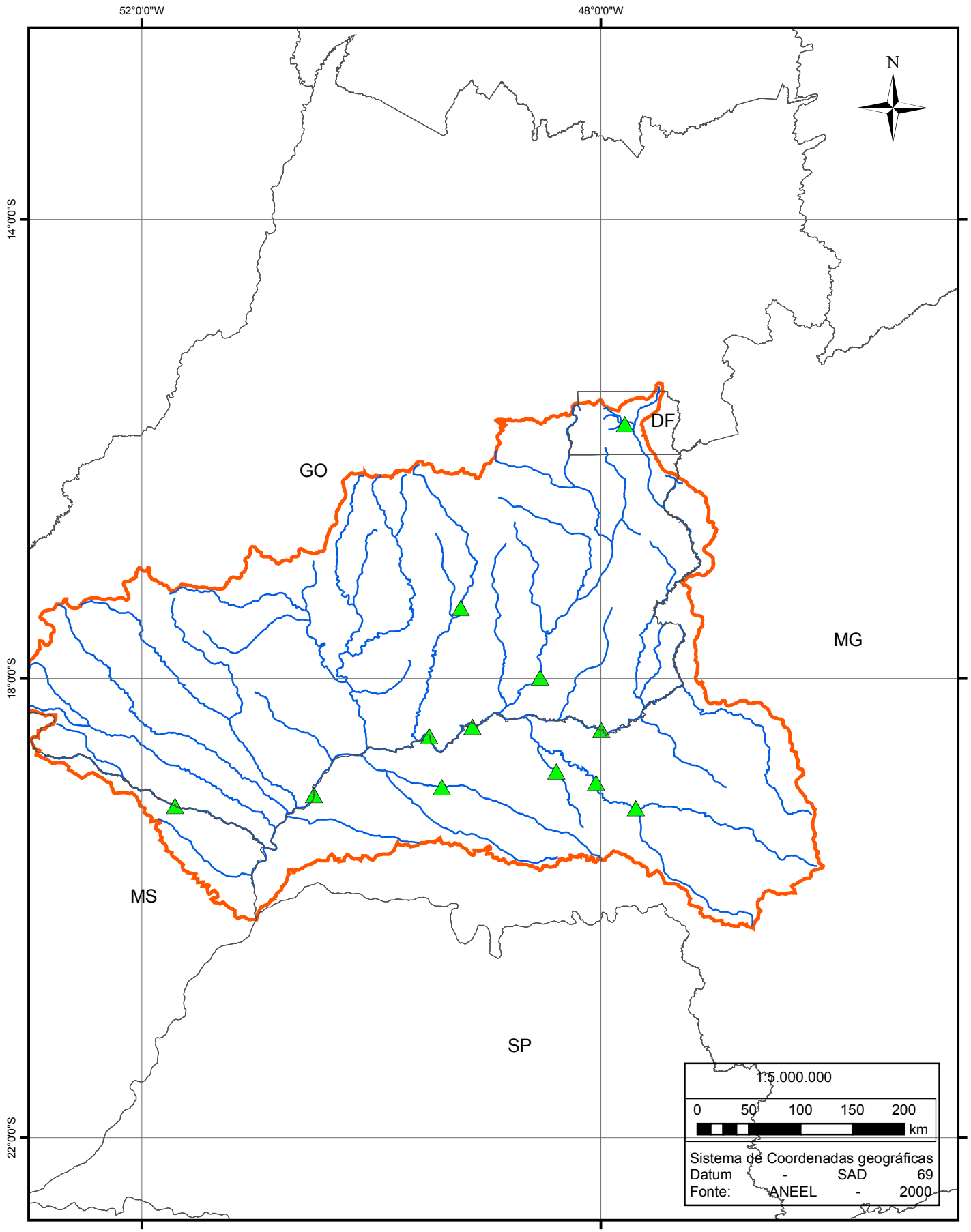
Quadro 1 - Informações morfométricas e hidrológicas sobre o reservatório de São Simão (MG/GO).
Fonte: Coelho (2004)



Mapa 1 - Localização da Bacia do Paraná e Usinas Hidrelétricas em Funcionamento no ano de 2000

Legenda:

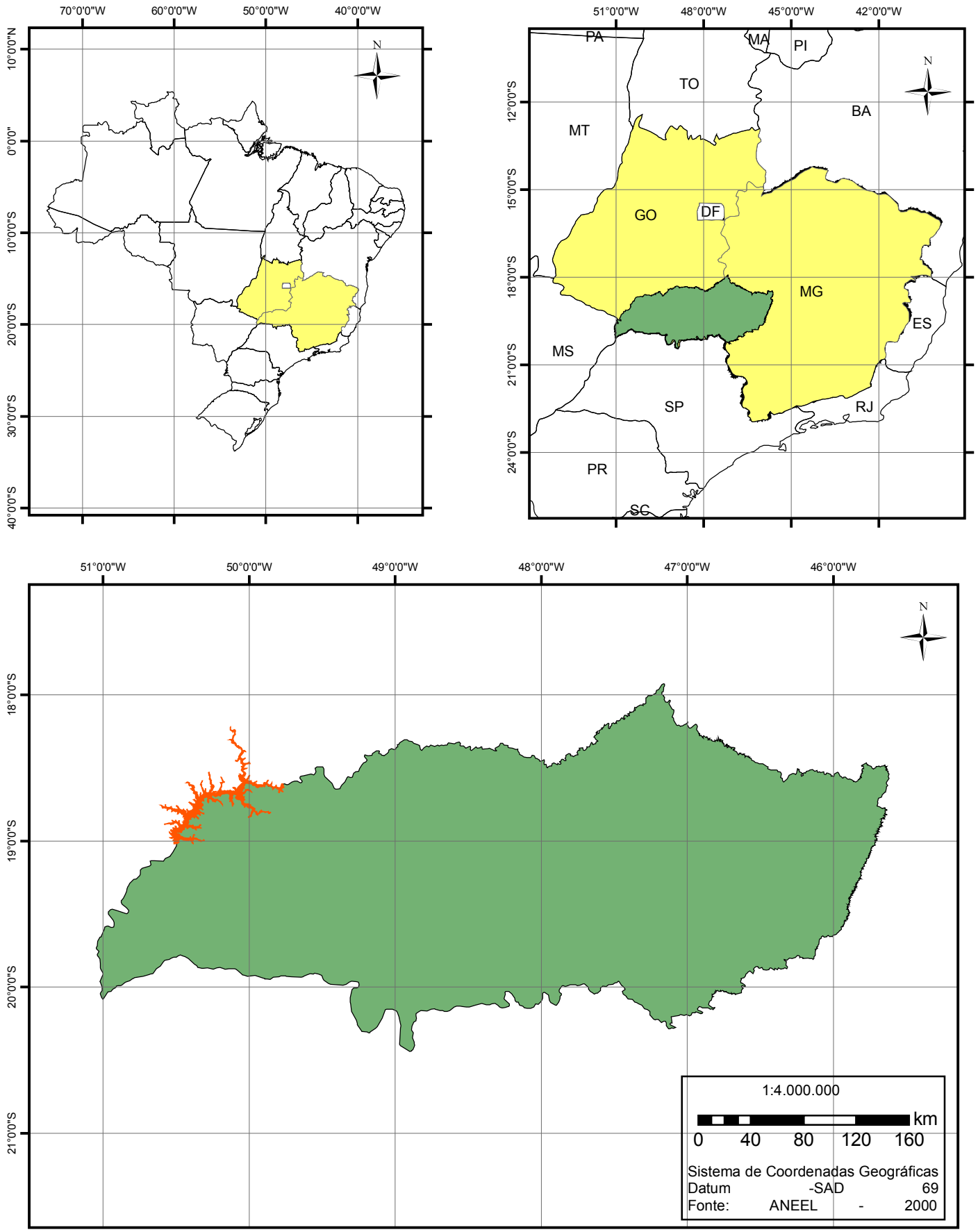
- Usinas
- Hidrografia
- Bacia do Parana
- Divisão Politica



Mapa 2 - Localização da Bacia do Paranaiba e Usinas Hidrelétricas em Funcionamento no ano de 2000

Legenda:

- Usinas
- Hidrografia
- Bacia do Parana
- Divisão Politica



Mapa 3 - Localização do Reservatório de São Simão

Legenda:

- Triângulo Mineiro / Alto Paranaíba
- Reservatório São Simão
- Divisão Política

De acordo com Coelho (2004), nesta bacia são contabilizados 90 municípios sendo 14 em MG e 76 em GO. Numa análise mais detalhada, são 12 sub-bacias que contribuem com nutrientes e sedimentos, incluindo o Rio São Bartolomeu, que recebe águas servidas do Distrito Federal e deságua no reservatório de Itumbiara e o Rio Meia Ponte que recebe águas servidas da região de Goiânia.

Devido ao uso e ocupação do solo na bacia, o lago de São Simão e todos os outros reservatórios do Rio Paranaíba encontram-se em processo de eutrofização.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução à pesquisa e localização da área de estudo.
- Capítulo 2: Apresenta uma revisão bibliográfica sobre a produção energética brasileira e uma introdução sobre sensoriamento remoto.
- Capítulo 3: Descrição dos materiais e métodos utilizados na pesquisa.
- Capítulo 4: Apresentação dos resultados obtidos.
- Capítulo 5: Considerações Finais

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA NO BRASIL

O homem sempre se adaptou às mais diversas condições ambientais, povoando locais com condições climáticas e relevo desfavoráveis. Durante o processo de adaptação, os recursos naturais têm sido dominados e explorados; e o modo de vida do homem tornou-se subordinado à existência desses recursos.

Durante a passagem dos séculos a história narra eventos em que civilizações se extinguiram por falta de determinado recurso, como a água, e a conseqüente falta de alimentos. As civilizações criaram meios de suprir a falta de recursos, desenvolvendo também formas de dominação, onde as sociedades que detinham certo recurso natural dominavam outras sociedades que não o possuíam. Durante o processo evolutivo, houve um revezamento de valores que foram utilizados como moeda de troca, como a água, metais, minerais, petróleo, etc.

O surgimento do sistema de produção capitalista modificou as relações humanas a partir do século XVII e provocou intensas transformações sociais, ambientais e políticas. A revolução industrial e a expansão da produção modificaram a vida social; o crescimento da população devido à melhoria da qualidade de vida fez surgir a necessidade de se produzir em grande escala para atender a uma demanda crescente de produtos, empresas foram criadas para desenvolver técnicas de produção, desenvolvendo máquinas e linhas de montagem, caminhando para a revolução tecnológica já no século XX. Enfim, a partir da revolução industrial, acentuou-se uma corrida em busca de transformar os recursos naturais em meios para produção energética, visando garantir o funcionamento deste novo modelo de produção.

Foram desenvolvidas, ao longo do tempo, diversas formas de gerar energia, como energia a vapor, hidráulica, eólica, solar, térmica, nuclear. Todos esses meios

passam ainda por constante evolução, desde a produção primitiva até as gigantescas usinas de transformação, presentes em todo mundo.

A energia hidráulica foi uma das primeiras formas que o homem utilizou para garantir sua sobrevivência em sociedade, desde a produção de dutos utilizando a gravidade para garantir o abastecimento das cidades até a substituição do trabalho animal pelo mecânico que ainda é utilizada na moagem de grãos e nas rodas d'água para bombeamento.

A energia hidráulica é a fonte renovável mais utilizada no mundo, o processo de produção de energia elétrica, utilizando a energia hidráulica corresponde a 17 % da energia elétrica gerada em todo mundo e, no Brasil, responde por cerca de 75,68% da potência total instalada no país (ANEEL, 2008). É uma fonte de geração de energia que, numa análise simplória, não polui o meio ambiente, porém a construção e o funcionamento de usinas hidrelétricas causam danos ao meio ambiente, inundando grandes áreas, transformando todo um ecossistema para iniciar o seu funcionamento. O reservatório pode constituir-se em fonte de emissão de metano, para a atmosfera, caso freqüente em função da impossibilidade de se desmatar, por completo, toda a área alagada. Veja-se o caso extremo disto, no reservatório de Balbina, situado no rio Uatumã, região amazônica. A diminuição da velocidade da água, em relação àquela verificada nos rios, induz à sedimentação localizada e ao aumento do tempo de permanência de poluentes que afluem ao reservatório por cargas difusas e pontuais. Nesse sentido, os reservatórios constituem os corpos hídricos mais susceptíveis à eutrofização, fenômeno condicionado pela presença de concentrações excessivas de nutrientes na água.

Um dos limitantes para a construção de novas barragens são os licenciamentos ambientais que são exigidos pela legislação específica de construção de grandes obras que causam grandes impactos sócio-ambientais, onde, de acordo com a legislação, tem de ser feito um estudo detalhado de impactos ambientais e sociais, chamado de EIA RIMA, que compreende licenças chamadas de LP (licença previa), LI (licença de implantação), LO (licença de operação). Esta última diz respeito à operação da usina e deve ser revista de acordo com um tempo estipulado pelos órgãos ambientais competentes de cada estado. No que diz respeito aos reservatórios, há uma série de exigências, segundo o código florestal brasileiro, em relação a áreas de preservação permanente que devem ser delimitadas contando 100 metros a partir da margem no período de cheia e devem ser respeitadas em toda a extensão do lago.

De acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) da ANEEL, em novembro de 2008, existiam em operação 227 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) , com potência total de 120 MW; 320 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) (2,4 mil MW de potência instalada) e 159 Usinas Hidrelétricas com uma capacidade total instalada de 74,632 mil MW. Há também 46 projetos que já foram autorizados por órgãos ambientais a começarem as obras; e outros 232 projetos estão em fase de estudo. Ver, no mapa 4, a hidrografia brasileira, com destaque para os maiores reservatórios e lagos naturais.

Apesar de intensamente explorada, ainda existe um grande potencial brasileiro para produção de energia elétrica a partir da energia hidráulica. As bacias do Paraná, São Francisco, Atlântico Leste e Tocantins são as mais exploradas; e a bacia Amazônica é a que representa o maior potencial para exploração nas próximas décadas. Na bacia do Paraná, restringindo o foco da presente pesquisa, destacam-se as sub-bacias dos rios Paranaíba e Grande, localizadas no Triângulo Mineiro, tornando esta região responsável por grande parte da produção energética do estado de Minas Gerais, uma região que, consequentemente, vem sofrendo intensas alterações ambientais. A figura 1 representa a evolução da concentração de usinas hidrelétricas no Brasil.

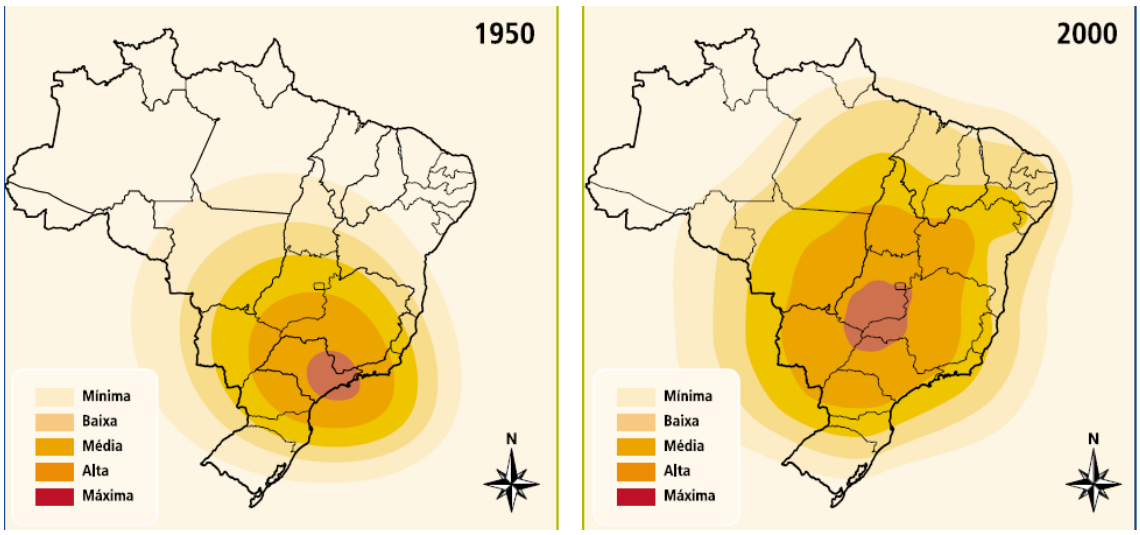
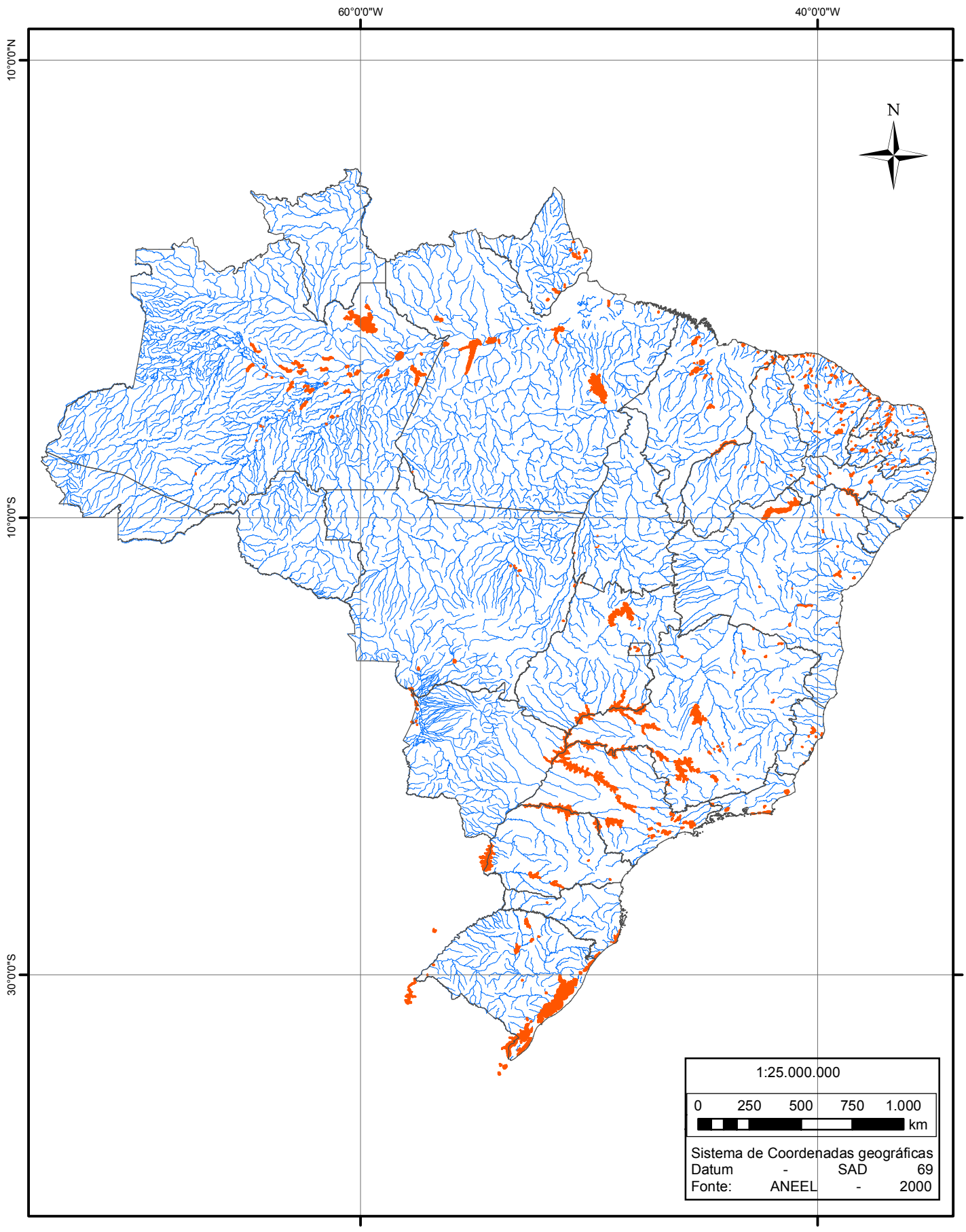


Figura 1 – concentração das usinas hidrelétricas no Brasil nos anos de 1950 e 2000. Fonte Atlas de Energia Elétrica do Brasil. ANEEL – 2008

Embora o governo e a iniciativa privada realizem investimentos na construção de usinas e formação de represas, são relativamente raros os estudos e pesquisas para o manejo visando ao monitoramento da qualidade da água.



Mapa 4 - Hidrografia e Distribuição dos Lagos Naturais e Reservatórios no Ano de 2000

Legenda:

- Hidrografia
- Represas e Lagos Naturais
- Divisão Politica

A função de um reservatório não é exclusiva para geração de energia elétrica. O reservatório deve atender a outras finalidades: são os chamados usos múltiplos da água. O dimensionamento e a operação de um reservatório deve ser analisada prevendo os usos possíveis como a captação da água para fins de abastecimento público ou irrigação, o que já ocorre em alguns municípios do país, onde a captação de água ocorre exclusivamente em represas, o que confere um fator a mais na necessidade de se preservar a qualidade da água em toda bacia hidrográfica que contribui com o reservatório. Para Richter e Azevedo Netto (1998), a qualidade da água dos reservatórios tem implicações diretas no processo de tratamento e no custo da água.

Manter a qualidade da água em um ambiente aquático é fundamental para a infra-estrutura de cidades que são abastecidas com essas águas, além da manutenção do equilíbrio nos ecossistemas. Com a construção de usinas hidrelétricas, ocorre a transformação desse ecossistema, onde um rio, represado, transforma-se em um ambiente com baixas velocidades no reservatório, o qual é submetido a estratificações térmicas consideráveis durante o verão, e com fluxo regularizado a jusante da barragem. Tais alterações tornam o corpo hídrico mais vulnerável a alterações de sua composição.

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS NOS RESERVATÓRIOS

Os reservatórios, por se tratarem de ambientes lênticos, são mais propícios a impactos na qualidade da água, pois, com o represamento, o tempo de residência da água no mesmo trecho aumenta consideravelmente. O mecanismo advectivo de transporte de poluentes, responsável pelo carreamento de substâncias no sentido montante-jusante, é reduzido consideravelmente.

Os principais impactos ambientais ocorridos em um reservatório, são o assoreamento e a eutrofização. Este último consiste no aumento da população de algas, ocasionado pelo aumento da concentração de nutrientes, principalmente sais de nitrogênio (nitritos, nitratos) e de fósforo (fosfatos).

Para Carvalho et al. (2000):

> "*A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente modificam as condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens geram uma*

> *redução das velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carreados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podendo vir a inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas"*.

Os sedimentos depositam-se no reservatório devido à queda de velocidade de correnteza que o curso de água sofre ao entrar no reservatório. Assim, as partículas mais densas depositam-se primeiro, como cascalho e pedregulhos, posteriormente as areias, siltes e argilas (que normalmente mantêm-se em suspensão). A sedimentação nas bacias hidrográficas é oriunda principalmente de processos erosivos como a sedimentação de encostas e a erosão laminar, ocasionados pela falta de cobertura do solo, processos que podem ser agravados, dependendo das características da bacia, como topografia, tipo de solo e pluviosidade. De acordo com Carvalho et al. (2000), é certo que o reservatório pode sofrer um assoreamento indesejável, sendo isto um caso a estudar em cada aproveitamento. Os pequenos lagos estão sujeitos a um assoreamento rápido, o que pode acontecer até mesmo numa única enchente. Em termos de sedimentos suspensos, sua presença onera os processos de clarificação da água, nas situações em que o reservatório é o manancial utilizado para abastecimento. Embora o impacto imediato do grande aporte de partículas em suspensão seja o aumento da turbidez da água, eventualmente alguns poluentes, como pesticidas, podem ser adsorvidos na superfície dos sedimentos.

A eutrofização é o termo correspondente a uma elevada proliferação de algas, que pode ser relacionada com o aumento populacional e da industrialização, que são responsáveis também pelo aumento da demanda energética, e a conseqüente construção de novas barragens. O lançamento de esgoto e a poluição difusa, decorrente da fertilização artificial de solos, constituem a principal causa do aumento da concentração de nutrientes em reservatórios, haja vista que nitratos e nitritos são subprodutos da decomposição de matéria orgânica, originados a partir do processo de oxidação da amônia.

De acordo com Esteves (1998):

> *"A poluição dos lagos e represas, que ocasiona a eutrofização, ocorre por diferentes fontes de poluição. Os efluentes domésticos*

> *contribuem com produtos de limpeza ricos em fósforo e fosfato, como detergentes e sabão em pó, além dos excrementos humanos que contêm, em sua composição, consideráveis concentrações de nitrogênio e fósforo. Outras fontes são efluentes industriais e agrícolas. Segundo cálculos para solos europeus, para cada aplicação perde-se em áreas agrícolas adubadas, de 16 a 25 % de nitrogênio e 0,7 a 1,4% de fosfato e a maior parte atinge os corpos hídricos"*.

De acordo com Millie et al. (1992), um dos objetivos dos profissionais que atuam em manejo de lagos e reservatórios é controlar os florescimentos de espécies de algas potencialmente tóxicas, como as cianobactérias, que produzem toxinas consideradas um risco à saúde pública.

De acordo com ANEEL (2002), a solução ou minimização do problema de eutrofização do lago ocorre quando os núcleos de proliferação são identificados, sendo localizados, muitas vezes, em remansos a jusante de emissários poluídos.

A presença de algas fitoplanctônicas em ambientes aquáticos altera a qualidade da água e a dinâmica biológica do ecossistema, sendo um aspecto importante para avaliação da condição ambiental. A clorofila é um dos pigmentos, além dos carotenóides e ficobilinas, responsáveis pelo processo fotossintético. A clorofila "a" é a mais comum das clorofilas (a, b, c, e d) e representa, aproximadamente, de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas, sendo um importante indicador da concentração de biomassa algal. Assim, a clorofila "a" é considerada a principal variável indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos (CETESB), o qual pode ser monitorado pela medida da concentração de clorofila, normalmente em microgramas por litro da amostra de água.

Os sólidos presentes na água, dissolvidos ou suspensos, são originados de processos de sedimentação, processos de assoreamento e erosão da bacia e das margens. Os sólidos são carreados no leito dos rios e depositados principalmente em lagos e reservatórios. Nos sistemas de tratamento de água, os sólidos suspensos representam um fator quantificado por uma variável denominada turbidez, a qual deve ser removida pelas etapas de clarificação que, num arranjo mais completo, consiste dos mecanismos de coagulação, floculação, decantação e filtração. De acordo com a CETESB, os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios,

promovendo decomposição anaeróbia. Há também, conforme já foi dito, a possibilidade de pesticidas serem adsorvidos nas superfícies dos sólidos em suspensão. Altos teores de sais minerais, particularmente sulfato e cloreto, estão associados à tendência de corrosão em sistemas de distribuição, além de conferir sabor às águas.

Enfim, as alterações no ambiente do reservatório, induzidas pelos sedimentos e pela eutrofização, comprometem o aproveitamento da água para abastecimento público, prejudica a geração de energia, causando danos às tubulações (entupimento) e turbinas (corrosão) e afeta os fins turísticos, eliminando a função de área de lazer.

Apesar de todos esses fatores que afetam o funcionamento das usinas e a necessidade de se monitorar a qualidade da água nas bacias hidrográficas, ainda são escassas as estações de monitoramento. A ANA e os gestores de usinas, como a CEMIG, possuem estações fluviométricas e sedimentométricas. Estas porém não são suficientes para atender às necessidades de um país tão grande quanto o Brasil, tornando a gestão de bacias e recursos hídricos uma tarefa difícil e com elevado custo financeiro.

2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

De acordo com Novo (2007), monitoramento é a observação repetitiva de uma área ou fenômeno, com uma freqüência definida pela variabilidade do fenômeno e pela necessidade de informação sobre a dinâmica do seu comportamento.

Tomando por base os elevados custos financeiros para realização de, monitoramentos e análises técnicas em campo, que ocorrem devido às dificuldades de acessar determinados locais, o sensoriamento remoto torna-se alternativa como uma ferramenta de menor custo financeiro e com maior acessibilidade para realizar levantamentos técnicos, mapeamentos e monitoramentos para planejamento ambiental e urbano. O sensoriamento remoto se consolida com uma grande quantidade de dados atualizados a serem integrados aos dados convencionais, tornando-se parte de um sistema de gestão que tende a evoluir constantemente com o emprego de novas técnicas.

Em aplicações mais gerais, as imagens de sensoriamento remoto são dados espaciais úteis em qualquer estudo onde o local é importante, seja uma representação de um pequeno comércio ou de um país. Porém, como em qualquer tipo de dados, para

realizar um estudo, uma análise ou um monitoramento, é necessário escolher o tipo de imagem a ser utilizada. Essa percepção assume mais importância em estudos menos triviais, como aqueles relacionados com a qualidade da água superficial.

Pode-se definir sensoriamento remoto como a tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos da superfície terrestre, a partir da detecção e mensuração das mudanças que estes impõem ao campo eletromagnético (Elachi, 1987). A radiação eletromagnética é uma forma de energia que todo objeto, a uma temperatura superior a -273°C, é capaz de emitir. A maior fonte dessa radiação é o Sol. A energia proveniente do Sol, ao incidir na superfície da Terra, é absorvida, emitida, transmitida e refletida. Esses quatro processos são variáveis e são definidos pelas características moleculares do objeto que recebe a radiação. Em outras palavras, esses processos ocorrem com intensidades diferentes, dependendo das características do alvo em estudo, sendo necessário utilizar diferentes faixas do espectro para analisar o alvo com maior precisão.

A radiação eletromagnética é emitida através de diferentes comprimentos de onda que variam ao longo do espectro, o qual é construído com base nos comprimentos de onda (ou freqüências) das radiações conhecidas. Cada fonte de energia eletromagnética possui um espectro de emissão que pode ser contínuo ou distribuído em faixas discretas. A radiação eletromagnética incidente sobre um objeto é calculada pela irradiância, que é a quantidade de energia que chega a um determinado alvo por unidade de área.

O espectro eletromagnético, como ilustrado na figura 2, possui diversas faixas espectrais, como:

- *Ondas de rádio*, que são caracterizadas por possuírem baixas freqüências e grandes comprimentos de onda, variando de 1mm a 30cm;
- *Infravermelho*, que varia de 0,75 µm a 1,0mm e é muito utilizada em sensoriamento remoto;
- *Faixa de luz visível*, que varia de 380 a 750µm, sendo a única faixa perceptível ao olho humano;
- *Ultravioleta* que varia de 10nm a 400µm e que sofre elevada interferência atmosférica (vide camada de ozônio);
- *Raios X* e, finalmente, os *Raios Gama*, com menores comprimentos de onda.

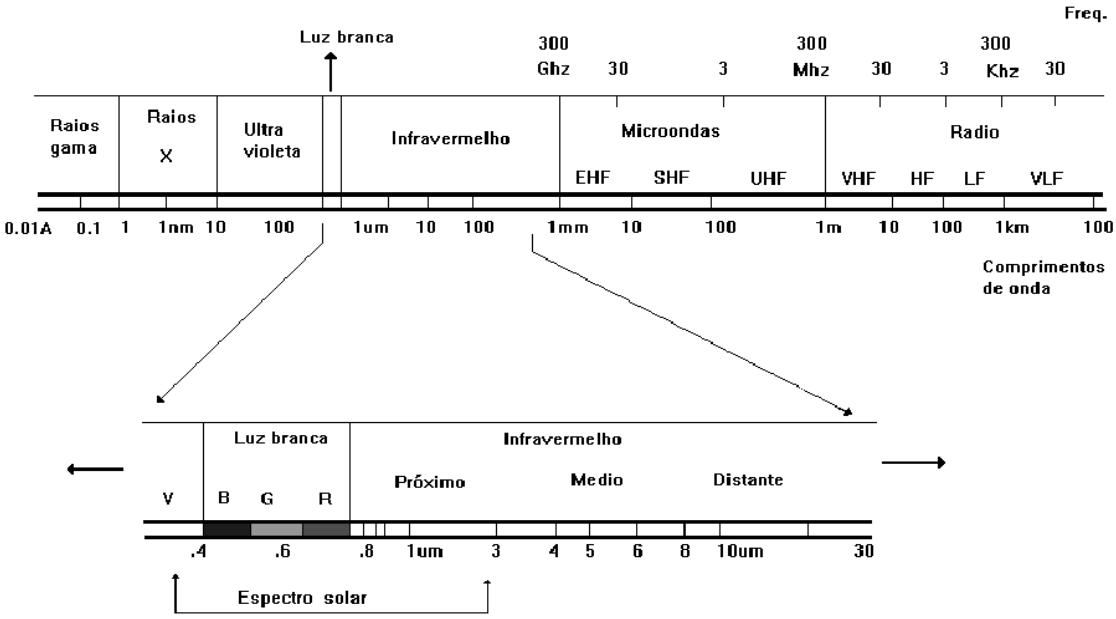


Figura 2 – Espectro Eletromagnético. Fonte: Erbert M. (2001)

A radiação eletromagnética é absorvida e espalhada na atmosfera, chegando à superfície e retornando aos sensores remotos. Esse retorno é verificado em somente algumas faixas do espectro, que são conhecidas por janelas atmosféricas. Nestas faixas, que correspondem às janelas atmosféricas, a radiação eletromagnética sofre menos interferência de gases presentes na atmosfera, e por isso são nestas janelas que estão as faixas do espectro que são analisadas no sensoriamento remoto. Os comprimentos de onda, de acordo com ROSA (2007) são: raios cósmicos, raios (<0,03 nm), raios X (0,03 – 3,0 nm), ultravioleta (0,003 – 0,4µm), visível (0,4 – 0,72µm), infravermelho próximo (0,72 -1,3µm), infravermelho médio (1,3 – 4,0µm), infravermelho distante (4,2 - 300µm), microondas (1,0 – 100 cm) e ondas de rádio (>100 cm).

De acordo com ERBERT (2001), a figura 3 ilustra as diferentes bandas espectrais associadas a um dos mais importantes sistemas sensores, o Land-Sat. Este sistema sensor possui um total de sete bandas, com numeração de 1 a 7, sendo que cada banda representa uma faixa do espectro eletromagnético captada pelo sensor a bordo do satélite.

0.45 μm	0.52 μm	Azul	banda 1
0.52 μm	0.60 μm	Verde	banda 2
0.63 μm	0.69 μm	Vermelho	banda 3
0.76 μm	0.90 μm	Infra-Vermelho-Próximo	banda 4
1.55 μm	1.75 μm	Infra-Vermelho-Médio	banda 5
2.08 μm	2.35 μm	Infra-Vermelho-Médio	banda 7
10.4 μm	12.5 μm	Infra-Vermelho-Termal	banda 6

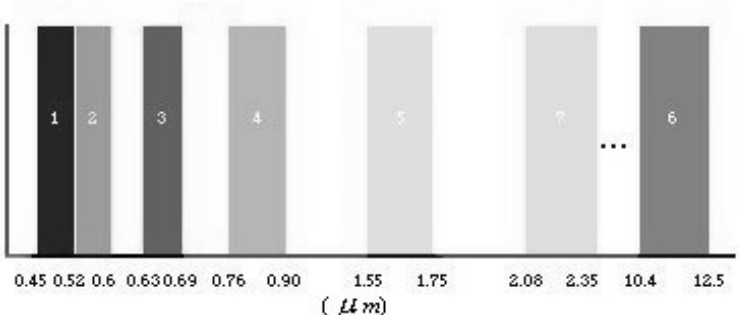


Figura 3 – Bandas espectrais do satélite Land-Sat. Fonte: Erbert M. (2001)

A resolução é o termo utilizado para classificar as imagens em diversos parâmetros: temporal, espectral, radiométrica e espacial. De acordo com Rosa (2007), resolução temporal está relacionada com a repetitividade que o sistema sensor possui na obtenção de informações dos alvos. É o tempo que o satélite leva para retornar ao mesmo ponto de visada. Para o mesmo autor, resolução radiométrica é a maior ou menor capacidade de um sistema sensor em detectar e registrar diferenças de reflectância e/ou emitância dos elementos da paisagem. É a capacidade do sensor em registrar o número de níveis de intensidade que compõe o pixel.

Resolução espectral refere-se à melhor ou pior caracterização dos alvos em função da largura espectral e/ou número de bandas em que opera o sistema sensor. Esta resolução é medida de acordo com o comprimento das bandas espectrais: quanto mais estreita for a banda e quanto maior o número de bandas, melhor a resolução espectral do sistema sensor. Neste contexto, é conveniente comentar que o termo banda refere-se a determinado intervalo de ondas eletromagnéticas que compreende alguma região do espectro, sendo que cada banda é definida de acordo com a resolução espectral de cada sistema sensor. Os melhores sistemas sensores são aqueles que operam cobrindo uma grande faixa do espectro eletromagnético, distribuindo os comprimentos de onda em diversas bandas espectrais.

Resolução espacial pode ser definida como sendo a mínima distância entre dois objetos (alvos), na qual um sensor pode registrá-los como sendo objetos distintos

(ROSA, 2007). A resolução espacial é medida de acordo com o tamanho do pixel, sendo a menor porção da imagem.

Dentre os diversos sistemas sensores existentes, foram escolhidas, para realizar a presente pesquisa, as imagens do satélite dos Estados Unidos - Land-Sat, que possui um grande acervo de imagens que são disponibilizadas gratuitamente. Essa escolha ocorreu em função do número de imagens deste satélite que é praticamente insuperável o que propiciou uma correspondência com as datas em que foram realizadas as coletas de amostras de água no campo.

O satélite Land-Sat foi desenvolvido pela NASA e foi o primeiro satélite lançado para observação da Terra. Tal satélite é considerado como um marco no desenvolvimento do sensoriamento remoto e do geoprocessamento. O primeiro satélite foi lançado em 1972 e o último foi lançado em 1999, o LandSat 7.

O funcionamento do satélite é obtido através de energia solar que é convertida em energia elétrica. De acordo com Rosa (2007), eles deslocam-se de norte para sul em órbita geocêntrica, circular, quase polar e heliosíncrona isto é, o ângulo Sol-Terra-satélite permanece constante. Assim, as áreas capturadas pela imagem estão sempre com boa condição de iluminação.

O Land-Sat 7 foi lançado em abril de 1999, conta com o sistema sensor ETM + (Enhanced Thematic Mapper Plus), opera com uma altitude de 705 km, possui resolução temporal de 16 dias, 8 bandas espectrais, resolução espacial de 30 metros nas bandas do visível e infravermelho, 60 metros no infravermelho termal e 15 metros na banda pancromática. Além disto, o satélite conta com resolução radiométrica de 8 bits, como está listado no quadro 2.

Cada uma das bandas espectrais do satélite Land-Sat possui uma indicação para a análise de alvos. No quadro 3, os usos de cada faixa são expostos e servem de ponto de partida para a escolha do alvo e de como será feito o processamento da imagem para o estudo de determinado objeto.

Durante o processamento digital da imagem, pode-se analisar cada faixa espectral separadamente, visando a um resultado mais especifico, ou combiná-las, formando imagens coloridas para uma análise mais geral. Assim, há a composição utilizando as bandas 3,2 e 1, que forma a chamada composição de cor natural que representa o local como se visto do espaço; ou a composição com as faixas 5,4 e 3,que é chamada de falsa cor, sendo muito utilizada para determinar a hidrografia e diferentes usos de vegetação.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	(B1) AZUL	0.45 - 0.515 µm	30 m	16 dias	183 km	8 bits
	(B2) VERDE	0.525 - 0.605 µm				
	(B3) VERMELHO	0.63 - 069 µm				
	(B4) INFRAVERMELHO PRÓXIMO	0.76 - 0.90 µm				
	(B5) INFRAVERMELHO MÉDIO	1.55 - 1.75 µm				
	(B6) INFRAVERMELHO TERMAL	10.4 - 12.5 µm	60 m			
	(B7) INFRAVERMELHO MÉDIO	2.09 - 2.35 µm	30 m			
	(B8) PANCROMÁTICO	0.52 - 0.90 µm	15 m			

Quadro 2 – Resolução do Satélite Land-Sat 7. Fonte: Embrapa 2009

A aquisição de imagens por sensoriamento remoto é uma forma rápida de obter informações sobre determinada região. Estas imagens podem ser adquiridas por diferentes métodos, como em plataformas orbitais com altitudes que variam de 300 a 1500 km, a partir de satélites de observação da Terra, em altitudes de até 36.000 km nos satélites meteorológicos, plataformas aéreas que são usadas entre altitudes que variam de algumas centenas de metros até 20 km em aviões pressurizados e plataformas terrestres e marítimas que operam na superfície da Terra e são usadas para imagear pequenas áreas.

Banda	Intervalo espectral (μm)	Principais características e aplicações das bandas TM e ETM dos satélites LANDSAT 5 e 7
1	(0,45 - 0,52)	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	(0,52 - 0,60)	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	(0,63 - 0,69)	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	(0,76 - 0,90)	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com *pinus* e *eucalipto*. Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	(1,55 - 1,75)	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	(10,4 - 12,5)	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	(2,08 - 2,35)	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Quadro 3 – informações sobre as bandas espectrais do satélite Land-Sat. Fonte INPE 2009.

De acordo com Davis e Fonseca (2001), estas imagens são definidas como sendo uma função da posição $\vec{X} = (x, y)$, matematicamente escrita em função das coordenadas como *f(x,y)*. Tal função é bidimensional, válida em certa região. Esta função pode assumir valores de números reais não negativos, relacionados com a energia refletida por objetos, capturada por algum processo físico. Esta função *f(x,y)*, em imagens digitais, assume valores de números inteiros, cujos valores são armazenados na forma de uma matriz regular de pontos, como representa a figura 4.

Câmara et al. (2001) afirmam que:

> *"A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como o agrupamento de diversas superfícies planas (células), onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula, no mapa ou documento, e a área por ela coberta no terreno"*

O termo "pixel" é utilizado para denominar cada célula da imagem, portanto, quanto mais pixels, maior será a resolução desta imagem. Para Davis e Fonseca (2001), cada pixel é associado a uma amostra e é caracterizado pela sua posição na imagem e pelo seu valor, ou seja, cada pixel está georreferenciado no espaço por um par de coordenadas *x,y* e possui um valor de intensidade para alguma grandeza física.

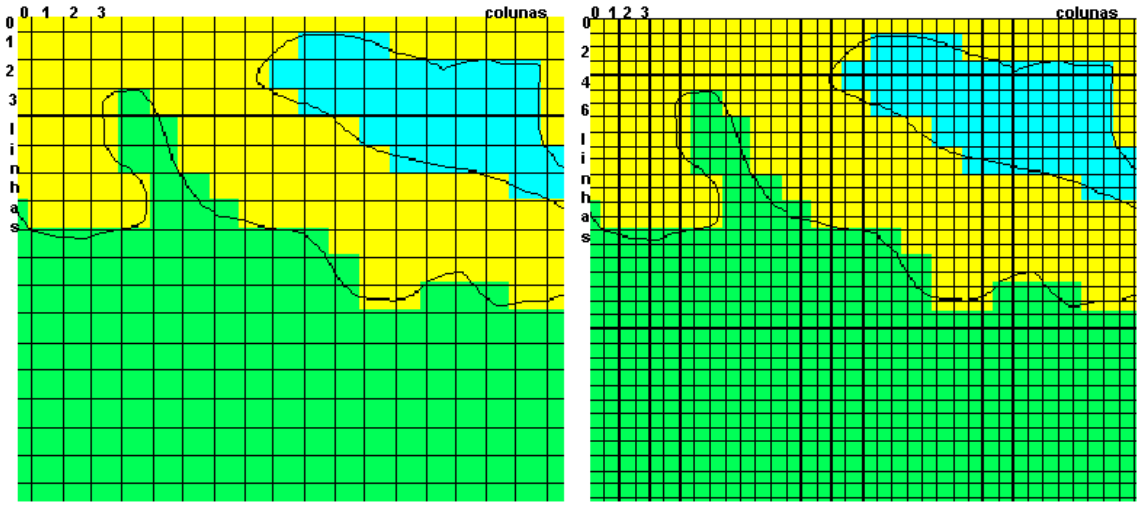


Figura 4 - Diferentes representações matriciais para um mapa. Fonte Camara et al. 2001.

De acordo com Davis e Fonseca (2001), por ser digital, o valor do pixel é sempre limitado de acordo com a quantidade de níveis de intensidade que podem ser

percebidos pelo dispositivo de aquisição de imagens. Esta limitação é medida em bits por pixel. Nesse sentido, os valores mais usados são 1, 8 e 24 bits, gerando imagens, respectivamente, de até 2, 256 e 16 milhões de níveis de intensidade para cada pixel.

Para visualização das imagens, adotam-se cores para representar a intensidade do pixel. Nesse contexto, o modelo mais utilizado é uma escala de cinza com 256 níveis, onde a cor preta representa o nível 0 e a cor branca representa o nível 255, as imagens coloridas são obtidas associando cada grupo de 8 bits a uma cor primária: vermelha, verde e azul, mais conhecido como R (red) G (Green) e B (blue), formando qualquer cor perceptível ao olho humano, em um total de 16 milhões de níveis de intensidade para cada pixel.

Estas composições dependem da quantidade de faixas espectrais que possui o sistema sensor e são obtidas de acordo com a natureza do alvo em análise. Cada objeto possui uma característica própria e um comportamento específico ao interagir com a radiação eletromagnética. É o chamado comportamento espectral dos alvos que é a interação do alvo com a energia recebida, definindo sua reflectância, absortância, transmitância e emitância. Cada alvo possui um comportamento próprio, diferenciando-se dos demais, apresentando diferentes intensidades principalmente de reflectância ao longo do espectro.

Segundo Slater (1980), apud Mantovanni (1993):

> *"reflectância espectral de um alvo é o conjunto de seus valores de reflectância, obtidos numa situação definida de irradiância e geometria de aquisição, sendo cada valor correspondente à reflectância num dado intervalo de comprimentos de onda, dentro da faixa espectral empregada".*

Os dados de sensoriamento remoto são empregados no estudo de vários alvos espectrais, como a vegetação, solo, rochas, agricultura e a água. Como mostrado na figura 5, que demonstra curvas espectrais de alguns alvos em relação a sua reflectância.

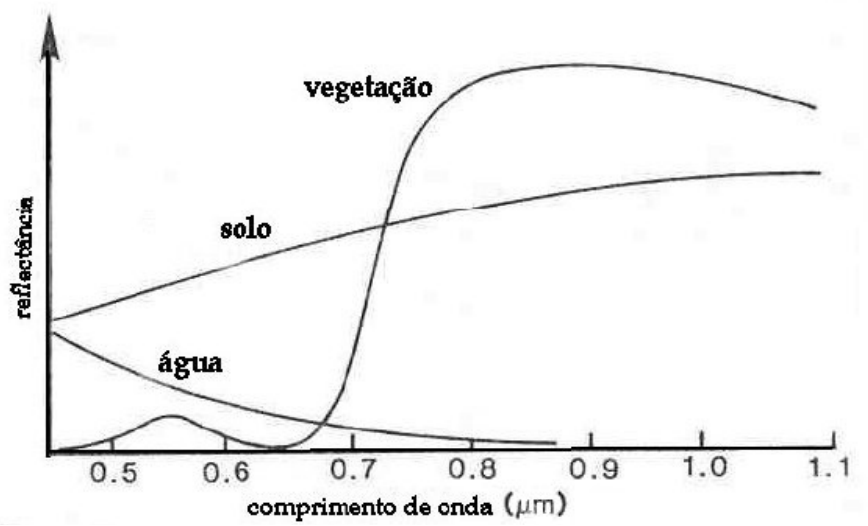


Figura 5 – Curvas de resposta espectral padrão da água, solo e vegetação.

Fonte: Erbert M. (2001)

Percebe-se que a água limpa possui baixa reflectância sendo maior na faixa do visível principalmente na faixa correspondente a cor azul, e sendo absorvida na medida que se avança em direção as faixas do infravermelho, o solo aumenta sua reflectância a medida que se avança em direção as faixas de infravermelho e a vegetação é absorvida nas faixas do visível e passa a ser refletida ao entrar nas faixas de infravermelho.

A principal dificuldade no estudo do comportamento espectral da água é que, quando se estuda o comportamento de outro alvo qualquer, busca-se conhecer as propriedades daquele alvo; no caso da água, o que se busca conhecer são os componentes que se encontram nela presentes, sejam dissolvidos ou suspensos.

Em se tratando de qualidade de água, é evidente que a análise de amostras coletadas em campo fornece resultados mais satisfatórios da situação do ambiente aquático, porém, o sensoriamento remoto produz uma intensa quantidade de dados atualizados que devem ser utilizados como uma ferramenta indicadora, com potencial de fazer estimativas aproximadas, indicando locais mais ou menos degradados.

De acordo com Londe (2007), as medições através de sensores remotos vêm sendo usadas porque, além de oferecerem boa cobertura espacial e temporal, podem facilitar a definição de localizações representativas para medições em barcos e possibilitar a inclusão de um número maior de lagos e reservatórios em programas de monitoramento da qualidade da água.

Para Hellweger *et al.* (2004), o sensoriamento remoto é uma alternativa para estimar a qualidade da água, que oferece três vantagens significativas sobre as

amostragens em campo: (1) a cobertura contínua pelos imageadores a bordo de satélites permite uma estimativa sinóptica sobre grandes áreas; (2) a cobertura global dos satélites permite a estimativa da qualidade da água em locais remotos e inacessíveis; (3) o vasto arquivo de imagens armazenadas permite a estimativa da qualidade da água ao longo do tempo. A despeito disto, o procedimento também apresenta três desvantagens: (1) dificuldade de distinguir os constituintes da água, por exemplo, distinguir a assinatura espectral das macrófitas e do corpo de água; (2) amostra de água limitada à superfície em ecossistemas oceânicos, variação com a claridade da água e não controlável; (3) resolução espacial e temporal pode ser inadequada e não controlável.

Portanto, no sensoriamento remoto, o estudo do comportamento espectral da água continental é, na verdade, o estudo do sistema aquático, que abrange os processos ocorridos na bacia hidrográfica e sua conseqüente interação com a água.

O entendimento das propriedades ópticas de meios aquáticos é essencial para a análise deste tipo de alvo, a radiação que atinge a superfície da água é absorvida, espalhada e refletida. Estes três fenômenos são relacionados com as substâncias presentes no meio aquático.

A absorção está ligada às propriedades moleculares da água, ocorrendo com a passagem de um estado energético para outro, através de processos vibracionais e rotacionais que são responsáveis pelo aquecimento da água. Este é um processo seletivo que depende dos componentes dissolvidos e em suspensão.

Como ilustrado na figura 6, a água pura absorve a radiação a partir da faixa do verde em direção aos maiores comprimentos de onda, sendo desprezível a absorção na faixa do azul. Em sensoriamento remoto, a absorção de radiação é responsável pela coloração escura dos alvos, pois quanto mais o alvo absorve da radiação, mais ele aparecerá em tons escuros nas imagens.

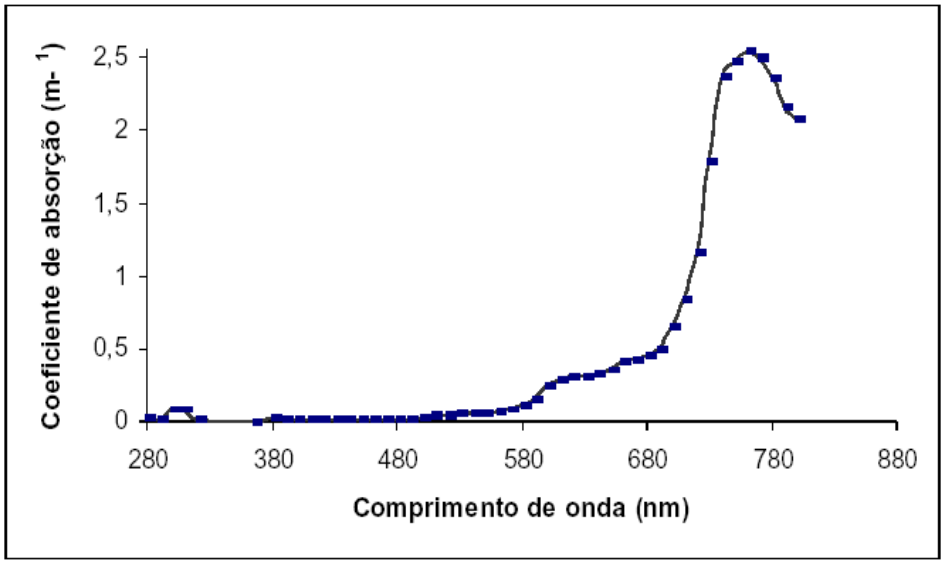


Figura 6 - Coeficiente de absorção da água pura (adaptado de Kirk, 1995).

O espalhamento é o processo que causa a mudança de direção da energia eletromagnética. Na atmosfera, ao incidir nos gases presentes, os menores comprimentos de onda são espalhados, o que origina a cor azul no céu, no meio aquático, o espalhamento deve-se às características do meio e pode ser seletivo ou não seletivo, sendo provocado pela própria água e pelas partículas em suspensão. De acordo com Mantovanni (1993), a função de volume de espalhamento fornece a distribuição espacial da intensidade de radiação proveniente de um dado volume de água, em função da radiação incidente sobre o mesmo.

De acordo com a figura 7, na água pura, o máximo espalhamento da radiação eletromagnética ocorre nos menores comprimentos de onda, principalmente na região do azul, e diminui em direção aos maiores comprimentos de onda.

A energia refletida depende da rugosidade da superfície e da geometria de aquisição e, como nos outros fenômenos, é também relacionada com as substâncias presentes na água.

Para a água limpa, as taxas de reflectância são baixas e aumentam com a presença de materiais dissolvidos e ou suspensos. De acordo com Moreira (2003), *"a água no estado liquido absorve a radiação eletromagnética em comprimentos de onda menores de 380 µm e maiores que 700 µm e que, mesmo nesta faixa intermediária, a reflectância da água é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5%"*. A

reflectância para a água limpa é maior na faixa do azul e diminui em direção ao infravermelho.

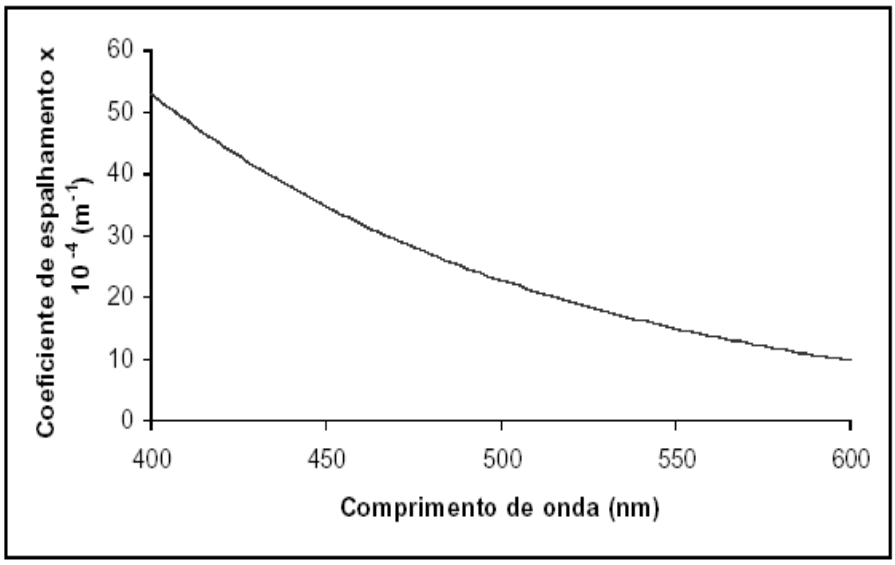


Figura 7 - Coeficiente de espalhamento da água pura (adaptado de Mobley, 1994)

Segundo Wachholz e Filho (2008), a água possui componentes opticamente ativos, especialmente no que se refere ao total de sólidos em suspensão e à clorofila, que influenciam no espectro de reflectância. A principal contribuição desses componentes para aumento da reflectância está no processo de espalhamento, principalmente da clorofila em comprimentos de onda da faixa do espectro visível correspondente à cor verde e, para o total de sólidos em suspensão, na faixa do vermelho.

As substâncias presentes na água são determinantes para sua análise, pois determinam a composição da água no momento em que é feita a coleta de dados. Assim, em termos de monitoramento por sensoriamento remoto, os comportamentos espectrais destas substâncias devem ser considerados.

As algas planctônicas absorvem a radiação eletromagnética para realizar a fotossíntese, que é a fixação da energia radiante na síntese de compostos orgânicos, sendo que a clorofila “a” é o pigmento responsável para dar início a este processo.

Para Novo (2001), as concentrações de clorofila para os vários tipos de água podem variar de 0,01 mg/m³ em águas oceânicas claras, até 10 mg/m³ em regiões muito produtivas.

Em Kirk (1996); Agusti e Philips (1992), apud Mantovani (1993):

> *"A forma e o tamanho das células ou colônias influenciam grandemente na eficiência com que estas podem absorver a radiação eletromagnética incidente, isto é, formas esféricas pequenas apresentam maior eficiência que formas esféricas grandes e formas cilíndricas finas apresentam maior eficiência que formas elipsoidais, para um mesmo volume de biomassa e concentração de pigmentos"*.

O fitoplâncton é um tipo de partícula que espalha a radiação eletromagnética em todos os comprimentos de ondas. De acordo com Novo (2001), o coeficiente de absorção é caracterizado por possuir dois máximos, um na região do azul, em torno de 450 µm, e outro na região do vermelho, em torno de 650 µm. Este alto índice de absorção de radiação eletromagnética na região do azul, provocada pela presença de fitoplâncton, causa uma diminuição da reflectância da água nesta faixa. Na faixa do verde, por apresentar um baixo coeficiente de absorção, indica uma alta reflectância de clorofila para esta faixa espectral. O figura 8 representa o espectro de absorção da clorofila.

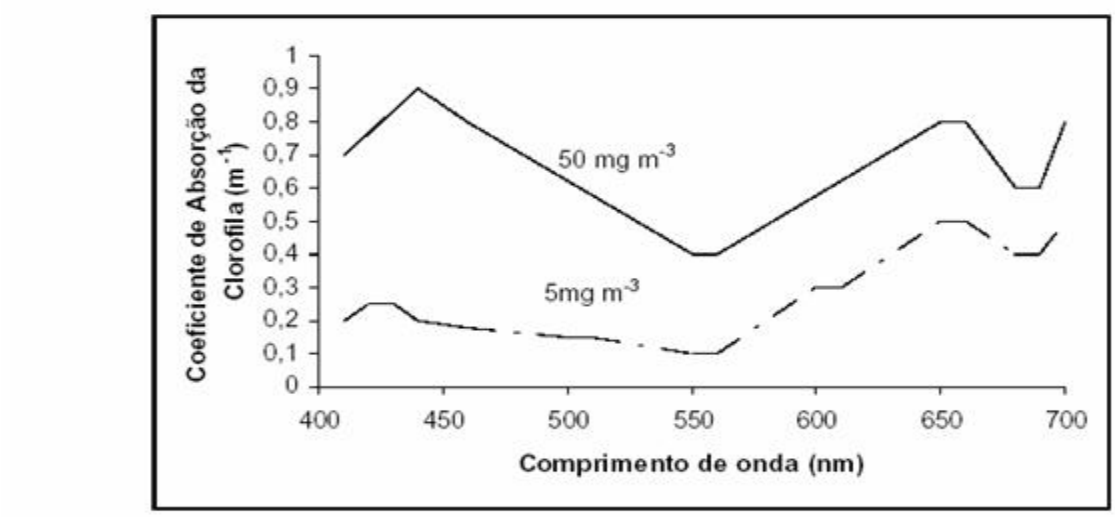


Figura 8 - Coeficiente de absorção da clorofila a diferentes concentrações (adaptado de Mobley, 1994)

O material inorgânico particulado, juntamente com a matéria orgânica dissolvida, forma uma composição de sólidos dissolvidos e suspensos presentes na água que alteram sua coloração e constituição. O material inorgânico particulado é composto principalmente por minerais provenientes de rochas e solos lixiviados; já a matéria orgânica dissolvida é constituída por substâncias provenientes de excreção, secreção e

de processos de decomposição de organismos, incluindo principalmente compostos húmicos.

A presença de sólidos dissolvidos e em suspensão na água altera as características e a sua coloração para tons escuros de marrom e amarelo. O tamanho e a forma das partículas influenciam no espalhamento da radiação eletromagnética, sendo a granulometria um parâmetro essencial para determinar como ocorre esse espalhamento.

De acordo com Menezes (1986),

> *"a composição química das partículas tem grande influência, pois dela dependem as interações microscópicas que envolvem átomos e moléculas, bem como as impurezas presentes na estrutura cristalina"*.

Os sólidos apresentam elevados índices de absorção nas faixas do ultravioleta em direção ao visível, sendo a faixa do azul responsável pela maior absorção no espectro visível, diminuindo em direção ao infravermelho, sendo inverso à curva de absorção da água limpa. A figura 9 representa o espectro de absorção de sólidos na água.

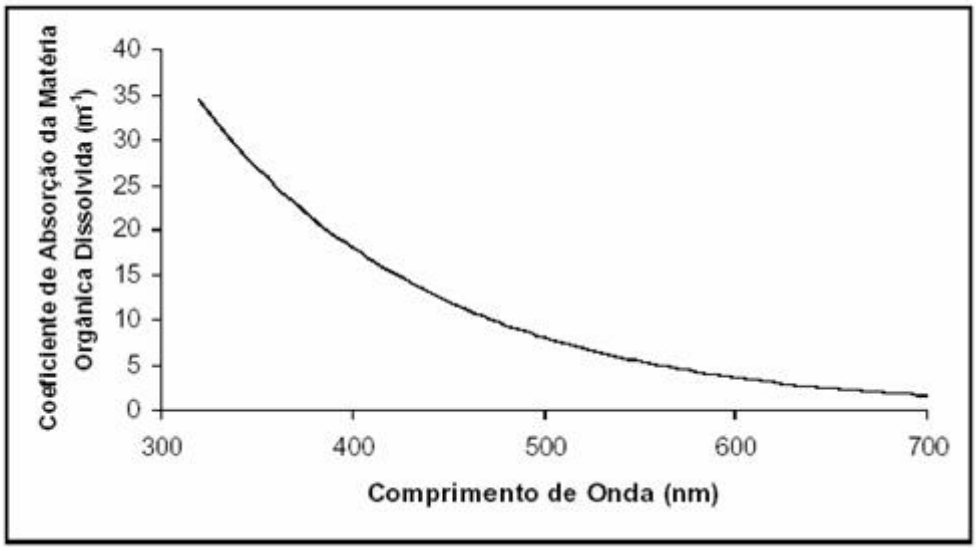


Figura 9 - Espectro de Absorção de Matéria Orgânica Dissolvida na Água (Fonte: Kirk, 1995).

Ocorrendo um aumento na concentração de sólidos, haverá uma diminuição na reflectância na faixa do azul e um amento da reflectância na faixa do vermelho. Pereira (1992), demonstrou quantitativamente que o particulado mineral em suspensão é

responsável por um aumento na reflectância do corpo de água: há um aumento na radiância solar refletida na faixa do vermelho à medida que se aumenta a concentração de particulado em suspensão na água. Quanto maior a quantidade de particulado mineral em suspensão, maior será a reflectância na faixa no vermelho.

Assim, em águas limpas, a faixa espectral do azul é refletida, enquanto as faixas do verde, vermelho começam a sofrer maior absorção e as faixas do infravermelho são absorvidas por completo, fenômeno que caracteriza a cor azul para o corpo hídrico. Esses índices variam de acordo com as substâncias presentes na água. Em uma região onde existe a presença de compostos húmicos, a faixa do espectro correspondente à cor amarela e vermelha é refletida, já o azul em maior intensidade e o verde são absorvidos, dando uma coloração amarelada e marrom para a água. Já com a presença de organismos clorofilados, ocorre a absorção das faixas do azul e vermelho, havendo maior reflexão na faixa do espectro correspondente à cor verde, fato que proporciona um tom esverdeado para a água.

2.4 ALGUNS ESTUDOS ANTERIORES

Alguns estudos já realizados tornaram-se referência para o desenvolvimento da pesquisa. Padial e Nishimura (2006) apresentaram um relatório com o título “Análise do comportamento espectral da água no reservatório Guarapiranga, Rio grande e Braço Taquaquecetuba no complexo Billings onde, neste relatório, eles objetivaram diferenciar o comportamento espectral da água, utilizando faixas do verde, vermelho e infravermelho próximo. Utilizaram imagens do sensor orbital CBERS 2 do dia 30 de junho de 2005. Esta imagem foi analisada na banda do infravermelho próximo, como parâmetro para o estudo da vegetação, buscando identificar as macrófitas aquáticas emersas. Na banda do vermelho, visando a encontrar alterações na turbidez e, na banda do verde, objetivando encontrar variações para a absorção de clorofila-a. Os resultados foram comparados entre os três reservatórios, sendo que foram encontrados resultados semelhantes em relação às coletas de campo, ou seja, nos três locais analisados, a resposta espectral observada nas imagens em relação aos parâmetros foi a mesma.

Barbosa et al. (2005) apresentaram um artigo com o título “Caracterização espectral das massas d’água Amazônica” onde foram feitas correlações entre amostras de qualidade da água e medidas radiométricas coletadas no mesmo momento. No final da pesquisa, tais autores concluíram que esse estudo possui um grande potencial de

informação contido nos espectros coletados, um potencial que vai muito além da identificação dos componentes da água, permitindo mesmo o levantamento de hipóteses sobre os processos biológicos e suas interações com a hidrodinâmica do lago no momento da coleta.

Mantovani e Novo (1996) publicaram o artigo “Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida”, onde foram realizados experimentos de radiometria em nível laboratorial, utilizando tanques que tinham a função de simular situações naturais. Os resultados encontrados mostraram o efeito da matéria orgânica dissolvida na redução do fator de reflectância da água na faixa do visível e, na faixa do infravermelho, verificou-se que o aumento da concentração de matéria orgânica dissolvida promove o aumento da reflectância.

Estudos realizados por Pereira (1992) encontraram correlação entre o total de sólidos em suspensão e a reflectância das bandas do visível (Banda 1, 2 e 3 - TM LANDSAT 5) no Reservatório de Passo Real – RS. Estimaram-se classes de níveis de concentração de sólidos em suspensão, utilizando imagens TM LANDSAT 5.

Teixera et al. (2004) publicaram, na revista Minerva, o trabalho “Previsão de vida útil do reservatório de Barra Bonita utilizando digitalização de mapas e comparação batimétrica” onde foram relacionados dados de levantamentos batimétricos de diferentes datas, objetivando avaliar a evolução dos impactos no reservatório.

Dias et al. (2005) publicaram o artigo “Sensoriamento remoto para a caracterização do aporte de sedimentos e compostos orgânicos da represa de Paraibuna, São Paulo”. Nessa publicação, foi apresentado um projeto com o intuito de correlacionar os dados radiométricos, coletados em campo com um espectro-radiômetro, aquisição de dados hiperespectrais através de um sensor aerotransportado de alta resolução e dados de qualidade da água amostrados juntamente com os dados do espectro-radiômetro. Dentre os resultados apresentados está a obtenção de espectros consistentes com as características espectrais dos compostos aquáticos opticamente ativos e o estabelecimento de correlações entre valores espectrais obtidos remotamente e variáveis limnológicas medidas diretamente.

Lima et al. (2007) publicaram o artigo “Caracterização da dispersão espacial de plantas aquáticas usando sensoriamento remoto e geoestatística” utilizaram como área de estudo o reservatório de Salto Grande em Americana em SP, o qual se trata de um dos reservatórios mais eutrofizados do estado de São Paulo, minimizando inclusive a produção de energia e desvalorizando a área de entorno. No referido estudo, foram

utilizadas 18 imagens de diferentes sensores orbitais entre os anos de 2000 e 2005. O trabalho estabeleceu, através da interpretação das imagens e estudo multi-temporal, um modelo de evolução e disseminação das plantas aquáticas dentro do reservatório nesses anos.

Entre os trabalhos citados, percebe-se um grande otimismo dos pesquisadores que analisaram o uso do sensoriamento remoto, relacionando-o com a qualidade da água. Este otimismo deve-se aos resultados obtidos nessas pesquisas e principalmente aos avanços tecnológicos que vão tornando mais exatos e confiáveis os resultados do trabalho com imagens de satélites que cada vez mais contam com melhores resoluções espectrais e espaciais.

Um consenso entre estes pesquisadores é a pouca produção científica em relação ao tema. Há, todavia, uma necessidade de se incrementar a quantidade de estudos nesse ramo, pois os trabalhos de análise espacial estão passando por um processo de evolução onde, a cada dia, estão mais dependentes de dados de sensores remotos. Da mesma forma, a análise da qualidade da água torna-se cada vez mais importante com o aumento do uso e da degradação das fontes hídricas.

Conclui-se que os estudos que relacionam qualidade da água com sensoriamento remoto têm evoluido, alcançando resultados mais acurados a cada avanço tecnológico que introduz melhores sensores orbitais e programas computacionais mais completos.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 COLETA DE DADOS A PARTIR DA LITERATURA

Conforme já foi comentado, este trabalho utilizou dados de campo publicados por Coelho (2004). Durante a campanha de campo organizada pelo referido pesquisador, foram demarcadas 16 estações de coleta, chamadas de estações lóticas, englobando os principais tributários do reservatório: P-00- Ponte Paranaíba (jusante da barragem), P02 – Rio Mateira, P03 – Rio Alegre, P-04 – Ponte Rio Preto, P-05 – Ponte Rio São Francisco, P-11 – Ponte do Rio Meia Ponte, P-14 – Córrego dos Bois (Sta. Vitória), P14-a – Córrego Invernada (Sta. Vitória), P-15 – Ponte Ribeirão dos Patos, P-16 - Ponte Rio da Prata, P-17 - Ponte Rio Tijuco (Ponte Velha), P17 B – Rio Tijuco (região rural), P-18 – Ribeirão Campanha, P-19 – Ribeirão Jacaré, P-20 – Rio São Gerônimo.

Além de 9 estações de coleta, cobrindo a área do lago, denominadas de estações lênticas: Estação C-02 – ponto localizado no eixo central (zona represa), C-05 ponto localizado no eixo central na região da confluência com o rio Alegre (zona represa), C-06 – ponto localizado no eixo central na região da confluência com o rio Preto (zona intermediária), C-07– localizado no eixo central na região da entrada do rio São Francisco (zona intermediária), C-08 – ponto localizado no braço do rio dos Bois (zona de influência lótica), C-09 – ponto localizado no braço formado pelos rios Tijuco e Prata (zona de influência lótica), C-10 – ponto no eixo central na região da balsa de Gouveinha (zona intermediária), C-13 – ponto lótico junto à balsa sobre rio Paranaíba logo a jusante da represa de Cachoeira Dourada (zona tipicamente lótica com correnteza), C-14 – ponto próximo à praia artificial da cidade de São Simão, Goiás (zona intermediária. O mapa 5 ilustra a localização dos pontos de coleta de amostras de água no reservatório de São Simão e nos afluentes.

425000 500000 575000 650000

7975000

7900000

N

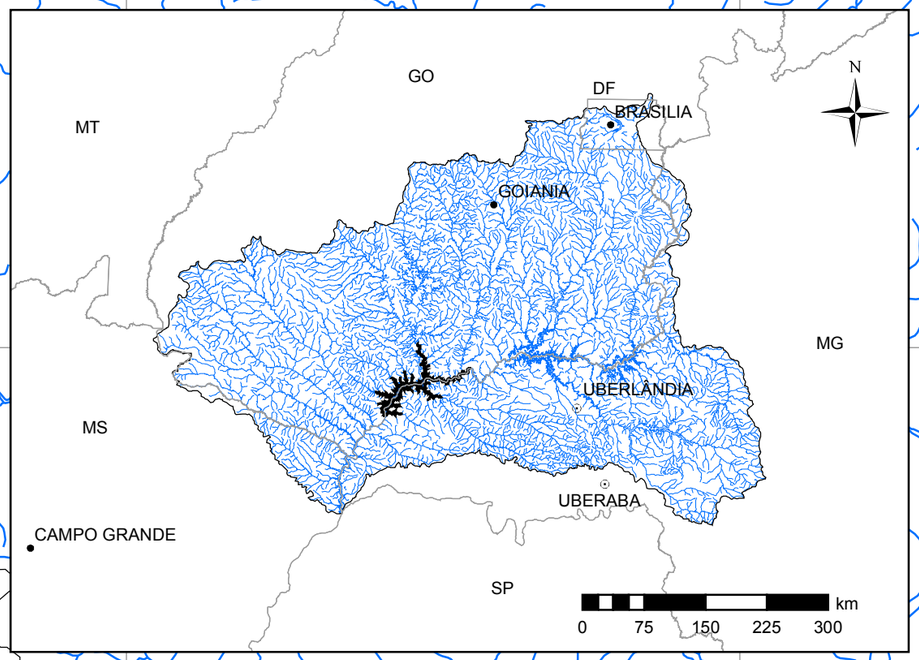
p_05 p_11 p_18 p_13 p_04 p_19 p_03 p_02 p_14_ap_14 p_20 p_16 p_17_b p_17 p_17_a p_15 p_00

c_08 c_06 c_09 c_05 c_14 c_02

1:750.000

0 7.500 15.000 22.500 30.000 m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51°
Datum SAD 69
Fonte: COELHO, 2004



Mapa 5: Localização dos pontos de coleta

LEGENDA:

- PONTOS LÊNTICOS
- PONTOS LÓTICOS
- HIDROGRAFIA
- RESERVATÓRIO SÃO SIMÃO

QUADRO DE PONTOS DE COLETA

? ? ?	??? ???	???????	?? ????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????

????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????
????	???? ??	??????????????	??????????????

De acordo com o relatório final da pesquisa realizada por COELHO, 2004, foram determinantes, para a escolha dos pontos de coleta, o antigo canal do rio e os eventos históricos, como locais de ocorrência de florescimento de algas. Os pontos foram georrefereciados com GPS nas coordenadas UTM, SAD 69, zona 22-S e, em cada ponto, foram examinadas treze variáveis físico-químicas: Condutividade elétrica; Oxigênio Dissolvido; Transparência da água; Temperatura da água; PH; Turbidez; Matéria em suspensão (sólidos orgânicos, inorgânicos e totais); Fósforo Total; Fósforo Solúvel; Amônia; Nitrito; Nitrato. Também foram avaliadas três variáveis biológicas: clorofila-a, fitoplâncton e cianobactérias.

Foram realizadas 7 campanhas para coleta de dados nos seguintes períodos: Janeiro de 2002, Abril de 2002, Julho de 2002, Outubro de 2002; Janeiro de 2003, Outubro de 2003 e Janeiro de 2004. Os dados e resultados obtidos foram publicados e encontram-se disponíveis na literatura e na página do Laboratório de Gestão de Reservatórios do Instituto de Ciências Biológicas da UFMG.

Estes dados foram utilizados para desenvolvimento da presente pesquisa, a qual buscou fazer a relação dos dados coletados em campo com os dados de sensoriamento remoto obtidos nas imagens dos satélites Land-Sat 5 e Land-Sat 7. As variáveis que foram relacionadas para realizar a correlação com os dados obtidos nas imagens foram: Clorofila, turbidez e transparência da água. Estas variáveis foram selecionadas por apresentarem alterações na coloração da água, podendo ser identificáveis em sensoriamento remoto.

Segundo a metodologia descrita na publicação do relatório da pesquisa realizada pela UFMG, as variáveis foram coletadas, os parâmetros determinados, sendo divulgados os resultados conforme as descrições seguintes.

Os dados referentes à clorofila foram determinadas a partir de amostras enviadas para o laboratório de gestão ambiental de reservatórios (departamento de Biologia Geral, ICB, UFMG), as amostras foram filtradas à vácuo ainda no dia de coletas. Foram utilizados filtros de fibra de vidro *Schleicher & Schüll* (GF 47) de 47 mm de diâmetro que foram dobrados com as faces internas voltadas entre si. A seguir, os filtros foram envoltos em papel alumínio multi-perfurado e transferidos para caixas de polipropileno opacas contendo sílica gel, onde ficaram estocados (-15C°, no escuro) até a data da análise. No laboratório, a extração e análise da clorofila-a seguiram a técnica proposta por Lorenzen (1967). Foi utilizado um espectrofotômetro Shimadzu UV-VIS, equipado com cubetas de quartzo de 1cm de paço ótico. Os resultados encontrados para clorofila,

de acordo com as análises realizadas, estão representados no quadro 4. As coletas, que foram úteis para serem relacionadas, com as imagens são as de Abril de 2002, Julho de 2002, janeiro de 2003, Janeiro de 2004, pois apenas nestes meses são encontradas imagens do satélite Land-Sat disponíveis.

CONCENTRAÇÕES de CLOROFILA-A (µg.L^{-1}), NA SUPERFÍCIE DA ÁGUA, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta - CÓDIGO	**abr/02**	**jul/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	0,0	0	1,92	0
C-05	0	0	0	1,09
C-06	0,8	0	0	N.D.
C-07	0	0	0	N.D.
C-08	0,8	0	0,7	3,2
C-09	6,4	0	3,2	39,1
C-10	1,6	1	0	n.d.
C-13	0	0,9	0	2,4
C-14	N.D.	N.D.	N.D.	0

Quadro 4 – Valores de clorofila-a coletados em campo. * N.D. pontos não coletados.
Fonte: Coelho 2004 – Organização Vilela M.A.

Para o fitoplâncton, as análises foram feitas em amostras de 500 mL, coletadas com a garrafa de Van Dorn de 2 litros (Hydrobios) e fixadas com lugol acético. As amostras foram coletadas na zona fótica do reservatório (0,5 m de profundidade). Amostras qualitativas foram também tomadas com o auxílio de uma rede cônica de 15 cm de diâmetro e abertura de malha de 20 µm. Essas amostras serviram de suporte para as determinações taxonômicas do fitoplâncton. O fitoplâncton (maior que 20 micra) foi analisado quantitativamente pela técnica do microscópio invertido (Utermohl, 1958; Lund, 1959). Foi usando um microscópio invertido Zeiss nos aumentos (objetivas) 10X e 100X e cubetas cilíndricas de pexiglas de diferentes volumes. O tempo de sedimentação foi de 24 horas. Foi contado um número de campos que garantisse um mínimo de 400 indivíduos para a espécie dominante. As análises de plâncton foram realizadas no Laboratório de Gestão de Reservatórios Tropicais, Departamento de Botânica, ICB, UFMG. Usou-se o microscópio invertido Olympus modelo CK 40 para as análises. Essa análise das algas fitoplanctônicas foi dividia em 4 grupos:

Cyanobacteria, Chlorophyta, Chrysophyta, Cryptophyta. O resultado de cada grupo aparece nos quadros 5, 6, 7, 8.

VALORES de DENSIDADE DE CYANOBACTÉRIAS: INDIVÍDUOS POR ml DE ÁGUA, NA SUPERFÍCIE, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**jul/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	709	10,9	137	396
C-05	77	54,1	20	290
C-06	114	92	14	N.D.
C-07	56,8	67,7	26	N.D.
C-08	11,3	350	8	6
C-09	3,9	13,5	11	890
C-10	3	0,9	5	N.D.
C-13	10,6	1,6	5	25
C-14	N.D	N.D	N.D	N.D.

Quadro 5 – Valores de cyanobactérias coletados em campo.* N.D. pontos não coletados.
Fonte: Coelho 2004 – Organização Vilela M.A.

VALORES de DENSIDADE DE CHLOROPHYTA: INDIVÍDUOS POR ml DE ÁGUA, NA SUPERFÍCIE, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**jul/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	288	81	210	314
C-05	71,1	311	154	315
C-06	183,9	298,1	180	N.D.
C-07	100,1	548,4	164	N.D.
C-08	127,9	267	58	31
C-09	23,7	367,9	122	153
C-10	22,7	133,4	84	N.D.
C-13	44,9	131,3	84	68
C-14	N.D	N.D	N.D	N.D.

Quadro 6 – Valores de chlorophyta coletados em campo. * N.D. pontos não coletados.
Fonte: Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

VALORES de DENSIDADE DE CHRYSOPHYTA: INDIVÍDUOS POR ml DE ÁGUA, NA SUPERFÍCIE,NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**jul/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	58	24,7	13	26
C-05	20,7	63,2	0	0
C-06	8	31	8	N.D.
C-07	51,8	61	5	N.D.
C-08	84,7	0	0	13
C-09	17,8	79	0	0
C-10	5,9	5,6	0	N.D.
C-13	3,9	7,7	0	8
C-14	N.D	N.D	N.D	N.D.

Quadro 7– Valores de chrysophyta coletados em campo. * N.D. pontos não coletados
. Fonte: Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

VALORES de DENSIDADE DE CHRYPTOPHYTA: INDIVÍDUOS POR ml DE ÁGUA, NA SUPERFÍCIE, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**jul/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	43	6,9	0	84
C-05	13,8	56,4	10	205
C-06	16	8	5	N.D.
C-07	2,5	33,8	69	N.D.
C-08	9,4	36	3	0
C-09	3	478,4	16	467
C-10	1	6,3	10	N.D.
C-13	4,6	2,9	11	41
C-14	N.D	N.D	N.D	N.D.

Quadro 8 – Valores de chryptophyta coletados em campo.* N.D. pontos não coletados.
Fonte: Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

O Quadro 9 indica a quantidade de algas fitoplanctônicas presentes por ml de água coletada, sendo construída somando os 4 grupos de algas analisados.

VALORES de DENSIDADE DE FITOPLÂNCTON: INDIVÍDUOS POR ml DE ÁGUA, NA SUPERFÍCIE, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**jul/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	1098	123,5	360	820
C-05	182,6	484,7	184	810
C-06	321,9	429,1	207	N.D.
C-07	409,2	710,9	264	N.D.
C-08	233,3	653	69	50
C-09	48,4	938,8	149	1510
C-10	32,6	146,2	99	N.D.
C-13	64	143,5	100	142
C-14	N.D.	N.D	N.D	N.D.

Quadro 9 – Valores de fitoplâncton coletados em campo. * N.D. pontos não coletados.
. Fonte: Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

A quantidade de sólidos totais presentes na água foi determinada através de método gravimétrico. Cerca de 50 a 3000 ml de amostra (dependendo do local de coletas) de água foram filtrados em filtros de fibra de vidro (*Schleicher and Schüll*, 25mm de diâmetro, tarados e pré incinerados (em mufla, a 550 °C por 4 horas). Os filtros foram depositados em caixas de polipropileno opacas, dotadas de sílica-gel, acondicionadas em congelador até a data da análise. No laboratório, os filtros foram, a seguir, depositados em estufa (70C°, 3 horas ou até atingirem peso constante). A seguir foram pesados em balança analítica Mettler e, em seguida, transferidos para a mufla, incinerados e novamente pesados. O quadro 10 indica os teores de sólidos totais, nas diversas campanhas de coleta.

CONCENTRAÇÃO de SÓLIDOS TOTAIS ($mg.L^{-1}$) NA SUPERFÍCIE DA ÁGUA, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**ago/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	12,4	N.D.	N.D.	1,7
C-05	24,1	1,2	39,1	3,2
C-06	5	1,6	13,5	n.d.
C-07	4,5	1	4,3	n.d.
C-08	13,1	1,1	27,4	5
C-09	5	3,1	34,8	9,4
C-10	6,5	3,1	4,3	n.d.
C-13	6,5	2,6	3	4,3
C-14	N.D.	N.D.	N.D.	1,7

Quadro 10 – Valores de sólidos totais coletados em campo. * N.D. pontos não coletados.
Fonte:Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

A turbidez foi medida com um turbidímetro portátil DIGIMED (unidades NTU). O quadro 11 relaciona os resultados para turbidez.

VALORES de TURBIDEZ (em NTU), NA SUPERFICÍE DA ÁGUA, NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**ago/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	N.D.	N.D.	7,17	0
C-05	N.D.	N.D.	9,2	8,06
C-06	N.D.	N.D.	13,99	n.d.
C-07	N.D.	N.D.	16,36	n.d.
C-08	N.D.	N.D.	46,2	94,9
C-09	N.D.	N.D.	145	27,5
C-10	N.D.	N.D.	22,7	n.d.
C-13	N.D.	N.D.	12,34	27,3
C-14	N.D.	N.D.	N.D.	0

Quadro 11 – Valores para turbidez coletados em campo. * N.D. pontos não coletados.
Fonte:Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

A transparência foi medida pelo disco de Secchi e os resultados, para os pontos coletados, estão no quadro 12.

VALORES de TRANSPARÊNCIA (em METROS) OBTIDOS PELO DISCO DE SECCHI NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS				
Ponto de coleta – CÓDIGO	**abr/02**	**ago/02**	**jan/03**	**jan/04**
C-02	3,9	4,3	2	1,6
C-05	2,3	4	1,5	1
C-06	1	3,9	1,1	N.D.
C-07	1,1	3,9	1	N.D.
C-08	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
C-09	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
C-10	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
C-13	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
C-14	N.D.	N.D.	N.D.	1,7

Quadro 12 – Valores para trasparência coletados em campo.* N.D. pontos não coletados.
Fonte:Coelho 2004 – Organização Vilela M.A

3.2 PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS

As imagens do satélite Land-Sat, utilizadas nas análises da presente pesquisa, foram adquiridas gratuitamente, a partir da página do INPE na internet. Assim, no sentido de se buscar uma correlação com as coletas de campo, realizadas por Coelho (2004), foram utilizadas as imagens correspondentes às datas de abril de 2002, julho de 2002, janeiro de 2003 e janeiro de 2004. Para as outras coletas, não foram encontradas imagens disponíveis da área.

As imagens foram adquiridas por banda espectral, sendo 7 bandas por imagem, podendo ser combinadas ou analisadas individualmente. No sentido de se obter resultados correlacionáveis com os de qualidade da água, as bandas utilizadas do satélite Land-Sat foram a 1, 2 e 3, pois, nestas faixas espectrais, a água apresenta as maiores taxas de reflexão. A banda 1 do satélite Land-Sat corresponde à faixa espectral

da cor azul, com comprimento de onda que vai de 0,45 a 0,52 µm, a banda 2 corresponde à cor verde, que vai de 0,52 a 0,60µm e a banda 3 corresponde à cor vermelha e seu comprimento de onda está entre 0,63 e 0,69 µm . Dessa forma, após a aquisição destas faixas espectrais, iniciou-se a fase de processamento.

O processamento digital de imagens consiste na manipulação numérica de imagens digitais, objetivando melhorar o poder de visualização dos alvos, sendo necessária a correção de distorções, degradações e ruídos introduzidos na imagem durante o processo de imageamento.

As imagens produzidas por sensores remotos apresentam distorções geométricas, possuindo relativa precisão cartográfica quanto ao posicionamento de objetos, superfícies e fenômenos representados. Estes erros resultam de causas como rotação e curvatura da Terra, variação de altitude, posição e velocidade da plataforma e outros. Para corrigir tais erros é necessário realizar a correção geométrica, ou georreferenciamento, que é feito ajustando uma imagem a um mapa ou outra imagem que possui um sistema de coordenadas de referência. Assim, são estabelecidos pontos de amarração da imagem sem referência para a imagem georreferenciada.

Como a presente pesquisa lidou com uma análise multi-temporal de uma área, foi necessário realizar o georreferenciamento de todas as imagens do reservatório de São Simão, adquiridas em todas as bandas analisadas, para se obter uma maior precisão com relação aos pontos coletados em campo. Nesse sentido, a primeira fase deste georreferenciamento consistiu em adquirir uma imagem do satélite Land-Sat ortorretificada da mesma área, através do programa "*Global Land Cover Facility* (GLCF)" que é um serviço disponibilizado pela Universidade de Maryland nos EUA, através do link: http://glcf.umiacs.umd.edu/research/portal/geocover/ortho.shtml. Neste link são oferecidos diversos tipos de imagens e produtos gerados por sensores orbitais. A base de dados do Geo Cover disponibiliza imagens padronizadas e corrigidas geometricamente para toda a superfície do planeta, com exceção da Antártica.

Também foi necessário padronizar o sistema de projeções. No caso, foi utilizado a projeção Universal Transverse de Mercator (UTM), e o Datum foi o WGS84, o mesmo das imagens do programa Geo Cover.

Nesta fase, foi utilizado o programa Envi 4.3 para o processamento digital de imagens. Para realizar o georreferenciamento, selecionou-se, no menu principal do programa, a opção "Mapa – Registro" e a opção "selecionar pontos de controle":

imagem para imagem. A figura 10 ilustra o procedimento que inicia o georreferenciamento da imagem, no programa citado.

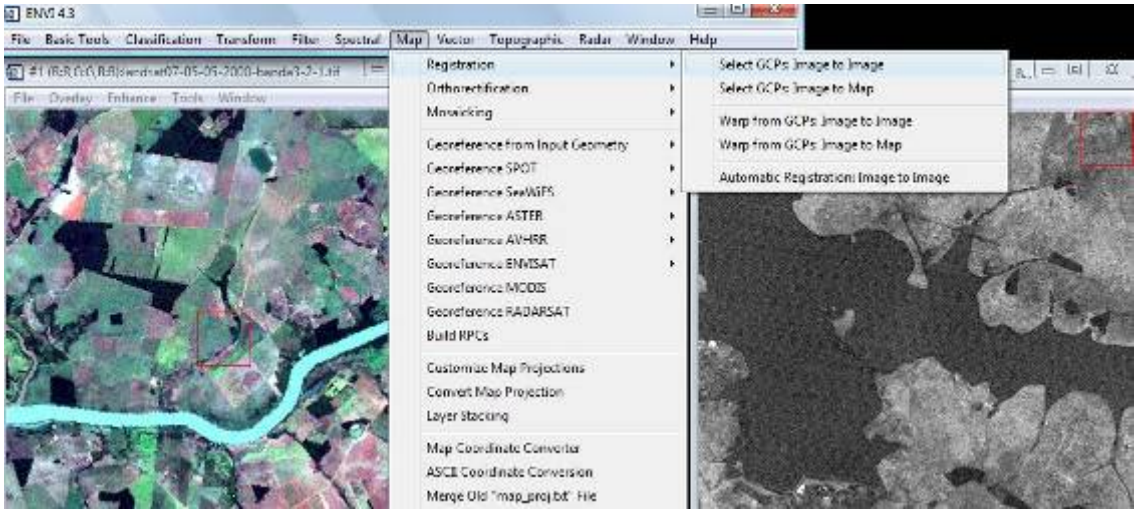


Figura 10 - programa ENVI. Iniciando o Georreferenciamento de imagens

As duas imagens são abertas na tela, a imagem base é a do programa Geo Cover, sendo utilizada uma composição com as bandas 3,2,1 chamada de composição natural, pois apresenta as cores naturais da superficie e mostra boa visualização da área. Na outra janela, é aberta a imagem a ser georreferenciada (imagem de transformação) que, no primeiro momento, foi a banda 1 da imagem de abril de 2002 (ver figura 11), sendo adotado o mesmo procedimento para a banda 2 e a banda 3, desta imagem, também para as outras imagens de agosto de 2002, janeiro de 2003 e janeiro de 2004.

No processo de georreferenciamento, foi necessário estabelecer no mínimo 5 pontos de controle entre as duas imagens, que são pontos identificados correspondendo ao mesmo local nas duas imagens. Neste caso, foram estabelecidos 10 pontos de controle com erro menor que um metro em todos eles. Ou seja, de uma imagem para outra, o ponto de controle sofre um deslocamento menor que 1 metro. Este erro é mostrado em uma tabela de controle de pontos e podem-se excluir os pontos que tenham erros superiores e substituí-los por outros. Os pontos são escolhidos aleatoriamente, onde objetos ou feições são identificados nas duas imagens. A imagem do programa Geo Cover é de 2001, portanto não há grande alteração de feições e objetos, pois são de anos próximos.

Após o georreferenciamento das imagens, iniciou-se o procedimento de determinação da região de interesse de análise que, neste caso, foi a área do

reservatório. Assim, foi gerada uma nova imagem contendo apenas a área do reservatório. É recomendável utilizar esta etapa quando se tem intenção de realizar processos de classificação e ajuste de contraste na área de interesse, o que justamente ocorreu nas análises desta pesquisa.

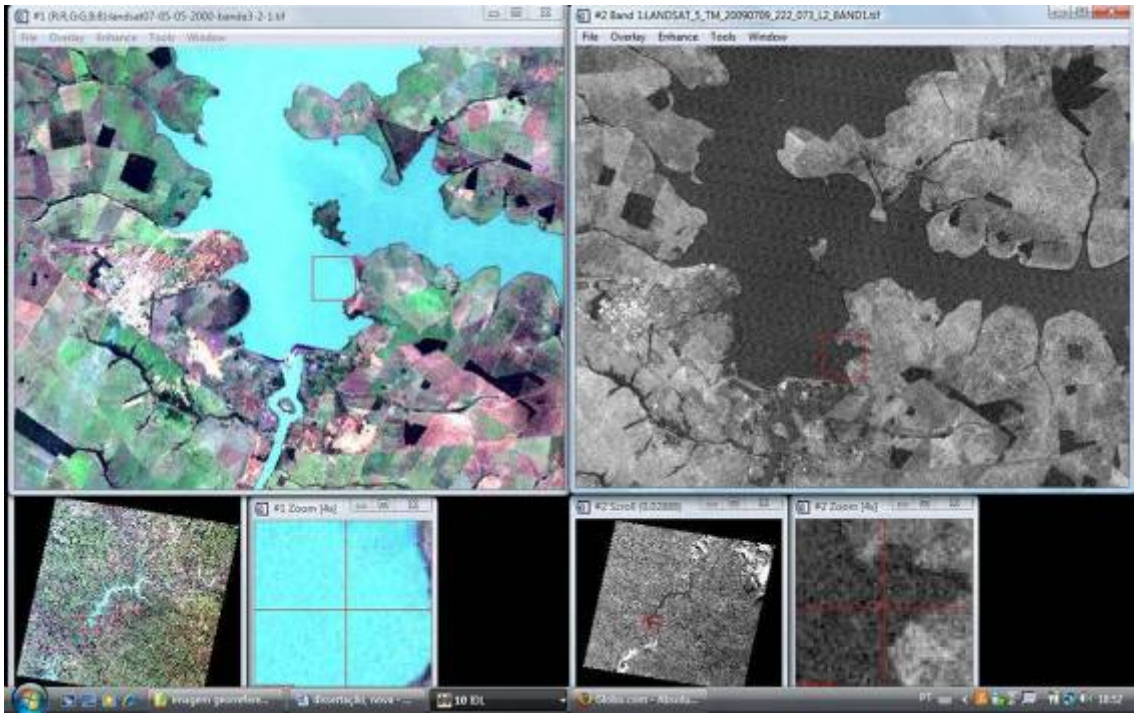


Figura 11 - programa ENVI. A imagem colorida foi georreferenciada pelo programa Geo Cover, e a outra corresponde à imagem em processo de georreferenciamento.

Ainda diante da aplicação do programa Envi, definiu-se o tipo de região de interesse – neste caso um polígono – que foi definida na janela de ampliação do programa. Selecionou-se, então, o polígono em torno no reservatório (ver figura 12). O polígono, salvo no entorno do reservatório, pode ser exportado para outras imagens da mesma área que estão georreferenciadas, extraindo de todas as imagens a área do reservatório. Dessa forma, estes arquivos foram salvos e passou-se a se trabalhar apenas com a área do lago.

As imagens com a área do reservatório passaram por ajustes de histogramas, aumentando o contraste, possibilitando uma maior amplitude entre os valores digitais, visando a aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem.

Concluída a primeira etapa de processamento no programa Envi, iniciou-se a sobreposição, dos pontos de coleta em campo para as imagens, utilizando o programa Arc-Gis 9.3.

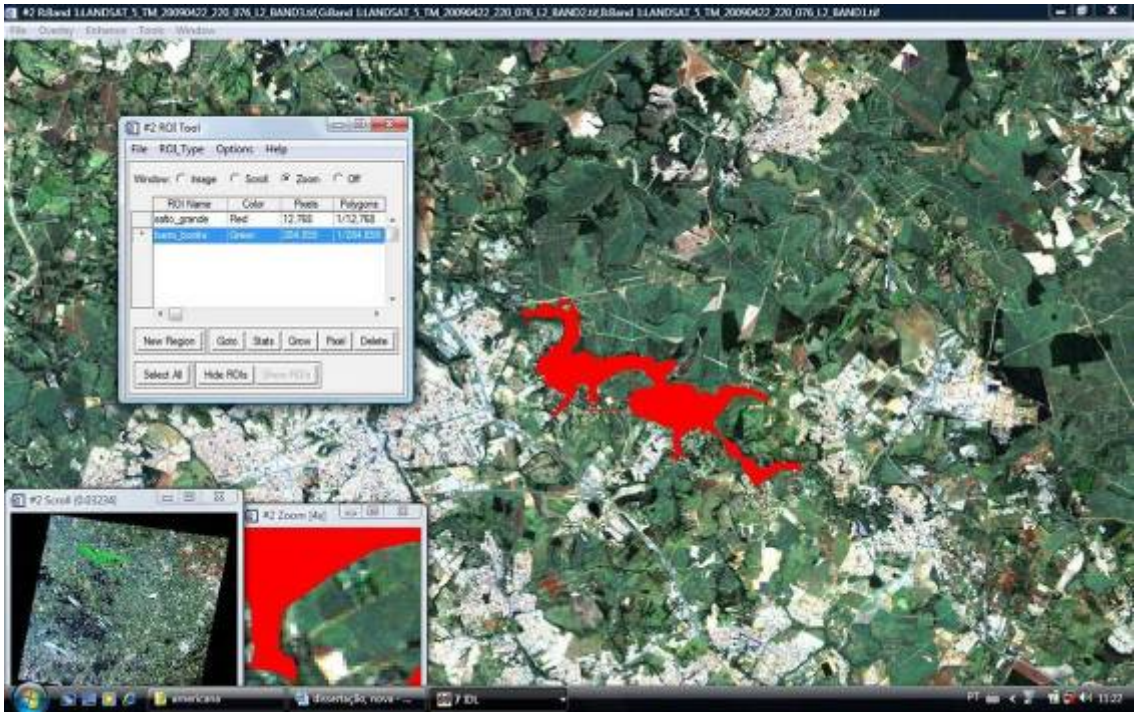


Figura 12 - programa ENVI. Definição de Regiões de Interesse.

As coordenadas UTM, coletadas em campo e publicadas por Coelho (2004) foram transferidas para as imagens, localizando os pontos de coleta de amostras de água. Assim, cada ponto coletado em campo corresponde a um pixel ou célula da imagem (ver figuras 13 e 14).

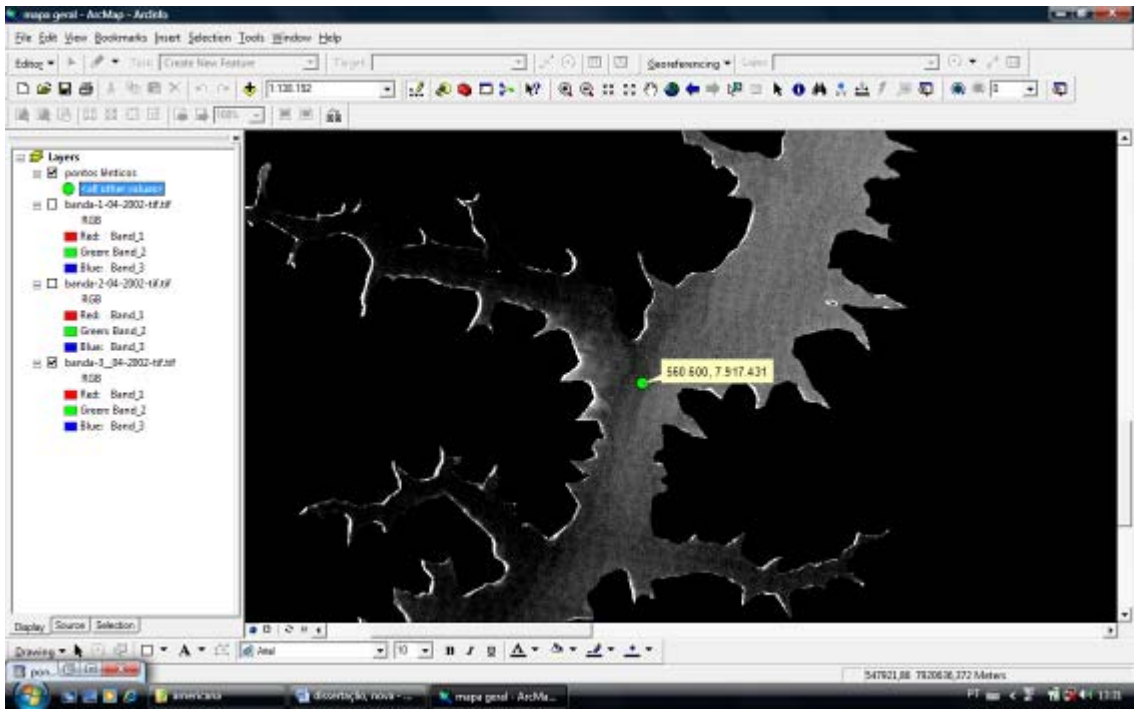


Figura 13 - programa ArcGis. Sobreposição dos pontos de coleta (ponto indicado na figura)

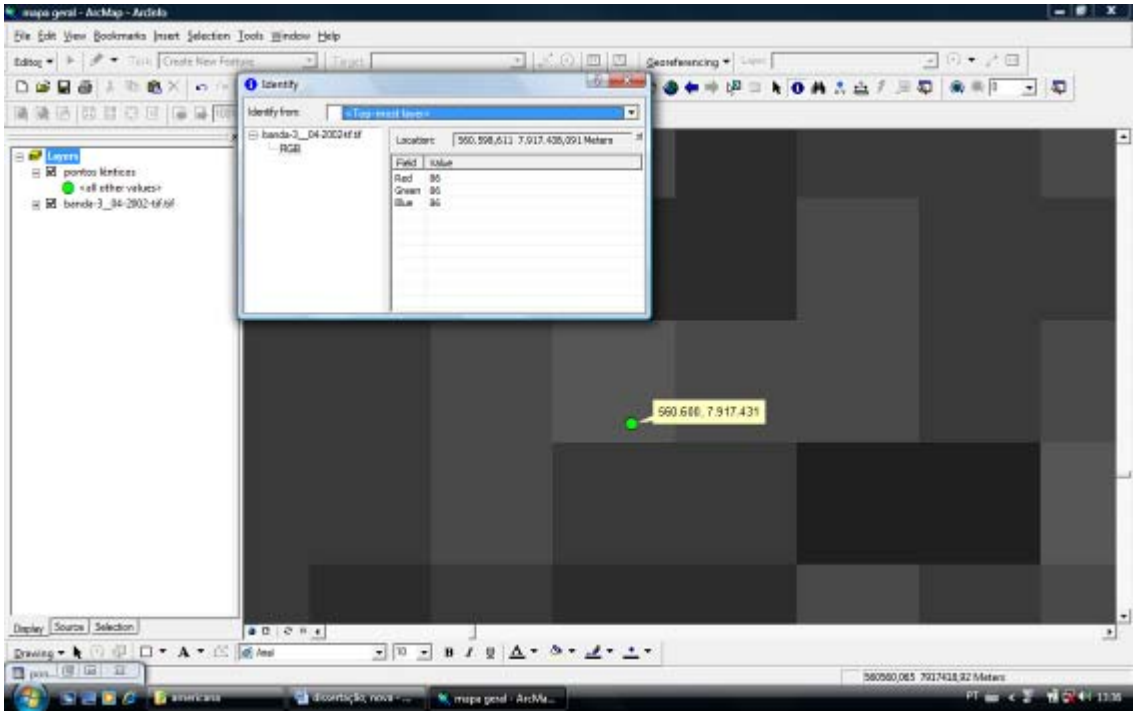


Figura 14 - programa ArcGis. Identificação dos valores de nível de cinza. O ponto de coleta de amostra de água está indicado na figura.

Em uma etapa seguinte, foi retirado, das imagens, o valor de nível de cinza de cada pixel, correspondente ao ponto de coleta. Nesse contexto, cada intensidade de cinza é valorada com um índice numérico. Como foi analisada uma banda da imagem por vez, foi utilizada a classificação em níveis de cinza, pois cada imagem possui 256 níveis diferentes. Neste estudo, cada pixel ou célula de imagem possui uma área de 30 x 30m. Visando à diminuição de erros de precisão, foram extraídos os valores para níveis de cinza nos 8 pixels vizinhos, totalizando uma área de 8.100 m² (ver figura 15). Este procedimento teve o objetivo de evitar a concentração de informações, relacionadas aos níveis de cinza, em uma única célula, fator que poderia levar a concentrações muito discrepantes, dos parâmetros de qualidade analisados, entre células vizinhas. Além disto, as datas de coletas de amostras em campo e da varredura realizada pelo satélite (para construir a imagem) não são coincidentes. Por isto, a concentração de informações, sobre o parâmetro, em um único pixel pode ser prejudicial por não considerar a possível dispersão do mesmo. Nesse sentido, para os valores de níveis de cinza extraídos desses 9 pixels, optou-se por retirar a média aritmética, obtendo um único valor que foi usado na correlação com os parâmetros de qualidade da água

analisados. Esta sobreposição foi realizada nas 3 bandas das 5 imagens correspondentes à área da hidrelétrica de São Simão.

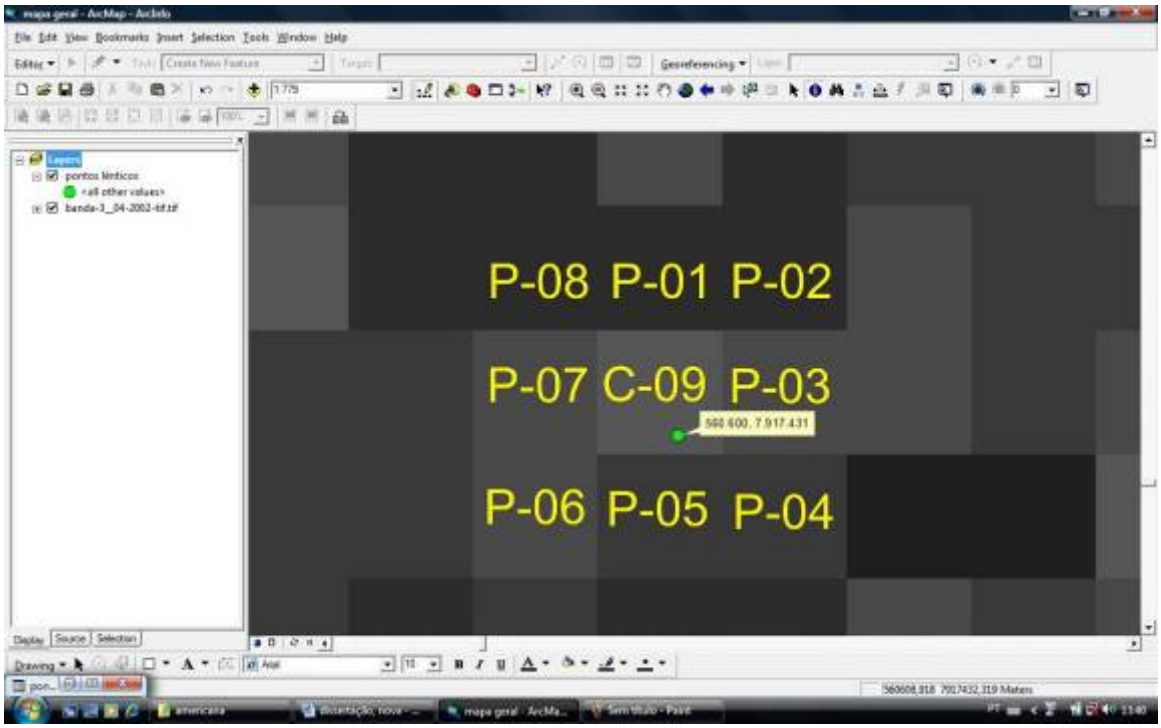


Figura 15- programa ArcGis. Identificação dos valores de nível de cinza em nove células vizinhas do ponto de coleta.

Os valores digitais, extraídos das imagens do reservatório de São Simão, estão representados nos quadros 13 a 18. Essas tabelas foram separadas por data e banda espectral, de acordo com os pontos coletados em campo e identificados pelos códigos adotados na pesquisa organizada pela UFMG (Coelho, 2004).

IMAGEM LANDSAT 7 – ABRIL DE 2002 – BANDA 1 (radiação azul) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	102	89	115	102	115	102	115	115	102	105,9
C-05	179	191	204	166	191	153	153	166	166	174,8
C-06	199	227	170	227	235	227	227	255	227	219,3
C-07	217	204	217	191	179	179	191	204	179	197,8
C-08	217	243	217	230	230	217	230	204	217	222,2
C-09	179	179	166	166	153	191	166	166	166	171,1
C-10	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
C-13	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Quadro 13 – Níveis de Cinza na banda 1 (radiação azul) da imagem de Abril de 2002.

IMAGEM LANDSAT 7 – ABRIL DE 2002 - BANDA 2 (radiação verde) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	110	129	129	129	129	129	110	110	92	117,7
C-05	220	237	255	201	237	183	183	201	201	213,8
C-06	255	227	255	255	227	227	255	255	255	246,6
C-07	237	237	255	255	255	220	220	255	255	242,6
C-08	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
C-09	201	201	164	164	183	201	201	201	201	191,8
C-10	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
C-13	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255

Quadro 14 – Níveis de Cinza na banda 2 (radiação verde) da imagem de Abril de 2002.

IMAGEM LANDSAT 7 - ABRIL DE 2002 - BANDA 3 (radiação vermelha) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	0	14	7	1	14	0	0	1	1	3,8
C-05	26	39	33	26	20	20	26	33	33	28,2
C-06	119	128	119	115	142	158	129	158	119	130,6
C-07	52	58	58	58	64	58	220	58	64	74,2
C-08	185	192	192	192	185	19	192	179	192	171,3
C-09	122	128	109	122	128	122	115	122	122	121,2
C-10	255	255	255	255	255	255	255	255	255	255
C-13	255	249	249	249	255	255	249	249	249	251,4

Quadro 15 – Níveis de Cinza na banda 3 (radiação vermelha) da imagem de Abril de 2002.

IMAGEM LANDSAT 7 - AGOSTO DE 2002 - BANDA 1 (radiação azul) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	75	45	75	60	60	45	75	75	75	66
C-05	75	90	75	90	120	105	90	75	90	88,5
C-06	105	120	135	105	75	105	60	105	105	102
C-07	105	90	105	105	135	90	75	75	105	99
C-08	90	120	150	105	135	120	135	165	135	124,5
C-09	105	135	120	90	105	120	105	135	105	112,5
C-10	135	135	135	120	120	180	180	135	120	139,5
C-13	30	75	30	60	60	105	75	60	105	63

Quadro 16– Níveis de Cinza na banda 1 (radiação azul) da imagem de Agosto de 2002.

IMAGEM LANDSAT 7 - AGOSTO DE 2002 - BANDA 2 (radiação verde) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-06	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0,3
C-07	1	0	0	0	1	1	15	1	0	2
C-08	48	32	48	48	48	48	64	64	64	51,2
C-09	1	1	1	32	32	15	32	15	15	14,5
C-10	48	64	64	64	64	111	111	48	64	68,6
C-13	32	32	111	0	0	1	1	64	64	33,7

Quadro 17 – Níveis de Cinza na banda 2 (radiação verde) da imagem de Agosto de 2002.

IMAGEM LANDSAT 7 - AGOSTO DE 2002 - BANDA 3 (radiação vermelha) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C-13	0	20	14	0	0	0	0	0	0	3,4

Quadro 18 – Níveis de Cinza na banda 3(radiação vermelha) da imagem de Agosto de 2002.

Na imagem de janeiro de 2003, como ilustra a figura 16, alguns pontos estavam encobertos por nuvens e não foi possível identificar o valor de nível de cinza destes ponto. A despeito disto, o nível de cinza foi identificado nos pontos C-02, C-05, C-06 e C-07. Nesta imagem, foi aplicado um contraste linear para aumentar a discriminação visual entre os objetos. Os quadros 19, 20 e 21 mostram os valores digitais dos pontos georreferenciados da imagem de janeiro de 2003.

IMAGEM LANDSAT 7 - JANEIRO DE 2003 - BANDA 1(radiação azul) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	191	191	223	207	223	207	207	191	207	203,8
C-05	207	223	223	207	239	239	223	223	207	219,8
C-06	223	239	207	223	239	239	207	223	239	226,2
C-07	255	239	223	223	239	255	223	223	223	235,8

Quadro 19 – Níveis de Cinza na banda 1(radiação azul) da imagem de Janeiro de 2003.

IMAGEM LANDSAT 7 -JANEIRO DE 2003 - BANDA 2 (radiação verde) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	89	89	89	96	92	92	89	89	89	90,3
C-05	105	109	109	105	105	105	105	105	109	106,2
C-06	117	113	109	117	109	117	113	117	117	114,6
C-07	119	127	117	117	109	129	109	119	119	118,4

Quadro 20 – Níveis de Cinza na banda 2(radiação verde) da imagem de Janeiro de 2003.

IMAGEM LANDSAT 7 - JANEIRO DE 2003 - BANDA 3 (radiação vermelha) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	77	70	63	77	93	70	77	70	70	74,4
C-05	93	108	93	97	93	93	104	101	97	97,2
C-06	121	121	121	121	121	121	124	121	124	121,6
C-07	129	135	135	144	144	108	135	135	139	133,3

Quadro 21 – Níveis de Cinza na banda 3 (radiação vermelha) da imagem de Janeiro de 2003.

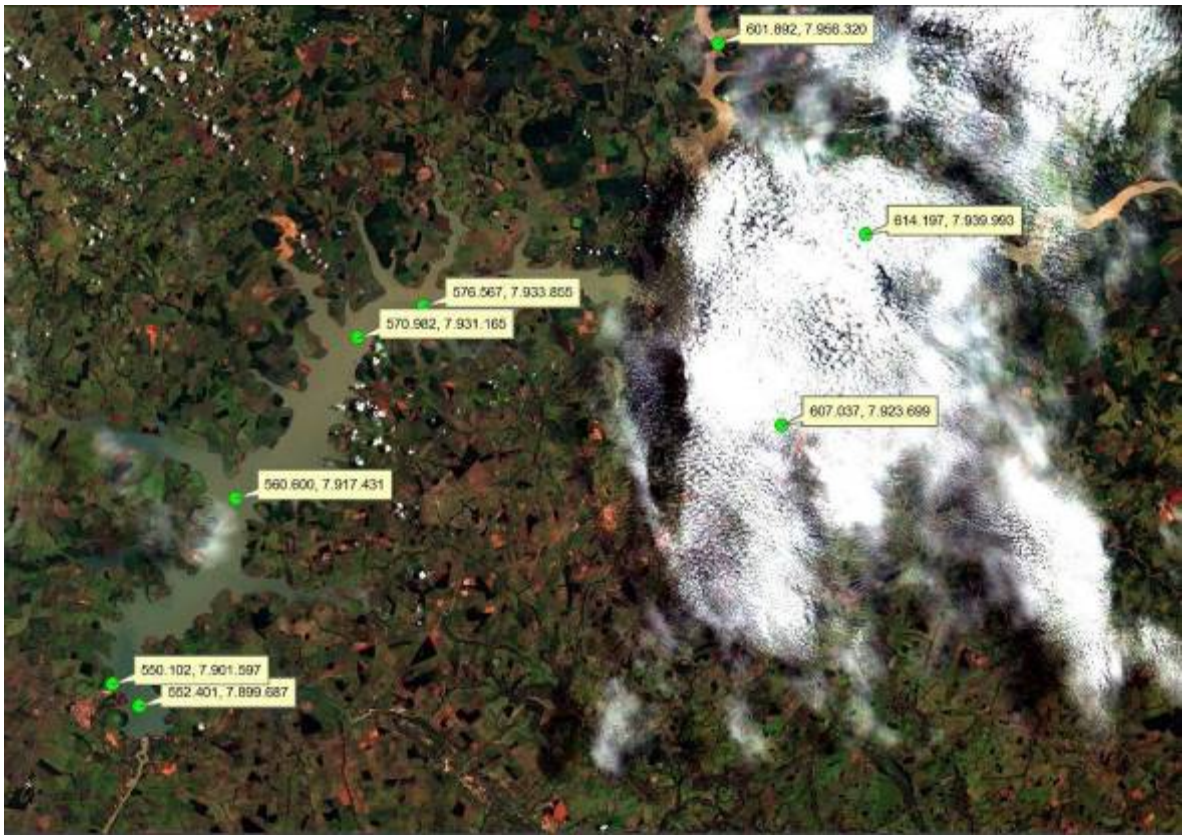


Figura 16 Imagem Land-Sat-5 de Janeiro de 2003, composição com as bandas 3-2-1, demonstrando alguns pontos encobertos por nuvens. A presença de nuvens resultou no descarte dos pontos encobertos.

A imagem de janeiro de 2004 apresenta um ponto de controle a mais (C-14). Esse ponto foi coletado apenas nesta campanha de campo, sendo escolhido por estar localizado próximo à praia artificial da cidade de São Simão. Os quadros 22, 23 e 24 relacionam os valores digitais dos pontos georreferenciados da imagem, de janeiro de 2004.

IMAGEM LANDSAT 5 - JANEIRO DE 2004 - BANDA 1 (radiação azul) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS										
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**								
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	119	129	120	129	107	107	129	119	107	118,5
C-05	146	137	146	129	137	129	129	129	119	134,7
C-06	165	156	165	165	175	170	170	156	165	165,2
C-07	187	184	180	184	184	184	180	184	180	183,4
C-08	187	170	184	184	187	184	184	184	184	183,5
C-09	180	180	184	184	187	187	184	184	184	183,4
C-10	170	180	175	180	165	170	170	170	180	173
C-13	156	165	156	137	137	156	156	156	175	155
C-14	137	119	137	119	119	119	119	137	119	126,2

Quadro 22 – Níveis de Cinza na banda 1(radiação azul) da imagem de Janeiro de 2004. Organização Vilela M.A.

IMAGEM LANDSAT 5 - JANEIRO DE 2004 - BANDA 2 (radiação verde) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS									
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**							
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	13	2	2	13	2	2	2	13	13	7,5
C-05	41	33	41	33	41	41	41	41	41	39,4
C-06	70	81	81	90	90	81	90	81	90	82,4
C-07	119	119	110	110	119	110	110	119	119	115,4
C-08	119	110	129	129	119	109	110	110	119	117,3
C-09	167	158	158	158	167	178	167	158	167	164,5
C-10	150	150	150	150	139	139	139	139	139	144,5
C-13	90	99	99	99	99	110	99	99	99	98,3
C-14	2	13	13	2	13	13	13	2	13	8,6

Quadro 23 – Níveis de Cinza na banda 2 (radiação verde) da imagem de Janeiro de 2004. Organização Vilela M.A.

IMAGEM LANDSAT 7 - JANEIRO DE 2004 - BANDA 3 (radiação vermelha) VALORES DIGITAIS NOS PONTOS GEORREFERENCIADOS									
Ponto de coleta - CÓDIGO	**NÍVEL DIGITAL NO PONTO**	**NÍVEL DE CINZA NAS CÉLULAS VIZINHAS**							
		P-01	P-02	P-03	P-04	P-05	P-06	P-07	P-08	Média
C-02	25	25	25	0	0	0	0	0	25	12,5
C-05	48	25	38	38	48	38	25	48	38	39,4
C-06	62	62	65	65	65	65	65	62	62	63,5
C-07	73	78	73	73	73	73	78	78	78	75
C-08	160	172	160	160	160	160	160	172	172	163,6
C-09	104	126	110	104	110	126	126	126	104	114
C-10	111	111	111	111	111	104	96	104	104	107,4
C-13	99	96	104	111	111	111	92	99	96	101,8
C-14	25	25	36	36	25	25	36	0	0	23,3

Quadro 24 – Níveis de Cinza na banda 3 (radiação vermelha) da imagem de Janeiro de 2004. Organização Vilela M.A.

Após extrair os valores de níveis de cinza das imagens, estes foram relacionados com os valores coletados em campo. Utilizando o Excel, os valores foram aplicados em gráficos construindo uma linha de tendência a partir de uma função polinomial. Estes gráficos representam a correlação entre os dados das imagens (níveis de cinza) e os dados de campo(concentrações de clorofila, unidades de turbidez e transparência) e, baseado neles, foi desenvolvido o método de interpretação de imagens para

monitoramento de reservatórios. Com estas funções, pode-se estimar os três parâmetros de qualidade da água, para o reservatório de São Simão, em imagens diferentes, desde que as imagens sejam tiradas em condições de luminosidade semelhantes.

Para aplicar a metodologia, foram selecionadas novas imagens do satélite Land-Sat 5, do ano de 2009, dos meses de janeiro, maio, junho e julho, que passaram pelo mesmo processamento. Após serem georreferenciadas e terem delimitada a região de interesse, obteve-se uma tabela onde foram extraídos todos os valores de nível de cinza da região do reservatório. A figura 17, representa esta tabela composta de 3 colunas, sendo a primeira correspondente à quantidade de valores diferentes de nível de cinza que aparecem na imagem, sendo 25 valores. Na segunda coluna, está indicado o valor de cada nível de cinza e a terceira coluna indica a quantidade de pixels que possuem o valor correspondente da segunda coluna , somando um total aproximado de 771.000 pixels.

Para realizar a classificação, foram criados conjuntos de valores de níveis de cinza variando de 0 a 50, de 51 a 102, 103 a 154, 155 a 205, 206 a 255 de acordo com a escala desenvolvida, englobando todos os valores possíveis para níveis de cinza.

Os resultados da aplicação da metodologia descrita neste Capítulo 4 são apresentados e comentados no capítulo seguinte. O capítulo 5 ainda traz desdobramentos relacionados com a correlação entre parâmetro de qualidade da água e nível de cinza, os quais podem ser utilizados para a previsão de valores aproximados dos parâmetros, distribuídos na área do reservatório.

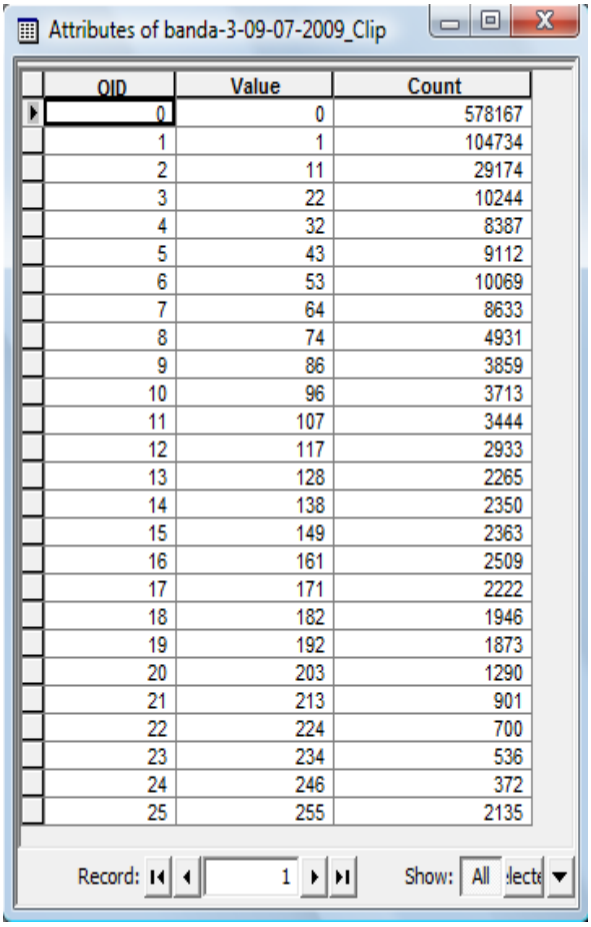


Figura 17 – Tabela de Atributos de layer correspondente à área do reservatório da imagem de 09-07-2009.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste trabalho, objetivou-se elaborar uma metodologia de estimativa da qualidade de água de reservatórios. A aplicação da metodologia teve foco no reservatório de São Simão, situado no baixo rio Paranaíba. Assim, com o conhecimento de dados coletados em campo, em pontos georreferenciados no reservatório de São Simão, como se observa na figura 18, foi possível elaborar um modelo de monitoramento com base na análise de imagens do satélite Land-Sat. Salienta-se que tal metodologia atua como uma ferramenta auxiliar para se obter informações aproximadas sobre a qualidade da água de reservatórios. Para obtenção de informações mais precisas, ainda não se pode prescindir de coletas freqüentes de amostras *in situ*, muito embora este procedimento seja pontual e dispendioso, conforme já foi comentado em capítulos anteriores.

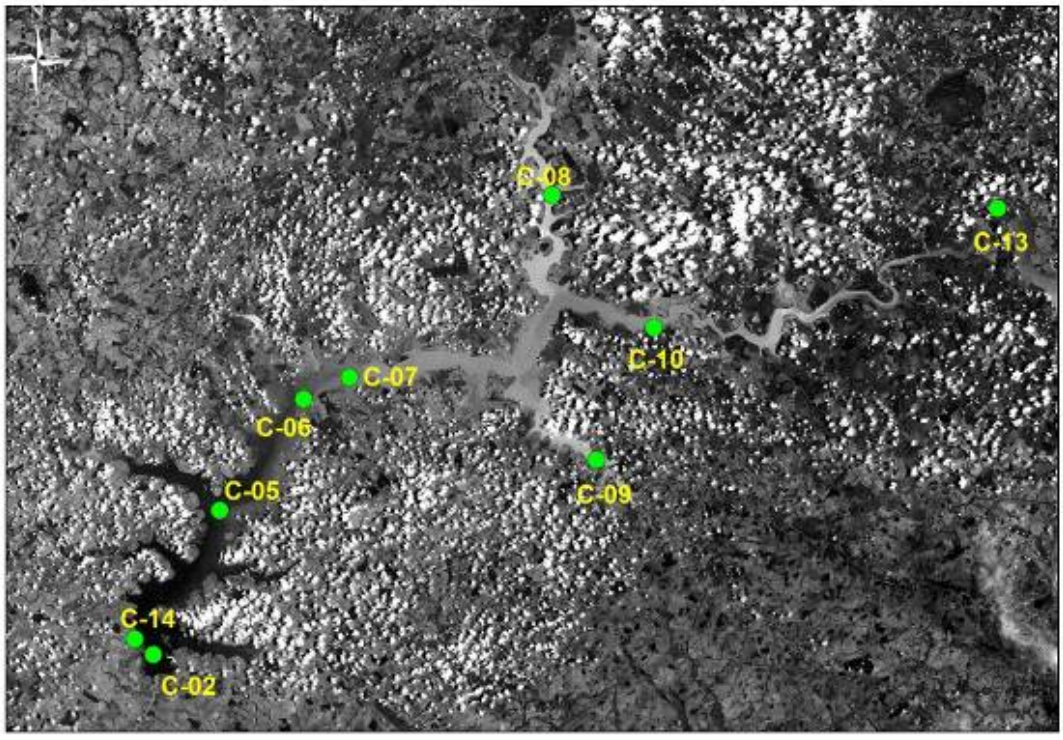


Figura 18 - Imagem Land-Sat-5 de Janeiro de 2004, representando os pontos de coleta de amostras de água.

As bandas 1 (azul), 2 (verde) e 3 (vermelha) foram analisadas separadamente e, partindo de uma base de referências publicadas em Padial (2006) e Novo (2001), juntamente com observações e testes feitos durante a pesquisa com todas as amostras coletadas em campo, foram selecionados os parâmetros que apresentaram melhor resultado. Assim, para o estudo de cada parâmetro de qualidade foi escolhida uma banda espectral, conforme indica o quadro 25.

Intervalo Espectral	**Parâmetros de qualidade da água**
Banda 1 (azul)- 0,45 - 0,52 (μm)	Transparência
Banda 2 (verde) - 0,52 - 0,60 (μm)	Clorofila
Banda 3 (vermelha) - 0,63 - 0,69 (μm)	Turbidez

Quadro 25 – Relação entre o intervalo espectral e os parâmetros obtidos das coletas em campo, realizadas por Coelho (2004). Organização Vilela M.A.

Para cada um destes parâmetros analisados, obteve-se a correspondência de umas das 3 bandas espectrais localizadas na região do visível do satélite Land-Sat, assim foi desenvolvida uma escala de absorção de radiação eletromagnética em níveis de cinza, que representa um significado diferente para cada banda analisada.

Esta escala de absorção de radiação eletromagnética (REM), foi desenvolvida durante a análise dos resultados, visando ao emprego na classificação das imagens, tornando-se essencial para o andamento da pesquisa. A escala de absorção de REM foi composta por 5 graduações que variam de acordo com os valores de níveis de cinza:

- de 0 a 50 está a faixa de máxima absorção;
- de 51 a 102 está a faixa de alta absorção;
- de 103 a 154 corresponde a faixa de média absorção;
- de 155 a 205 está a faixa de baixa absorção;
- de 206 a 255 corresponde à mínima absorção de radiação eletromagnética.

A figura 19 ilustra essas diversas faixas de absorção de radiação eletromagnética, incluindo a visualização das intensidades de cinza de cada uma delas.

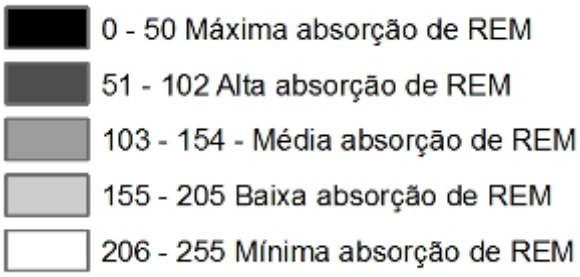


Figura 19 – Níveis de cinza e escala de absorção de REM – radiação eletromagnética.

O objetivo de se aplicar esta classificação é que, partindo de uma análise de diversas imagens do mesmo reservatório, em curto espaço de tempo, seja possível identificar alterações na qualidade da água e pontuar os locais mais críticos que colaboram para processos de eutrofização e aumento da turbidez.

Os resultados foram divididos em 3 sessões que indicam os parâmetros analisados, relacionados com as respectivas bandas espectrais estudadas.

4.1 – TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA

A transparência da água que, em campo, é medida pelo disco de Secchi, é um importante parâmetro para a análise da qualidade de um corpo hídrico. Tal parâmetro é uma medida, em metros, que corresponde à profundidade de visualização do disco de Secchi imerso na água. Setores com baixa transparência indicam grandes concentrações de sedimentos suspensos. Além disto, pequenos índices de transparência também podem ser indicadores da possível presença de substâncias dissolvidas que conferem cor à água, na maioria das vezes, matéria orgânica. Logicamente, elevadas transparências apontam para pouco sedimento suspenso/pouca matéria orgânica dissolvida. Para análise de transparência, foi utilizada a banda 1 do satélite Land-Sat. A banda 1 do satélite Land-Sat corresponde à faixa espectral da cor azul, com comprimento de onda que varia de 0,45 a 0,52 μm e apresenta grande penetração em corpos de água. Por isto ela foi selecionada para analisar o parâmetro transparência.

O trabalho realizado por Coelho (2004) mediu a transparência da água com o disco de Secchi em 4 pontos do reservatório de São Simão, como ilustra a figura 20. Os resultados encontrados nesses quatro pontos foram relacionados, na presente pesquisa, com o valor dos níveis de cinza das imagens.

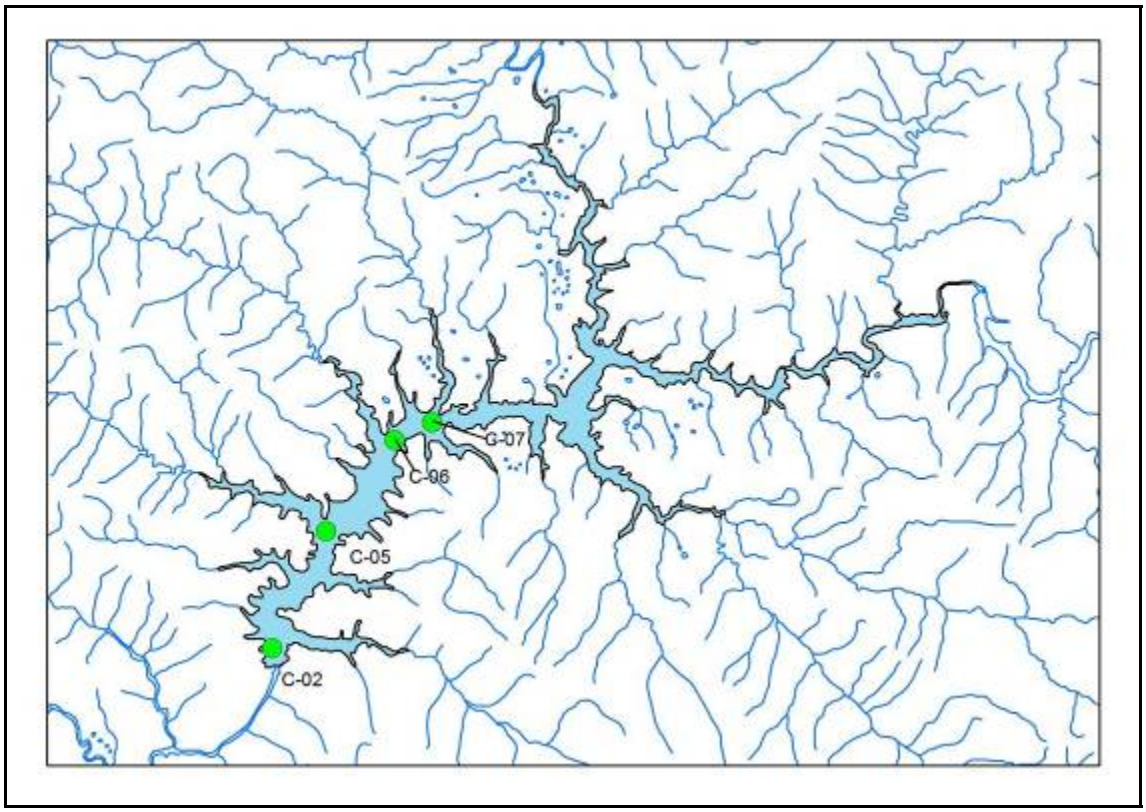


Figura 20: Distribuição dos pontos de coleta de transparência da água

Ao serem relacionados os resultados para transparência da água com os valores digitais da banda 1 do satélite Land-Sat, constatou-se que à medida que aumenta a transparência, aumenta a absorção de REM e, ao diminuir a transparência da água, aumenta a reflexão de REM, como esquematizado na figura 21.

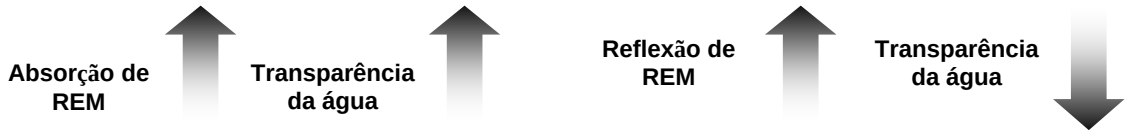


Figura 21: Relação esquemática entre a transparência da água e o comportamento espectral do reservatório.

A campanha de abril de 2002 obteve resultados de transparência que variaram em até 2,9 m. Assim, no ponto C-02, próximo à barragem, foi medida uma transparência de 3,9 m. Em contrapartida, no ponto C-06, que está localizado no eixo central da represa, na área de influência do Rio Preto, foi medida uma transparência de 1,0 m, valor mínimo obtido.

A imagem de abril de 2002 apresentou grande variação nos valores de níveis de cinza sendo que, próximo da barragem, onde havia uma maior transparência da água, foi encontrada uma maior absorção de radiação eletromagnética, diminuindo a absorção à medida que se avançava a montante no reservatório.

A imagem de julho de 2002 mostrou-se mais uniforme, devido à melhor qualidade da água, com valores de nível de cinza mais próximos para os diferentes pontos. Junto à barragem, onde há uma maior transparência da água, ocorreu uma maior absorção, como verificado na análise anterior. Salienta-se que os menores níveis de cinza correspondem às maiores transparências e às maiores absorções de Radiação Eletromagnética (REM).

A coleta de janeiro de 2003 obteve resultados condizentes com a estação chuvosa, haja vista que foram encontradas concentrações mais elevadas de matéria em suspensão, o que ocasiona uma diminuição dos valores de transparência em todos os pontos amostrados. Novamente o ponto C-02, que fica próximo à barragem, teve um valor de transparência superior aos outros, correspondente ao menor nível de cinza da banda 1. Em relação à imagem referente à coleta de janeiro de 2003, nota-se que esta apresentou um elevado índice de reflexão em todo o reservatório, devido às altas concentrações de material particulado. Como ocorrido nas outras análises, houve maior absorção a jusante do reservatório, a qual diminuía à medida que se avançava para montante. Isto revela que a transparência da água aumentou de montante para jusante.

Em janeiro de 2004, devido às chuvas freqüentes, os valores para transparência coletados foram ainda menores, nesta campanha não houve amostras nos pontos C-6 e C-7. Nessa campanha de coletas, um novo ponto foi amostrado, o ponto C-14 que fica próximo à praia artificial na cidade de São Simão. A imagem de janeiro de 2004, para a banda 1, obteve valores uniformes de índices digitais, com pouca variação de transparência, indicando presença de matéria em suspensão mais bem distribuída no reservatório. A Figura 22 ilustra a relação entre os níveis de cinza para a banda 1 e o parâmetro transparência.

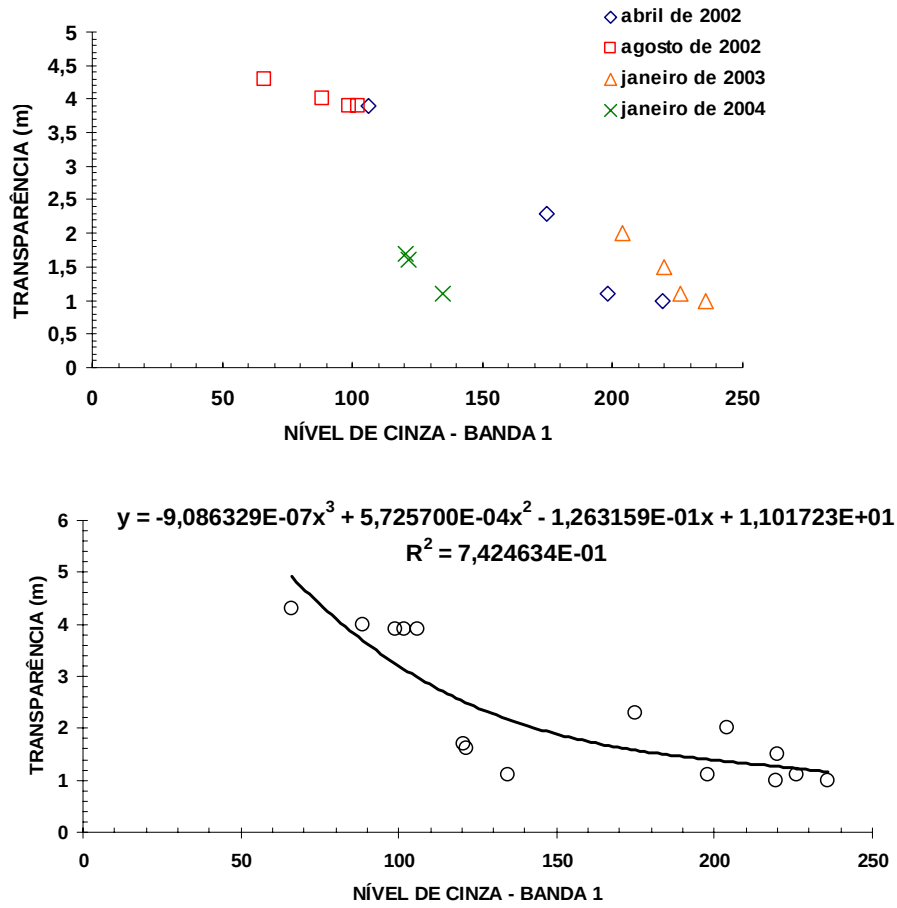


Figura 22 – Relação entre valores numéricos de transparência e nível de cinza para a banda 1

A partir da observação dos gráficos, constata-se que, para os intervalos espectrais analisados, a tendência foi de um aumento no valor de níveis de cinza de acordo com a redução da transparência da água. Em todas as relações, encontrou-se a mesma tendência, indicando que, com a presença de substâncias na água, ocorre uma alteração do comportamento espectral para esta banda. Os valores foram interpolados por uma linha de tendência descrita por um polinômio de terceiro grau, função monotônica que apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2). Na linha de tendência ilustrada na Figura 22, *y* representa o parâmetro transparência e *x* o nível de cinza da banda 1. O comportamento monotônico da função de ajuste é importante porque representa o aumento contínuo da transparência com o aumento da absorção de radiação (redução da reflexão de radiação).

De acordo com as faixas de nível de cinza, ilustradas pela Figura 23, o modelo foi aplicado em imagens do reservatório de São Simão de 2009, na banda 1 que, neste

caso, foi utilizada para a estimativa da transparência da água. Os resultados fornecem regiões onde os níveis de transparência variam entre valores máximos e mínimos.

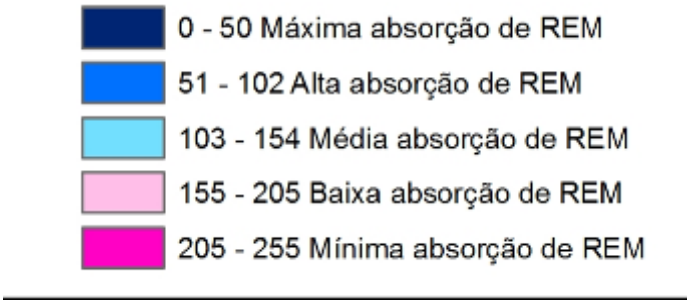


Figura 23 -Escala de absorção de REM para banda 1.

Nota-se aqui, que a metodologia pode ser estendida para previsão de situações futuras. Nesse sentido, foi identificada uma alta sensibilidade a substâncias presentes. Esta faixa espectral, por possuir menores comprimentos de onda, está mais sujeita a alterações em função da atmosfera. Assim, sua análise é indicada para complementação do trabalho final de monitoramento, permitindo uma visualização distribuída da transparência na área superficial do reservatório. Esta conclusão também pode ser estendida no pré-monitoramento, antes de se proceder à coleta de amostras de água, identificando setores com menores transparências, principais candidatos às visitas de campo para coleta de amostras.

Aplicando a escala de absorção de Radiação Eletromagnética, na classificação das imagens na banda 1, percebe-se que, quando há presença de substâncias na água, ocorre forte reflexão, mais acentuada que nas outras faixas analisadas.

A imagem de janeiro de 2009, que apresenta áreas encobertas por nuvens, indica maior presença de substâncias na proximidade dos afluentes do reservatório. Assim, conforme ilustrado no mapa 6, as áreas que indicam maior absorção de REM, são possivelmente locais em que a água está mais limpa, mais isenta de sólidos suspensos e, portanto, com maior transparência.

Nos mapas 7 e 8, referentes a maio e junho de 2009, respectivamente, identifica-se uma acentuada presença de substâncias na água, modificando a coloração e diminuindo a transparência em quase todo o lago. Da análise dos mapas 6 a 8, a partir das regiões de baixa transparência, é possível perceber claramente os pontos onde há entrada de material em suspensão no reservatório. Nesse sentido, entre janeiro e junho

de 2009, os maiores afluxos correspondem à foz do rio dos Bois na margem direita, e Tijuco na margem esquerda.

Já no mapa 9, referente ao mês de julho de 2009, ocorre intensa absorção de REM, o que, de acordo com os resultados, indica uma maior transparência da água, o que pode é explicado pela diminuição das chuvas neste mês do ano. Mesmo absorvendo grande parte da REM para banda 1, a imagem de julho indica locais onde ainda ocorre entrada de substâncias na água, estes locais são os pontos mais vulneráveis do reservatório que, como mostrado nos resultados da pesquisa de campo Coelho (2004) são os mesmos pontos que apresentaram maiores concentrações de nutrientes, na afluência do rio dos Bois. Destaca-se que a região sul de Goiás, drenada por este rio, apresenta intensa atividade agrícola.

550000 600000 650000 700000

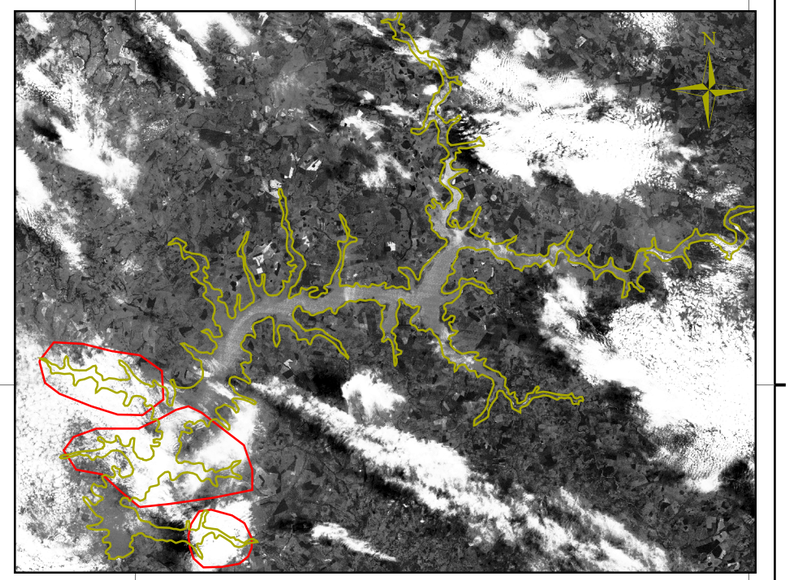
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 6 - Absorção de REM na banda 1
na imagem Land-Sat 05 de 14/01/2009
no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (máxima transp. na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (alta transp. na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (média transp. na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (baixa transp. na água)
- 205 - 255 Mínima absorção de REM (mínima transp. na água)

550000

600000

650000

700000

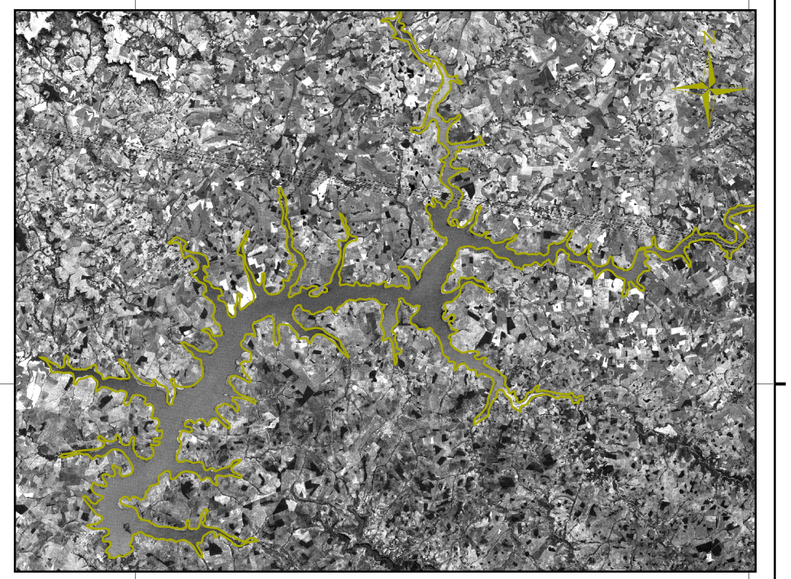
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 7 - Absorção de REM na banda 1
na imagem Land-Sat 05 de 22/05/2009
no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (máxima transp. na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (alta transp. na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (média transp. na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (baixa transp. na água)
- 205 - 255 Mínima absorção de REM (mínima transp. na água)

550000 600000 650000 700000

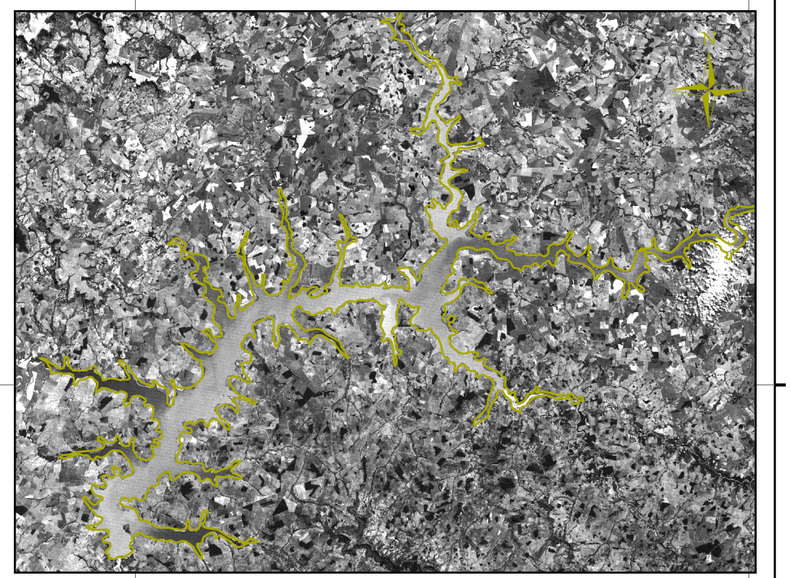
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 8 - Absorção de REM na banda 1
na imagem Land-Sat 05 de 06/06/2009
no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (máxima transp. na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (alta transp. na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (média transp. na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (baixa transp. na água)
- 205 - 255 Mínima absorção de REM (mínima transp. na água)

550000

600000

650000

700000

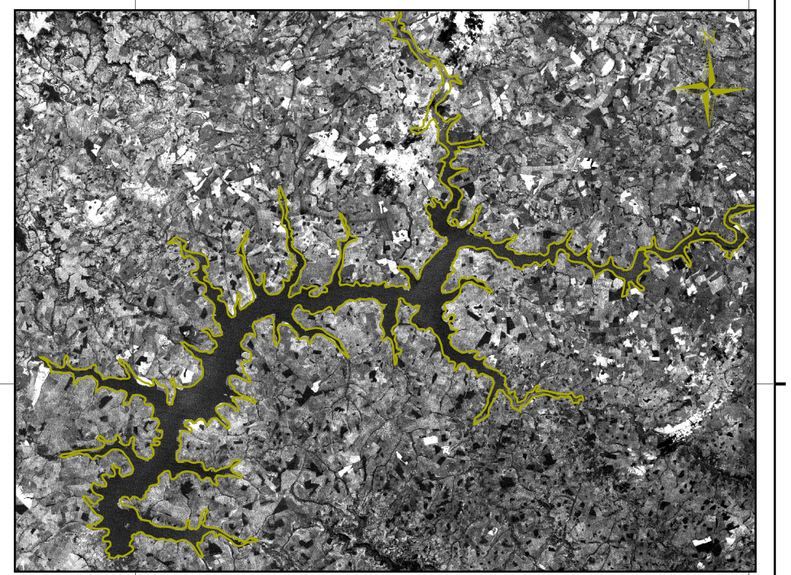
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 9 - Absorção de REM na banda 1
na imagem Land-Sat 05 de 09/07/2009
no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (máxima transp. na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (alta transp. na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (média transp. na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (baixa transp. na água)
- 205 - 255 Mínima absorção de REM (mínima transp. na água)

4.2 – CLOROFILA

A clorofila é um indicador da presença de biomassa algal em ambientes aquáticos. Sua quantificação é importante em termos de qualidade da água de ambientes lênticos, uma vez que as diversas espécies de algas são responsáveis pelo processo de eutrofização em corpos hídricos, sendo a presença de algas indiretamente medida pela concentração de clorofila, em microgramas por litro, da amostra de água.

Assim como ocorre com os outros parâmetros, o monitoramento de clorofila em ambientes aquáticos é caro e muito trabalhoso, envolvendo equipes de campo e análises de laboratório frequentes.

A banda 2 do satélite Land-Sat, correspondente à faixa espectral da cor verde que varia de 0,52 a 0,60 μm, apresenta boa penetração em corpos de água, sendo refletida onde há presença de pigmentos de tons esverdeados, o que a torna viável para detectar a presença de algas e organismos vegetais em ambientes aquáticos. Assim, elevada reflexão equivale a uma concentração elevada de clorofila em determinado setor do reservatório, como esquematizado na figura 24.



Figura 24 - Relação entre a concentração clorofila na água com comportamento espectral do reservatório.

A pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal de Minas Gerais (Coelho, 2004) mediu a concentração de clorofila presente na água em todas as campanhas de campo. Utilizando a metodologia da presente pesquisa, os resultados encontrados nessas campanhas foram relacionados com o valor dos níveis de cinza das imagens que correspondem às datas das coletas.

Os resultados para concentração de clorofila, encontrados nas coletas referentes aos meses de abril de 2002, julho de 2002 e janeiro de 2003 não tiveram variações para concentração de clorofila, detectando sempre baixas concentrações, encontrando valores nulos de concentração ou bem próximos de zero, a não ser na campanha de janeiro de 2004. A campanha deste período registrou uma grande variação de concentrações, de 0

até 39,4 µg.L^{-1}, coletado no ponto C-09, que se localiza no rio Tijuco, na porção centro-sul do reservatório de São Simão, no estado de Minas Gerais. Nos outros pontos também foram detectadas baixas concentrações. A figura 25 representa os pontos de medição em campo.

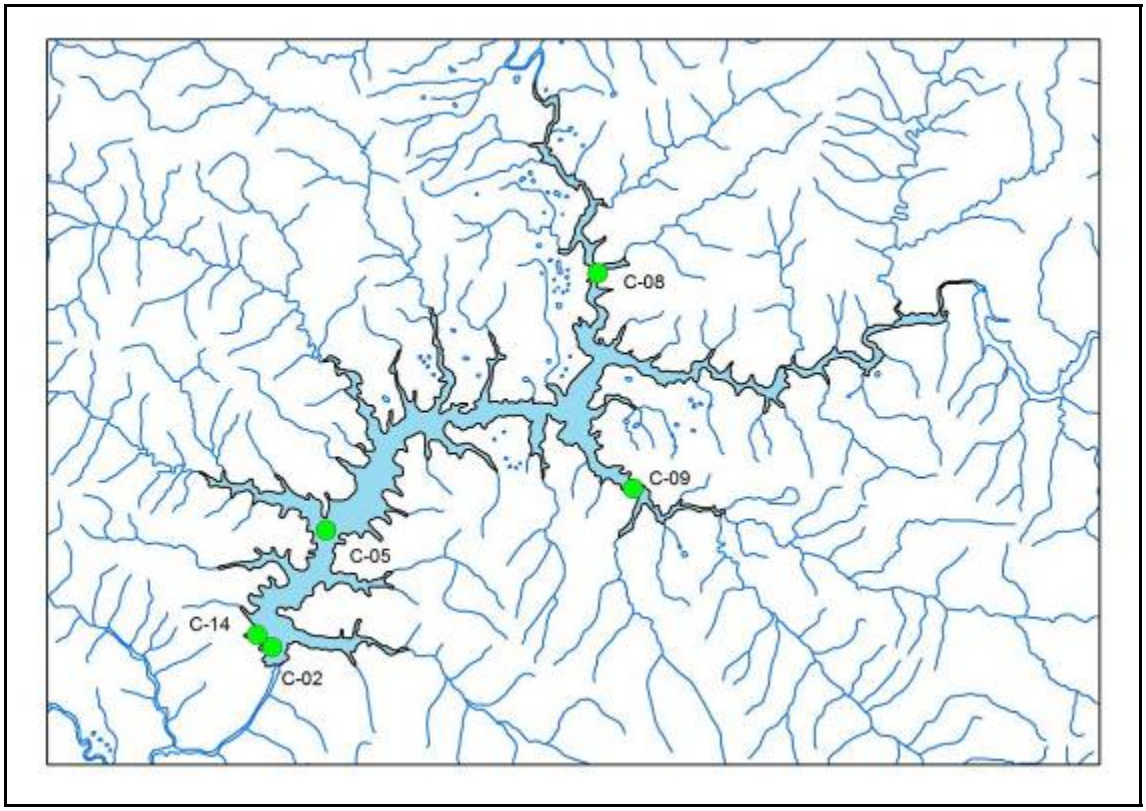


Figura 25: Distribuição dos pontos de coleta de clorofila

A Figura 26 ilustra a relação entre níveis de cinza para a banda 2 e o parâmetro concentração de clorofila. A linha de tendência representa um polinômio de quinto grau, função de comportamento aproximadamente monotônico que apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2). Na linha de tendência, *y* representa a concentração de clorofila e *x* o nível de cinza.

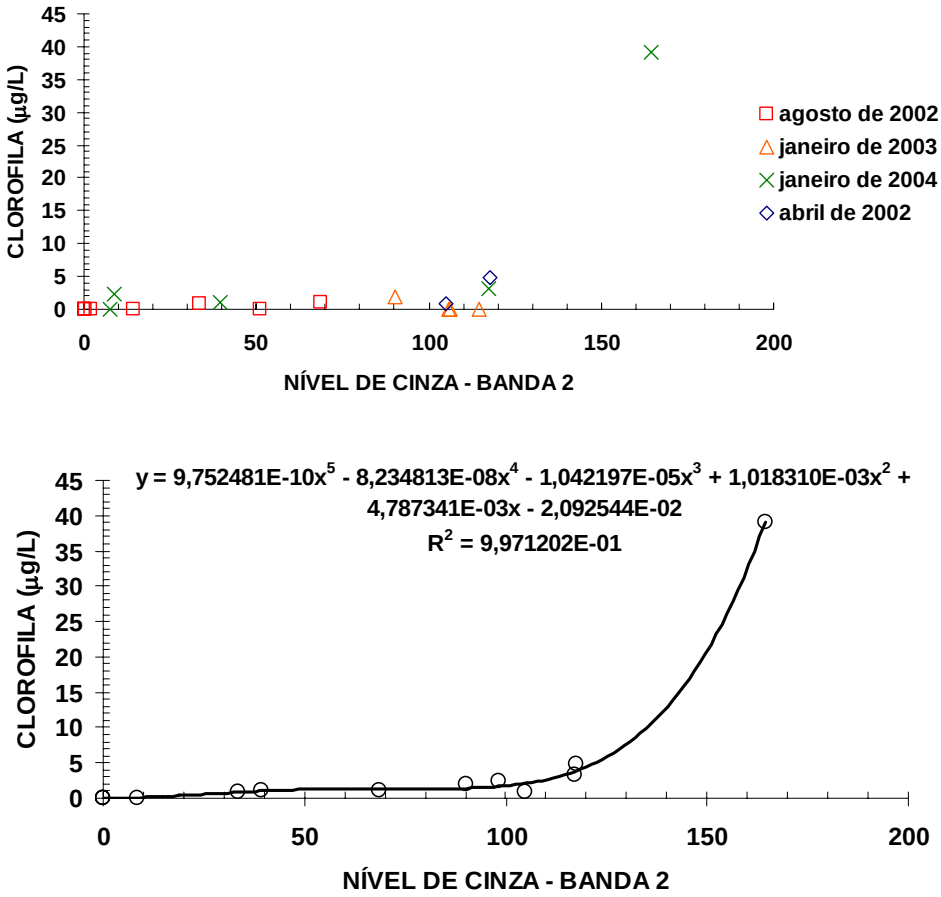


Figura 26 – Relação entre concentração de clorofila e nível de cinza para a banda 2

A imagem de janeiro de 2004 apresentou considerável variação em níveis de cinza, absorvendo grande parte da radiação incidida nos pontos onde a água se apresenta mais isenta e refletindo a radiação nos pontos com maior presença de clorofila. Nos pontos de medição para concentração de clorofila, coletados em janeiro de 2004, foram encontrados os valores de 0 µg.L^{-1} nos pontos C-02 e C-14 que ficam próximos à barragem, 1,09 µg.L^{-1} no ponto C-05, 2,4 µg.L^{-1} no ponto C-13, 3,2 µg.L^{-1} no ponto C-08 e 39,1 µg.L^{-1} no ponto C-09.

O resultado observado no gráfico ilustrado pela Figura 26 indica que a banda 2, do satélite Land-Sat, pode ser utilizada para identificar pigmentos de clorofila presentes em ambientes aquáticos, haja vista que, no momento em que a concentração de clorofila aumenta, a reflexão nesta faixa espectral também aumenta consideravelmente, ou seja, há um aumento dos níveis de cinza.

Com base nas faixas de níveis de cinza apresentadas na Figura 27, o modelo foi aplicado nas imagens de 2009, na banda 2, que pode atuar como indicadora de pigmentos de clorofila presentes na água.

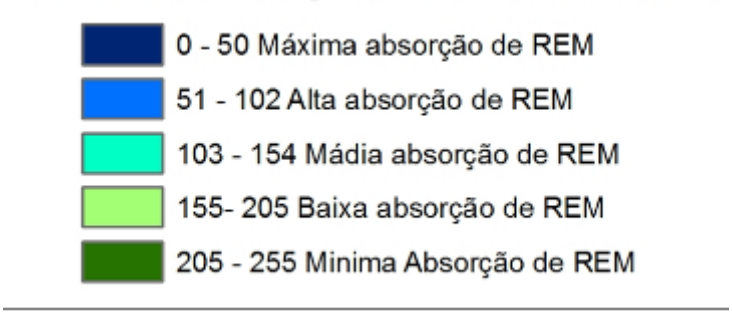


Figura 27 - Escala de absorção de REM para banda 2.

Os resultados do monitoramento indicaram uma dinâmica na movimentação de clorofila no lago. O mapa 10, referente a janeiro de 2009, ilustra uma forte absorção de REM, o que indica pouca presença de pigmentos de clorofila. No mapa 11, para maio de 2009, é possível identificar setores com maior reflexão, que indicam maior concentração de algas, principalmente nos afluentes e próximos da barragem. A afluência do rio dos Bois, na margem direita e Tijuco, na margem esquerda, foram identificadas com as maiores concentrações de clorofila.

No mapa 12, correspondente ao mês de junho de 2009, é bem nítida a visualização de locais com elevada concentração de clorofila (regiões correspondentes a baixas absorções de radiação eletromagnética). Nesse contexto, o ponto C-09 é o ponto mais crítico em relação à presença de clorofila. Nesse caso, fica mais evidente a tendência das maiores concentrações de clorofila agruparem-se na vizinhança da barragem e na confluência dos rios dos Bois e dos afluentes da margem esquerda do reservatório. No mapa 13, construído para o mês de julho de 2009, ocorre uma maior absorção, indicando a água mais isenta dessa substância. A despeito disto, ocorrem pontos de reflexão que demonstram presença de clorofila, principalmente na proximidade de alguns afluentes como o rio dos Bois e Tijuco.

Observa-se também que outros afluentes do reservatório permanecem, durante todo o ano, com alta absorção de REM o que indica baixas concentrações de clorofila, constatando que apenas alguns afluentes estão sofrendo com a poluição e conseqüente aumento de nutrientes que levam a um aumento das concentrações de clorofila. O rio dos Bois e o rio Tijuco são os afluentes mais críticos, o que se deve às características de

uso e ocupação do solo na bacia destes rios, como a presença de cidades de porte médio e intenso uso agrícola inclusive com presença de grandes áreas destinadas a monocultura da cana e da soja.

O resultado do modelo comprova que a banda 2 é a mais indicada para monitorar a presença de clorofila, destacando pontos mais vulneráveis que necessitam de atenção especial dos gestores das usinas. Este direcionamento pode acarretar um ganho de tempo e redução de custos em análises de água.

550000 600000 650000 700000

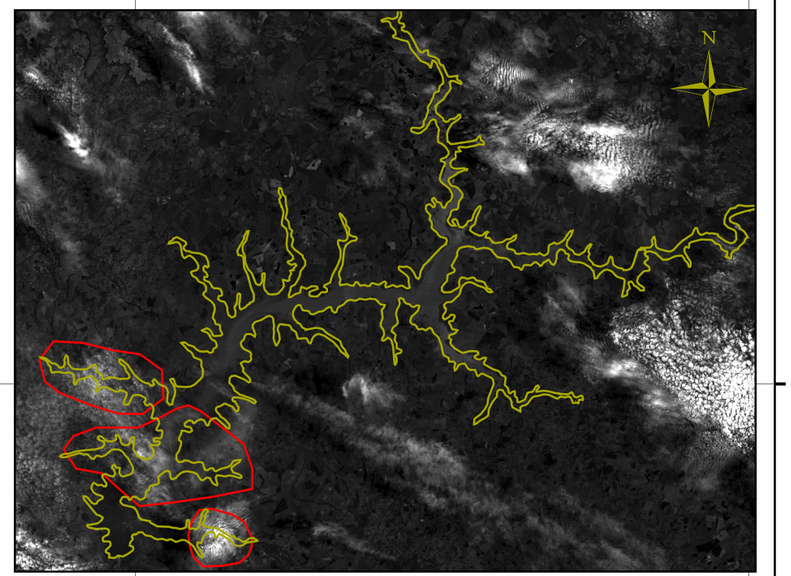
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 10 - Absorção de REM na banda 2 na imagem Land-Sat 05 de 14/01/2009 no reservatório de São SimãoMG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima clorofila na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa clorofila na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média clorofila na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta clorofila na água)
- 205 - 255 Minima absorção de REM (Máxima clorofila na água)

550000 600000 650000 700000

7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat

Mapa 11 - Absorção de REM na banda 2
na imagem Land-Sat 05 de 22/05/2009
no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima clorofila na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa clorofila na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média clorofila na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta clorofila na água)
- 205 - 255 Minima absorção de REM (Máxima clorofila na água)

550000

600000

650000

700000

7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat

Mapa 12 - Absorção de REM na banda 2 na imagem Land-Sat 05 de 06/06/2009 no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima clorofila na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa clorofila na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média clorofila na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta clorofila na água)
- 205 - 255 Minima absorção de REM (Máxima clorofila na água)

550000 600000 650000 700000

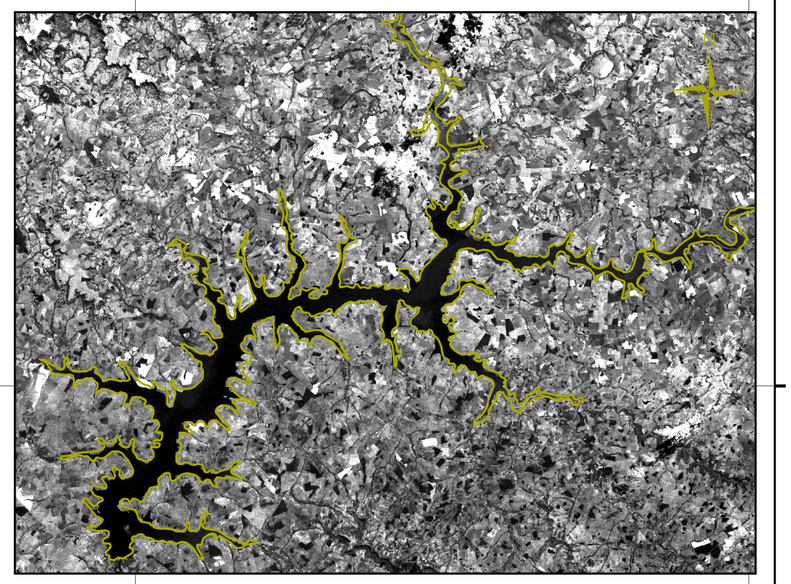
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 13 - Absorção de REM na banda 2
na imagem Land-Sat 05 de 09/07/2009
no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima clorofila na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa clorofila na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média clorofila na água)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta clorofila na água)
- 205 - 255 Minima absorção de REM (Máxima clorofila na água)

4.3 – TURBIDEZ

A turbidez da água que em laboratório é medida pelo turbidímetro, é um parâmetro que indica se há presença de sedimentos, sólidos e outras substâncias em suspensão na água. Este parâmetro de qualidade é medido de acordo com a quantidade destes materiais que alteram o aspecto visual da água. A unidade de medida usual é a UT(unidade de turbidez).

A banda 3 do satélite Land-Sat corresponde à faixa espectral da cor vermelha, com comprimento de onda que varia de 0,63 a 0,69 μm. Nesta faixa, ocorre reflectância de alvos com as cores em tons entre o amarelo e o vermelho, o que a torna mais indicada para medidas de turbidez, pois os sedimentos e os sólidos em suspensão, presentes em ambientes aquáticos, apresentam, na maioria das vezes, tons de coloração que se aproximam aos da banda 3. A figura 28 esquematiza a relação do comportamento espectral da água com a turbidez.



Figura 28 - Relação entre turbidez e o comportamento espectral do reservatório.

O trabalho realizado por Coelho (2004) mediu a turbidez da água nas campanhas de janeiro de 2003 e janeiro de 2004. Na presente pesquisa, assim como ocorreu com os outros parâmetros, os resultados encontrados nessas campanhas foram relacionados com o valor dos níveis de cinza das imagens que correspondem às datas das coletas. A figura 29 indica os pontos onde houve coletas para turbidez.

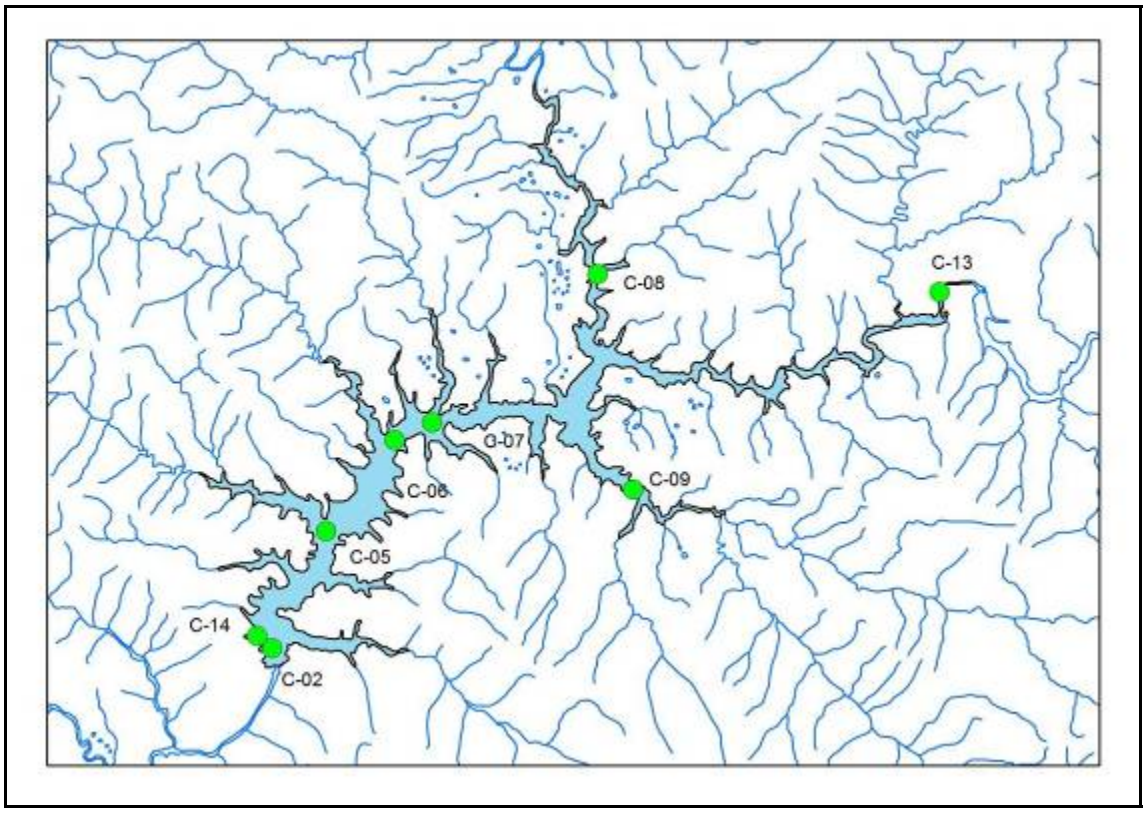


Figura 29: Distribuição dos pontos de coleta de turbidez

A coleta de janeiro de 2003 obteve grande variação de resultados de turbidez para o reservatório de São Simão, apresentado altos índices, especialmente no ponto C-09, quando foi medida 145 UT, enquanto que o ponto C-02 apresentou 7,17 UT. Os outros pontos tiveram resultados mais uniformes, com a turbidez aumentando em direção aos afluentes do reservatório. A imagem de janeiro de 2003 conta com apenas 4 pontos monitorados descobertos por nuvens e apresentou variação de níveis de cinza nestes pontos, aumentado os índices de reflexão de acordo com o aumento da turbidez. Na campanha de janeiro de 2004, também houve grande variação de turbidez, encontrando pontos com turbidez igual a 0 UT e outros com até 94,9 UT, resultado encontrado no ponto C-08, que se localiza na foz do Rio dos Bois, em Goiás. Os elevados índices de turbidez, medidos nas zonas com influência de tributários, devem-se ao transporte de sedimentos que ocorre nesses rios, principalmente na estação chuvosa. Na imagem de janeiro de 2004, houve grande variação de níveis de cinza, com altas taxas de absorção e de reflexão, sendo que o aumento da reflexão coincide com o aumento da turbidez no reservatório.

A Figura 30 ilustra a relação entre níveis de cinza para a banda 3 e a turbidez da água. A linha de tendência é descrita por uma função de ajuste polinomial,

aproximadamente monotônica, a qual apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2). Na linha de tendência, *y* representa a turbidez e *x* o nível de cinza.

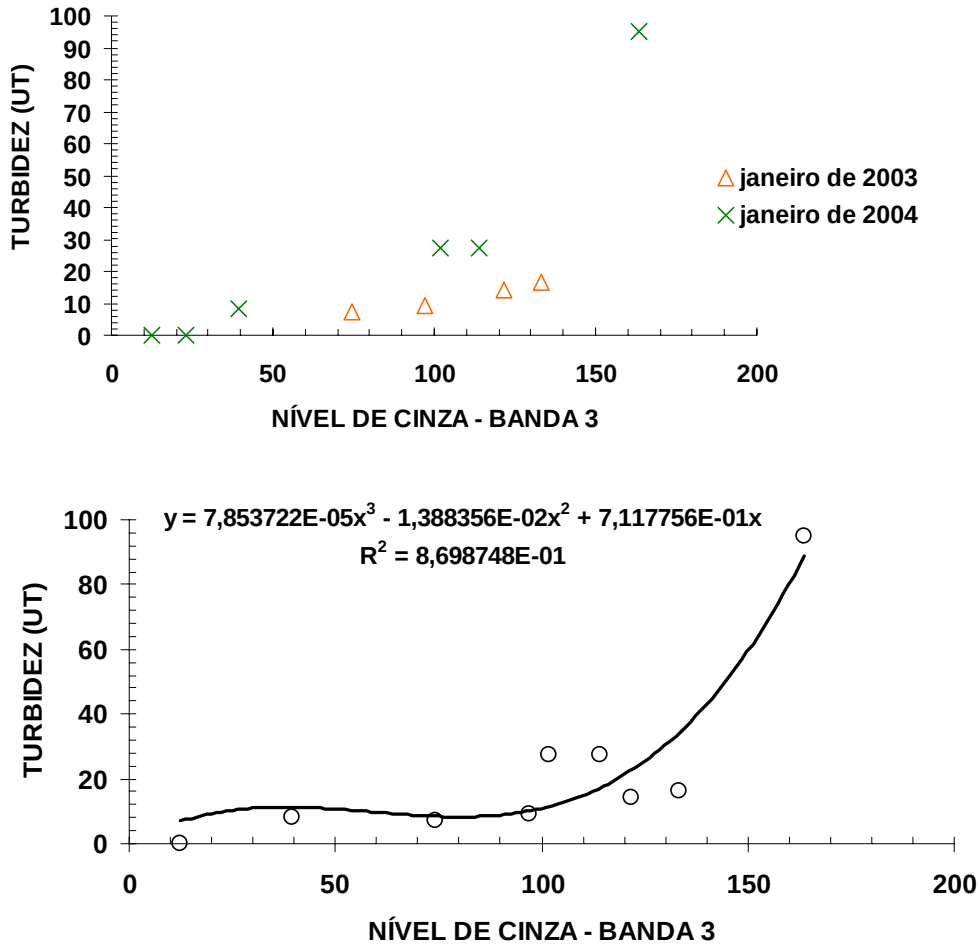


Figura 30 – Relação entre níveis de cinza para a banda 3 e valores numéricos de turbidez da água.

A partir dos resultados relacionados nos gráficos, constata-se que a faixa espectral correspondente à cor vermelha apresenta bons resultados para se identificar áreas em ambientes aquáticos com variação de turbidez. As taxas de reflexão (aumento dos níveis de cinza) acompanham o aumento da turbidez e a radiação eletromagnética é absorvida em locais sem a presença de sedimentos e sólidos em suspensão.

De acordo com as faixas de níveis de cinza ilustradas pela Figura 31, aplicou-se o modelo para a banda 3 do satélite Land-Sat.

A alteração na absorção de REM, no mapa 14, para janeiro de 2009, indica a presença de matéria em suspensão com afluxo a partir dos afluentes. No mapa 15 e no mapa 16, correspondentes às datas de maio e junho de 2009, percebe-se o aumento da

reflexão, demonstrando maiores índices de turbidez, principalmente nos pontos C-08 e C-09. Esses pontos são os locais mais críticos do reservatório de São Simão para entrada de sedimentos. Percebe-se também que após a usina de Cachoeira Dourada, a montante do lago de São Simão, ocorre máxima absorção de REM indicando ausência de sedimentos em suspensão o que pode ser um incentivador de erosão na calha do rio

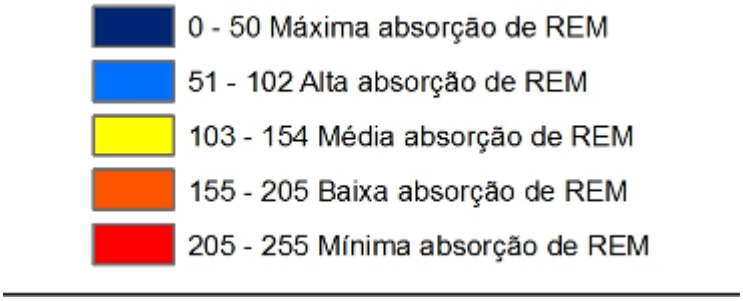


Figura 31- Escala de absorção de REM para banda 3

No mapa 17, referente a julho, ocorre intensa absorção de REM, assim como nos outros mapas desta data, o que comprova uma melhor qualidade da água nesta ocasião. Mesmo assim, aparecem pontos de reflexão de REM que acusam a presença de matéria em suspensão.

De uma forma geral, nota-se que a banda 3 apresenta ótimos resultados para monitoramento de turbidez, podendo ser utilizada para encontrar pontos onde se apresenta necessidade de se controlar a entrada de sedimentos nos reservatórios. Os resultados obtidos nesta análise identificam que a confluência dos rios Tijuco (ao centro-sul) e dos Bois (ao centro-norte) contribuem correntemente para o afluxo de sedimentos no reservatório, tanto no período chuvoso quanto na estiagem. Embora a análise de uso e ocupação do solo na bacia esteja fora do escopo do presente trabalho, o afluxo de sedimentos a partir desses tributários pode ser explicado pela ocupação das suas bacias por atividades que descaracterizam a cobertura natural do solo, como agricultura extensiva e pecuária. Ao longo do reservatório, é notável a diminuição da turbidez no período de estiagem, fator indicado pelos elevados índices de absorção de REM. Notadamente, ao longo da área do lago, há diferenças sensíveis entre os mapas 14 (para janeiro de 2009) e 17 (para julho de 2009). Neste último, os índices de absorção atingem valores máximos, indicando faixa de turbidez mínima em praticamente toda a extensão do reservatório.

550000

600000

650000

700000

7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat

Mapa 14 - Absorção de REM na banda 3 na imagem Land-Sat 05 de 14/01/2009 no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima turbidez na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa turbidez na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média absorção de turbidez)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta absorção de turbidez)
- 206 - 255 Mínima absorção de REM (Máxima absorção de turbidez)

550000

600000

650000

700000

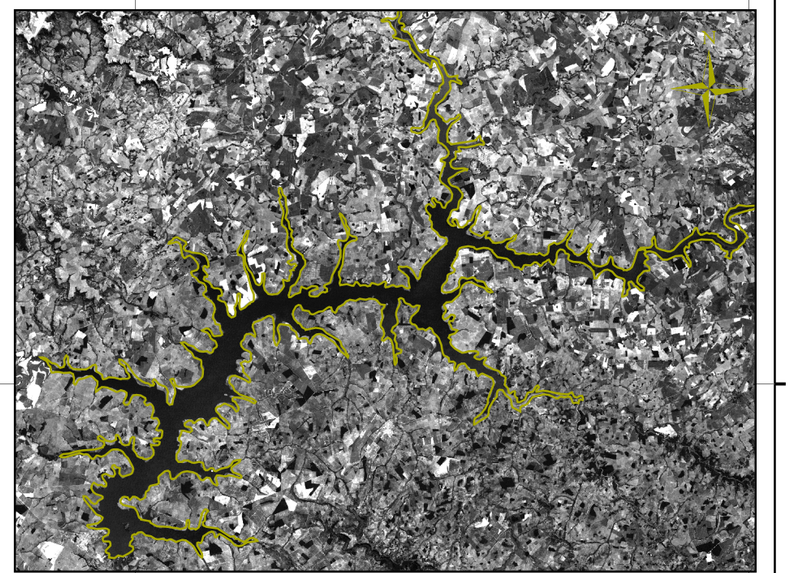
7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat



Mapa 15 - Absorção de REM na banda 3 na imagem Land-Sat 05 de 22/05/2009 no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima turbidez na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa turbidez na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média absorção de turbidez)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta absorção de turbidez)
- 206 - 255 Mínima absorção de REM (Máxima absorção de turbidez)

550000

600000

650000

700000

7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000
m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat

Mapa 16 - Absorção de REM na banda 3 na imagem Land-Sat 05 de 06/06/2009 no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima turbidez na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa turbidez na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média absorção de turbidez)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta absorção de turbidez)
- 206 - 255 Mínima absorção de REM (Máxima absorção de turbidez)

550000 600000 650000 700000

7950000

7900000

N

0 5.000 10.000 15.000 20.000 m

Projeção Universal Transversa de Mercator
Meridiano Central -51
Datum SAD 69
Fonte: INPE - Imagem Land-Sat

Mapa 17 - Absorção de REM na banda 3 na imagem Land-Sat 05 de 09/07/2009 no reservatório de São Simão MG/GO

LEGENDA:

- Área sob influência de núvens
- 0 - 50 Máxima absorção de REM (Minima turbidez na água)
- 51 - 102 Alta absorção de REM (Baixa turbidez na água)
- 103 - 154 Média absorção de REM (Média absorção de turbidez)
- 155 - 205 Baixa absorção de REM (Alta absorção de turbidez)
- 206 - 255 Mínima absorção de REM (Máxima absorção de turbidez)

4.4 – EXTRAPOLAÇÃO DA METODOLOGIA: ESTIMATIVA DE VALORES NUMÉRICOS APROXIMADOS DOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA A PARTIR DA IMAGEM DO SATÉLITE

Os resultados apresentados nos itens 4.1 a 4.3 indicam que a metodologia proposta é eficiente na identificação de setores onde os parâmetros de qualidade da água assumem faixas mais críticas. Entendem-se aqui por críticos, valores diminutos de transparência, ou valores elevados de concentração de clorofila e de turbidez. A discriminação dessas faixas permite, conforme já discutido, visualizar a situação do reservatório para qualquer imagem, obtida em qualquer instante (mês e ano). Essa capacidade de identificação, por si só, atua como uma interessante ferramenta de monitoramento da qualidade da água, permitindo ter uma noção da situação sem a necessidade de campanhas de campo dispendiosas, ou atuando como uma ferramenta preliminar no direcionamento dos pontos de coleta de amostras de água, quando essas campanhas se fazem imprescindíveis. A despeito disto, a classificação em faixas não consegue prever valores numéricos de determinado parâmetro, ainda que se aproxime disto. Nesse sentido, a análise abordada neste item visa à estimativa desses valores numéricos, baseando-se nas diversas linhas de tendência (polinômios interpoladores) apresentadas nos itens anteriores, as quais, de uma maneira geral, relacionam o parâmetro de qualidade com o nível cinza da banda mais adequada para sua identificação.

Salienta-se que os procedimentos aqui descritos não constituem, diretamente, enfoques preferenciais do trabalho, mas atuam como um desdobramento possível de ser obtido, passível de ser lapidado por estudos futuros.

De uma maneira geral, o procedimento resume-se na obtenção dos níveis de cinza em uma rede de pontos (pixels) bem distribuídos no reservatório, ou em áreas específicas do mesmo, anotando-se também as coordenadas desses pontos. Assim, dispondo-se das coordenadas e do nível de cinza correspondente, esta última variável é transformada em valor numérico do parâmetro de qualidade, a partir da aplicação da linha de tendência (função de ajuste). A partir disto, os resultados são interpolados no espaço analisado, permitindo a construção de iso-linhas com valores numéricos dos parâmetros. Para interpolação espacial e geração das iso-linhas, foi utilizado o programa Surfer. A Figura 32 apresenta um esquema deste procedimento.

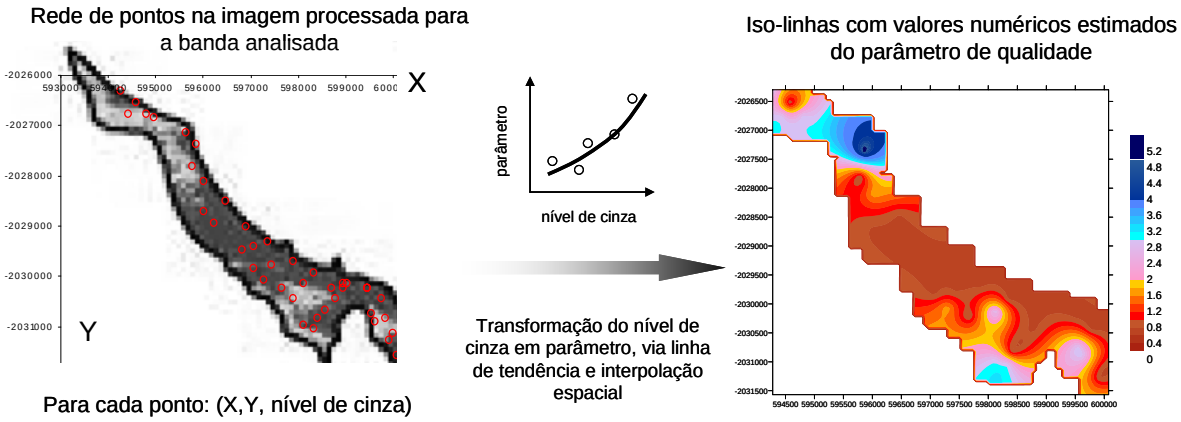


Figura 32 – Esquema da rede de pontos coletada na imagem e da transformação de níveis de cinza em parâmetro de qualidade da água

Nos sub-itens seguintes, a extensão da metodologia é demonstrada com a apresentação dos resultados e procedimentos para estimativa da distribuição espacial dos três parâmetros analisados. Tais resultados basearam-se nos mapas de faixas de parâmetros para junho de 2009, apresentados no item anterior.

4.4.1 – TRANSPARÊNCIA DA ÁGUA

No item 4.1, foram apresentados os mapas com cinco faixas de transparência e a linha de tendência que estabelece o ajuste entre valores de transparência, obtidos da literatura, e os níveis de cinza da banda 1, obtidos a partir do tratamento da imagem do satélite Land-Sat. A curva de ajuste é ilustrada pela Figura 33, com destaque para as cinco classes de transparência.

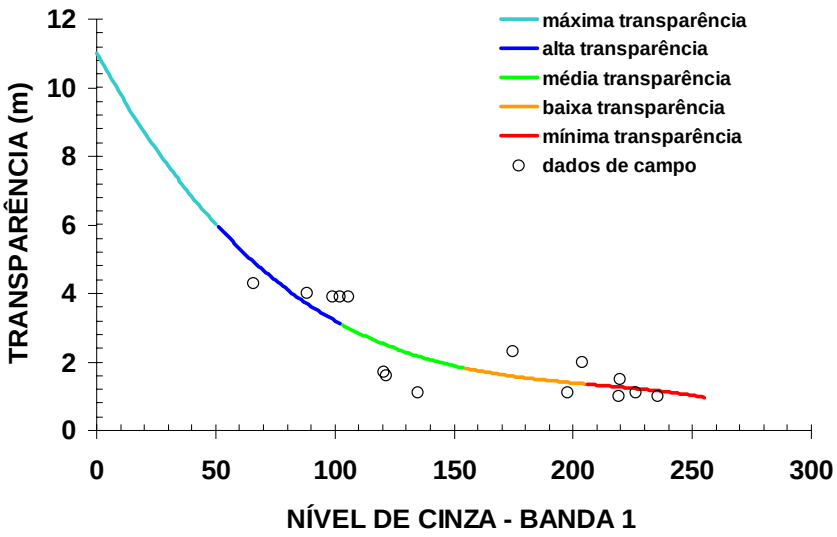


Figura 33 – Curva de ajuste entre níveis de cinza e transparência

A transformação entre níveis de cinza e transparência, via curva de ajuste, foi aplicada para o setor central do reservatório de São Simão, nas proximidades da confluência entre o Rio dos Bois e o Rio Paranaíba e da confluência entre o Rio Tijuco e o Rio Paranaíba. A Figura 34 ilustra o mapa de junho de 2009 e a área com a rede de 1070 pontos nos quais foram coletadas as coordenadas e os níveis de cinza.

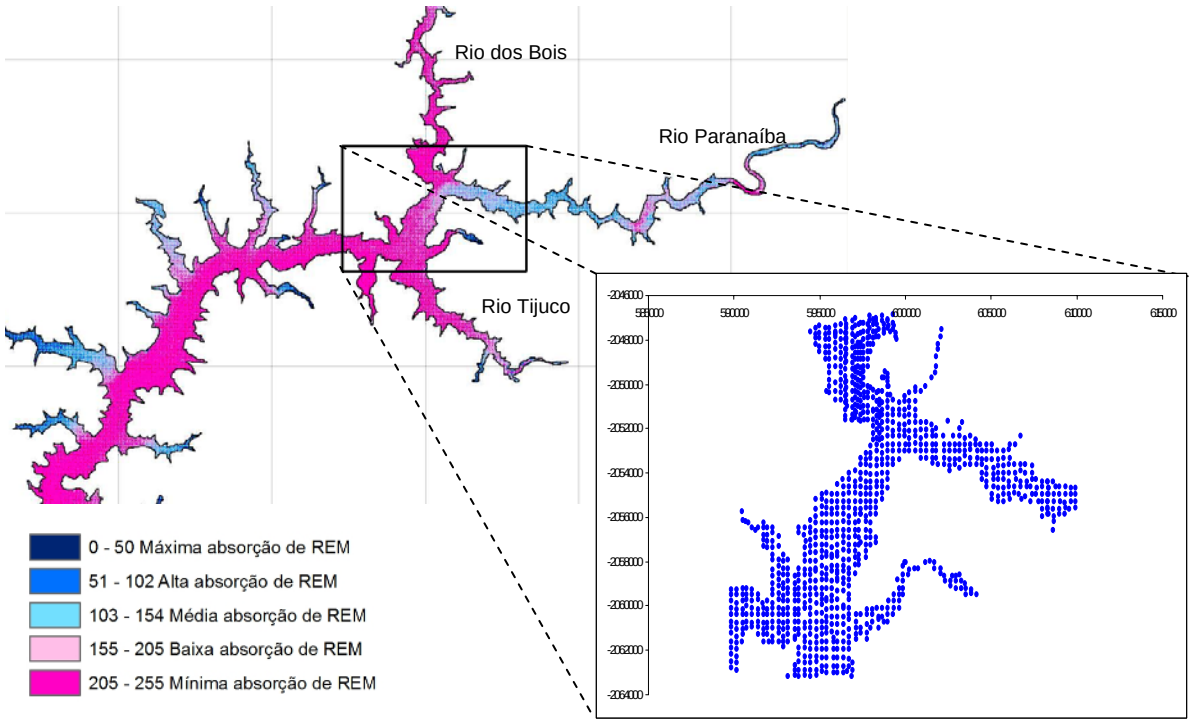


Figura 34 – Classes de níveis de cinza da banda 1, para a imagem de junho de 2009. Esquema da área selecionada e da rede de pontos utilizada para aplicação da metodologia.

A Figura 35 ilustra os resultados com curvas de contorno que descrevem a distribuição dos valores estimados de transparência ao longo de toda a área selecionada. As iso-superfícies de transparência permitem uma visualização mais direta das regiões onde este parâmetro assume os valores mais extremos.

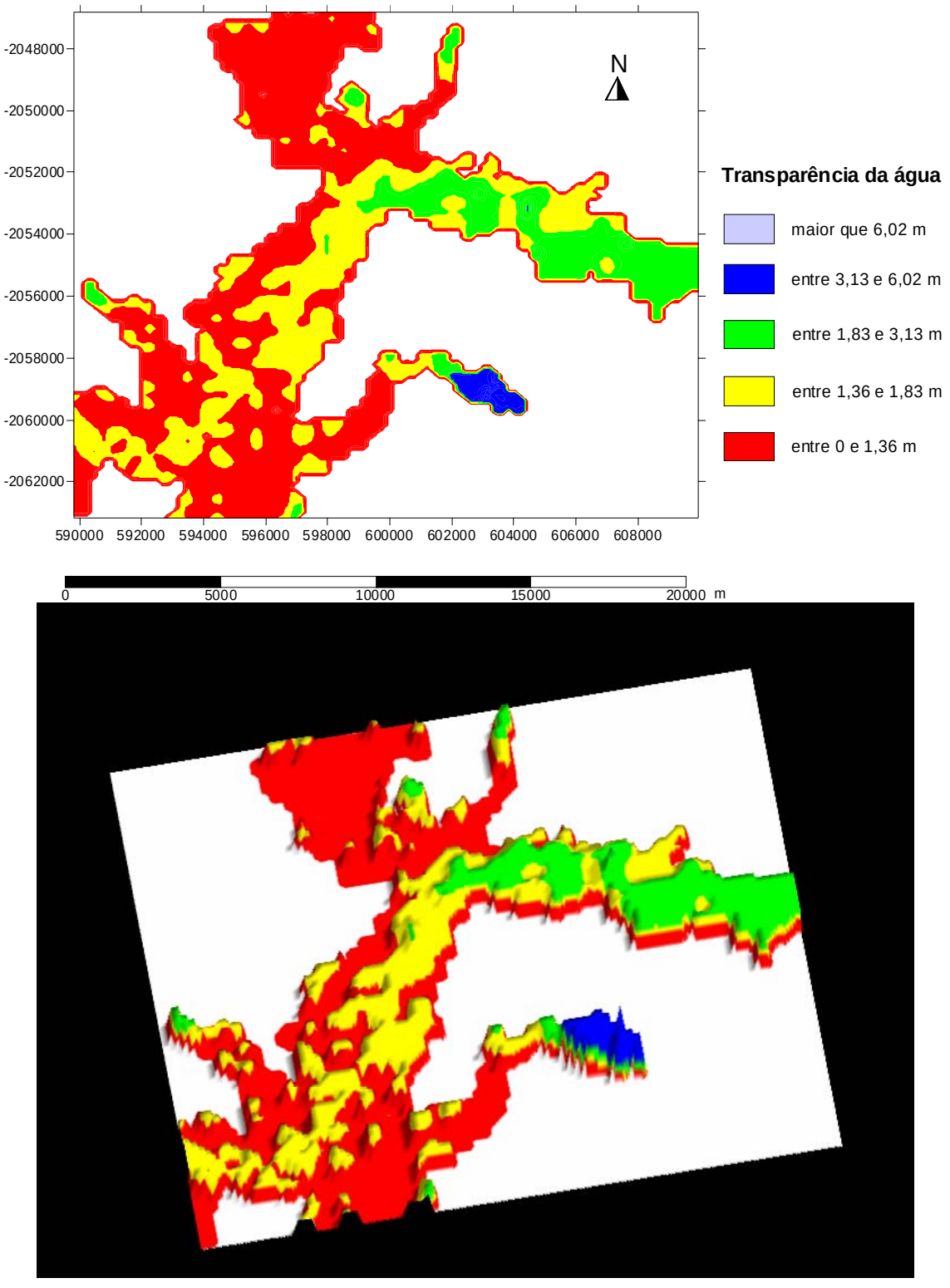


Figura 35 – Curvas de contorno com valores estimados de transparência e iso-superfícies de transparência.

Os resultados revelam que os níveis de transparência do Rio Paranaíba são reduzidos após a confluência com o Rio dos Bois, sendo esta tendência ampliada após a foz do Rio Tijuco, a jusante. É importante citar que os Rios Tijuco e dos Bois constituem os maiores afluentes do reservatório e que, além disto, drenam áreas de agricultura extensiva. Nesse sentido, as descargas de sedimentos em suspensão e de nutrientes desencadeadores do crescimento algal contribuem sensivelmente para redução da transparência do Rio Paranaíba a jusante das fozes desses tributários Esses fatores explicam a baixa transparência de suas águas quando comparadas com o trecho imediatamente de montante do Rio Paranaíba. Com o traçado das iso-linhas de transparência, é possível perceber, com clareza, a pluma resultante da mistura das águas do Rio Paranaíba com as águas do Rio dos Bois e Tijuco.

4.4.2 – CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA NA ÁGUA

No item 5.2, foram apresentados os mapas com cinco faixas de concentrações de clorofila e a linha de tendência que estabelece o ajuste entre essas concentrações e os níveis de cinza da banda 2, obtidos a partir do tratamento da imagem do satélite Land-Sat. A curva de ajuste é ilustrada pela Figura 36, com destaque para as cinco classes com os teores de clorofila e microgramas por litro. Em função da grande quantidade de pontos amostrados em campo, com concentrações reduzidas, o eixo das ordenadas foi plotado em escala logarítmica, permitindo uma melhor visualização desses pontos.

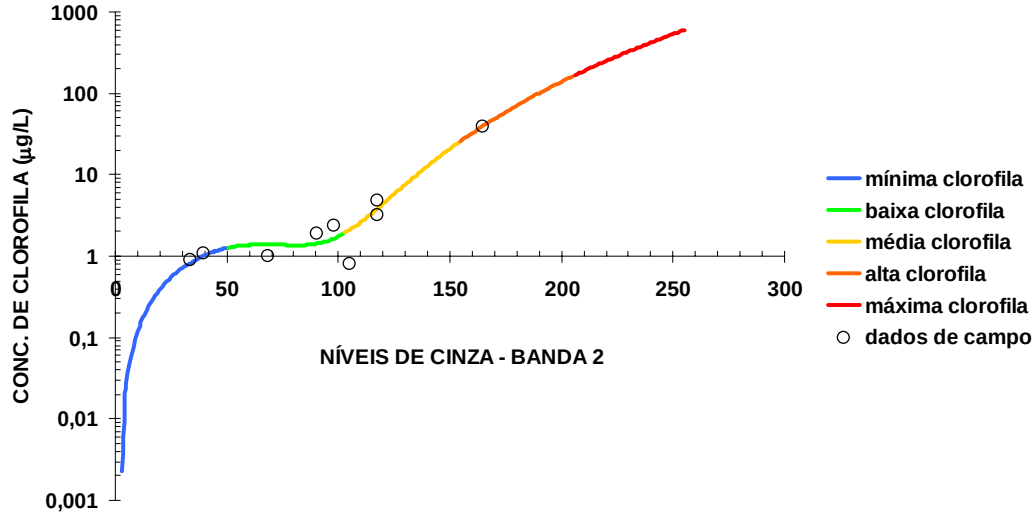


Figura 36 – Curva de ajuste entre níveis de cinza e teores de clorofila

Na avaliação de clorofila, a curva de ajuste foi aplicada em dois setores do reservatório, um próximo da barragem e outro na zona de confluência dos Rios Tijuco e dos Bois, conforme ilustra a Figura 37.

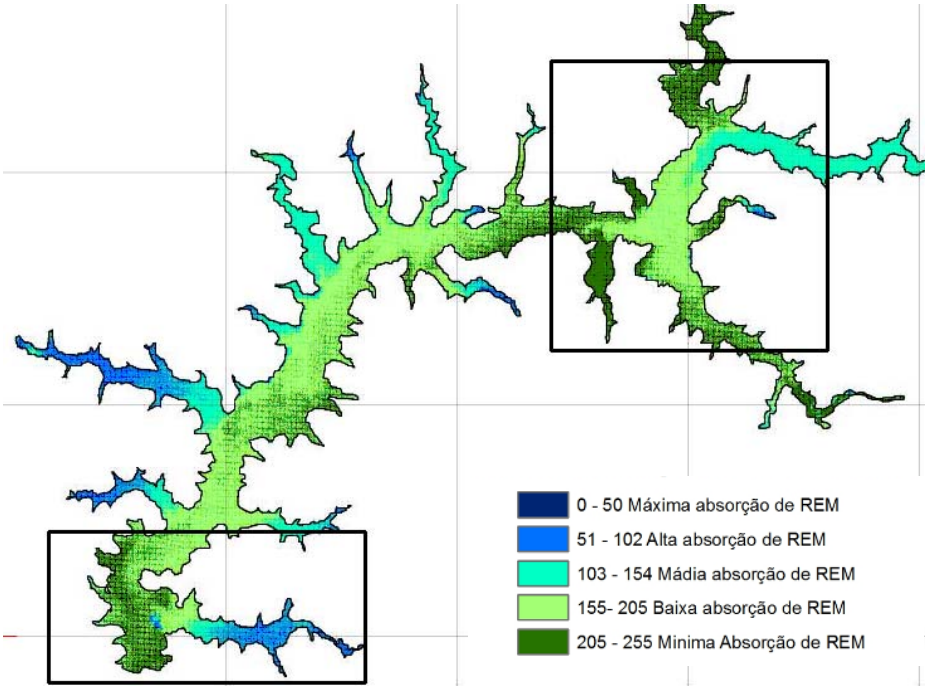
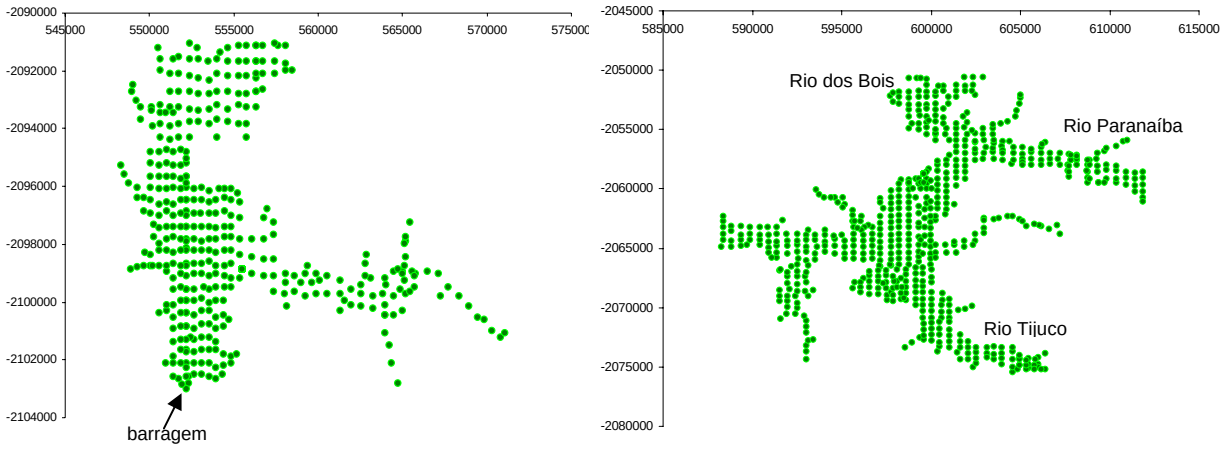


Figura 37 – Classes de níveis de cinza da banda 2, para a imagem de junho de 2009. Esquema das áreas selecionadas para estimativa de concentrações de clorofila.

As redes de pontos utilizados na transformação nível de cinza/clorofila são ilustradas pela Figura 38. No caso deste estudo, foram utilizados 400 pontos na vizinhança da barragem e 655 pontos no setor de confluência dos Rios Tijuco e dos Bois.



(a) – Proximidade da barragem (b) – Confluências

Figura 38 – Redes de pontos onde foram coletados os níveis de cinza para a banda 2

A análise do primeiro setor, situado imediatamente a montante da barragem, fundamenta-se no fato de que estados tróficos avançados próximos de tomadas de água prejudicam a operação de sistemas de captação, sejam eles destinados à geração de energia, ao abastecimento de água e à irrigação. A qualidade da água nesses setores também é prejudicada, haja vista que a redução da penetração de luz solar reduz sensivelmente a fotossíntese, incentivando processos anaeróbios de decomposição de matéria orgânica e a liberação de gases como o metano. Por isto, em termos de monitoramento da qualidade da água em reservatórios, é interessante acompanhar a evolução das distribuições de clorofila na vizinhança de tomadas de água. Para a área em questão, as concentrações estimadas de clorofila são ilustradas pela Figura 39. Os resultados revelam grandes concentrações na vizinhança da barragem o que é, portanto, um forte indicador de presença algal, provavelmente favorecida pela acumulação de nutrientes provindos dos afluentes

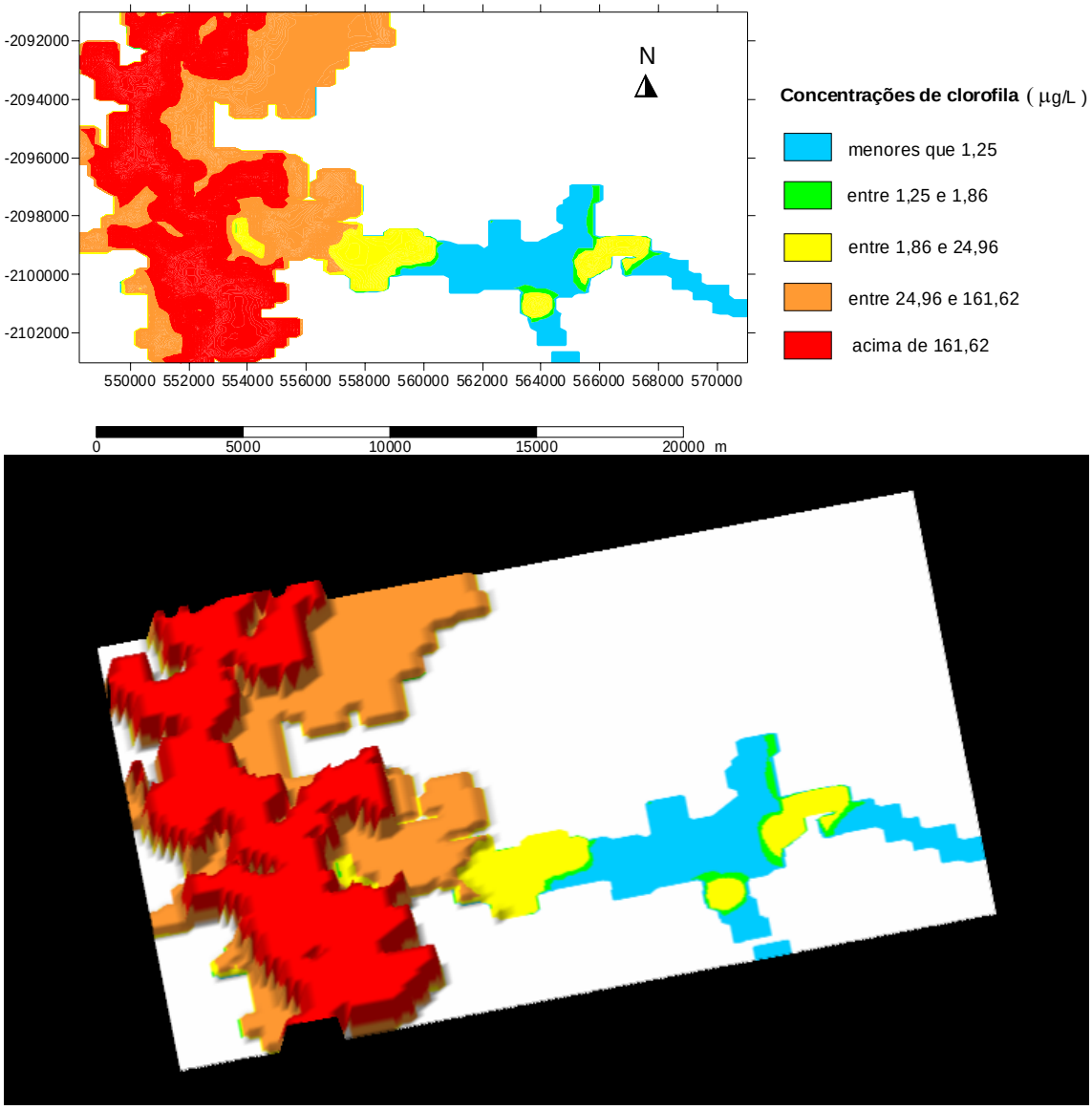


Figura 39 – Curvas de contorno com valores estimados de clorofila e iso-superfícies de concentração.

Na confluência dos dois principais tributários do reservatório, os resultados estimados para concentração de clorofila confirmam que os teores são sensivelmente ampliados a jusante das fozes (Figura 40). Para o período analisado, junho de 2009, percebe-se que o maior aporte de clorofila provém do Rio dos Bois. Também é possível visualizar a pluma resultante da mistura das águas imediatamente a jusante deste afluente.

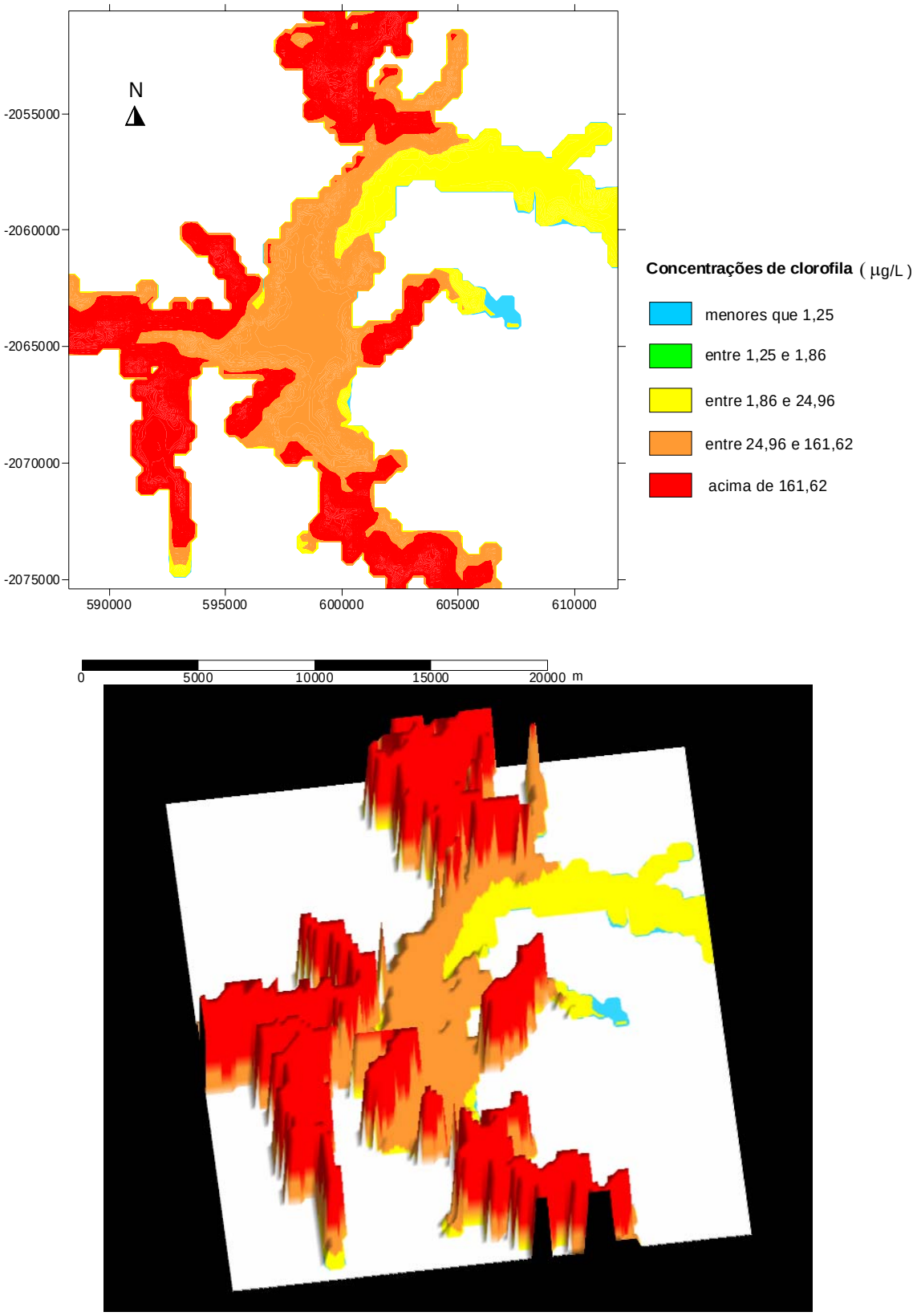


Figura 40 – Curvas de contorno com valores estimados de clorofila e iso-superfícies de concentração.

4.4.3 – TURBIDEZ

No item 4.3, foram apresentados os mapas com cinco faixas de turbidez e a linha de tendência que estabelece o ajuste entre este parâmetro e os níveis de cinza da banda 3, obtidos a partir do tratamento da imagem do satélite Land-Sat. A curva de ajuste é ilustrada pela Figura 41, com destaque para as cinco classes estabelecidas para a turbidez.

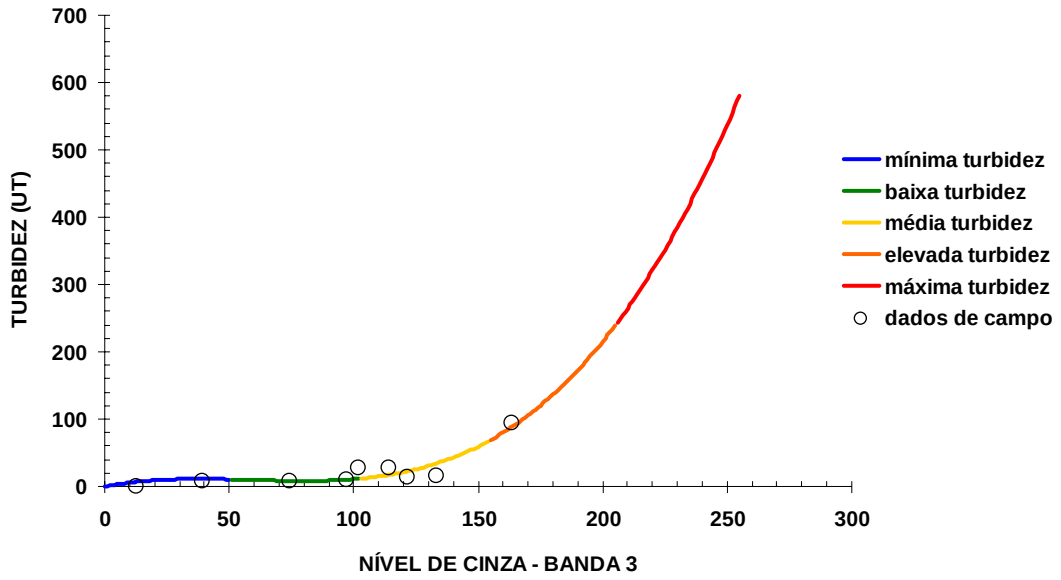


Figura 41 – Curva de ajuste entre níveis de cinza e turbidez da água

A presente análise procurou abranger os setores de maior turbidez detectados pelo processamento da imagem de junho de 2009. Neste caso, os níveis de cinza para a banda 3 foram coletados em uma rede de 410 pontos, ilustrada pela figura 42. Os valores estimados para turbidez são ilustrados pela Figura 43.

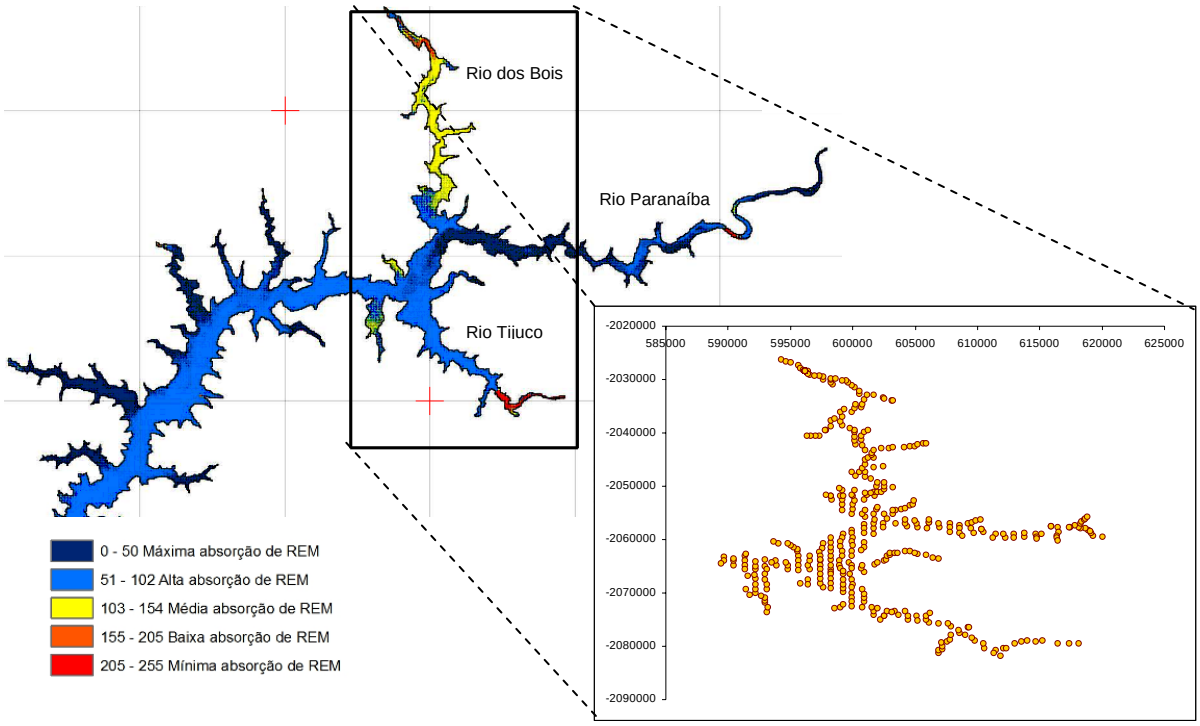
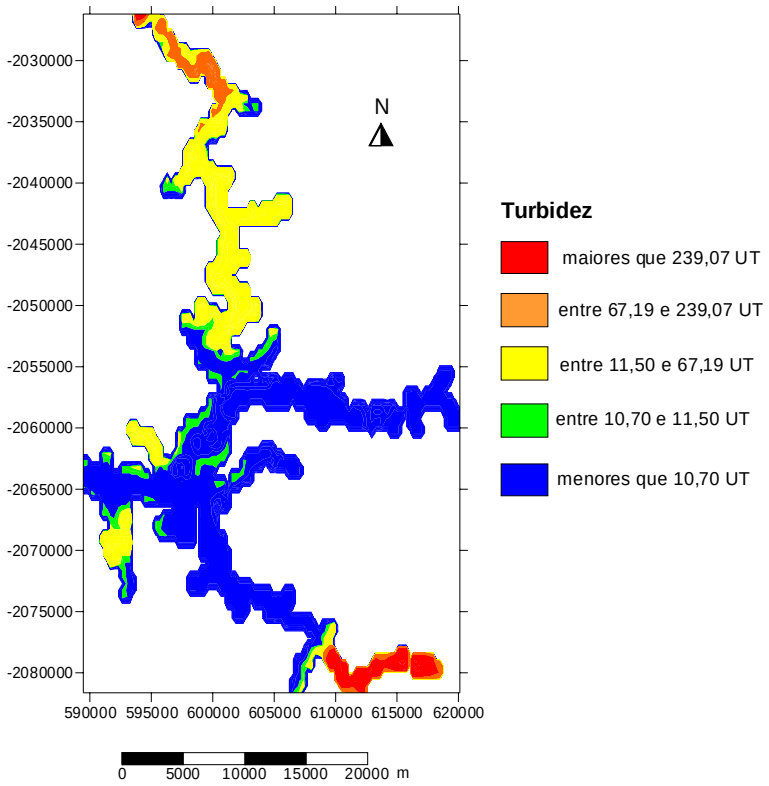


Figura 42 – Classes de níveis de cinza da banda 3, para a imagem de junho de 2009. Esquema da área selecionada e da rede de pontos utilizada para aplicação da metodologia.



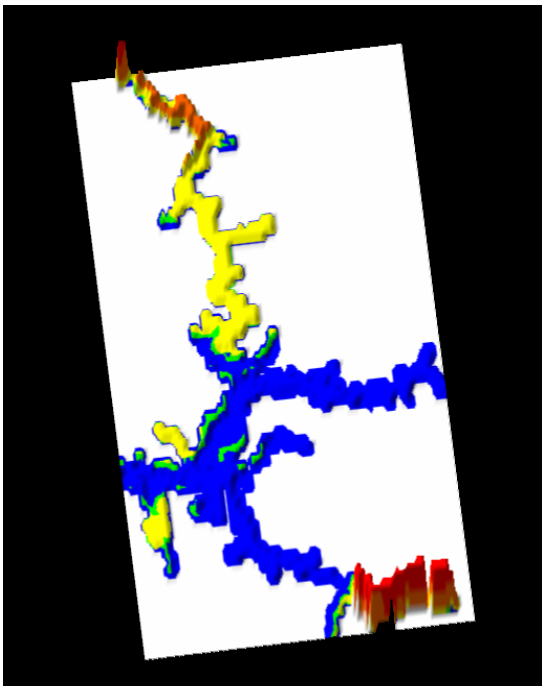


Figura 43 – Curvas de contorno com valores estimados de turbidez e iso-superfícies de turbidez

Os resultados revelam que, para o período em questão (junho de 2009), os maiores valores de turbidez são encontrados no trecho de reservatório que recebe o Rio Tijuco. Por este afluente, contudo, essa turbidez não chega a atingir o leito principal do Rio Paranaíba. Ao norte da região analisada, o Rio dos Bois, embora apresente índices menores de turbidez, contribui para valores mais elevados até o leito do Rio Paranaíba. Isto é um indicador de que o aporte difuso de sedimentos neste rio deve ser mais intenso.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho com imagens de satélite possibilita ao usuário uma grande quantidade de análises espaciais. A variedade dos dados e a resolução temporal são fatores que garantem o aumento e incrementam o alcance das pesquisas realizadas com este tipo de dado.

Foi desenvolvido, nesta pesquisa, um modelo de monitoramento de qualidade da água no qual, através da análise constante de imagens de um reservatório, é possível fazer um diagnóstico da represa desde o enchimento (caso tenha ocorrido a partir da década de 1970, quando se iniciou o lançamento de satélites de monitoramento ambiental) até o estágio atual, identificando os causadores de impactos e os locais propícios para ocorrerem futuros danos ambientais. É especialmente interessante que este monitoramento possa ser realizado desde o projeto inicial de uma nova usina, haja vista que é possível identificar os afluentes mais críticos, propondo medidas para reduzir os fatores que são responsáveis pela poluição do corpo hídrico e por prejuízos nos usos múltiplos que o reservatório pode oferecer.

Ao relacionar os dados de sensores remotos com dados de analise da água, era preciso identificar quais os parâmetros físicos, biológicos e químicos seriam possíveis de se visualizar nas imagens. Para se chegar neste resultado, foram realizados testes com todos os parâmetros medidos. Todos os resultados das coletas de campo foram analisados separadamente com as imagens para se saber qual destes dados interferiria na resposta espectral da imagem. No final dos testes, constatou-se que entre os parâmetros medidos a transparência da água, a presença de clorofila e de turbidez foram os que mais alteraram os níveis de cinza presentes em cada pixel da imagem na área do reservatório.

Definindo os parâmetros que seriam relacionados, foi necessário definir qual faixa espectral da imagem Land-Sat, que é denominada de banda espectral, seria relacionada com o determinado parâmetro. Realizando novos testes, determinou-se a faixa correspondente ao espectro visível como a mais contrastante com os parâmetros. Assim, foi definido a relação da banda 1 correspondente à cor azul com a transparência

da água, pois ao diminuir a transparência na água diminui também a absorção de radiação eletromagnética na banda 1. A banda 2, correspondente à cor verde, foi relacionada com a clorofila, pois quando se aumenta a concentração de clorofila na água aumenta-se também a reflexão de radiação eletromagnética na banda 2. E a banda 3, correspondente à cor vermelha, foi relacionada com a turbidez da água, pois quando a turbidez da água é elevada, amplifica-se a reflexão de radiação eletromagnética na banda 3 do satélite Land-Sat. A metodologia utiliza a divisão dos 255 níveis de cinza da imagem em cinco partes, fator que propicia a identificação de regiões onde os valores dos parâmetros são mais críticos, passando de valores moderados até índices mais brandos. Essa divisão, quando reproduzida em forma gráfica, permite uma visualização imediata da distribuição do parâmetro na área do reservatório, constituindo uma ferramenta de monitoramento econômica. Em termos de aplicação da metodologia, analisando o Reservatório de São Simão, identificaram-se os locais mais críticos com relação à entrada de sedimentos e presença algal, o que já havia sido constatado na pesquisa de campo publicada por Coelho em 2004 e que foi reafirmado no presente estudo que utilizou sensoriamento remoto.

A metodologia proposta para monitoramento pode ser estendida para estimar valores numéricos dos três parâmetros de qualidade da água através dos valores digitais da imagem, fazendo com que os gestores tenham um conhecimento aproximado da qualidade da água, com iso-linhas de parâmetros distribuídas em toda a extensão do reservatório. Para estimar estes valores, foram utilizadas as diversas linhas de tendência que estabelecem relações entre parâmetro e nível de cinza. Nesse sentido, é fundamental que haja uma nuvem de dados coletados em campo, as quais sintetizam o valor do parâmetro e a coordenada do ponto onde o mesmo foi obtido. Aplicando as linhas de tendência determinadas nas correlações anteriores, estimam-se os possíveis valores para os parâmetros através de pontos distribuídos no reservatório, de onde são extraídos o nível de cinza e a coordenada do ponto. É interessante que tais linhas de tendência, que estabelecem a transformação nível de cinza/parâmetro, sejam representadas por funções com comportamento aproximadamente monotônico (sempre crescentes ou sempre decrescentes na sua faixa de domínio). Essa observação fundamenta-se no fato de que a absorção de REM, nas bandas mais adequadas, está inversamente relacionada com níveis de turbidez e clorofila, e diretamente relacionada com a transparência. Por isto, a intensificação da resposta espectral (absorção de radiação eletromagnética para a banda

analisada) sempre condiciona uma mesma tendência em relação ao parâmetro, seja de aumento, no caso de turbidez e clorofila, seja de diminuição, no caso de transparência.

Para sintetizar a metodologia proposta, é conveniente apresentar um fluxograma que direciona a sequência das análises. Este fluxograma/resumo é ilustrado pela figura 44.

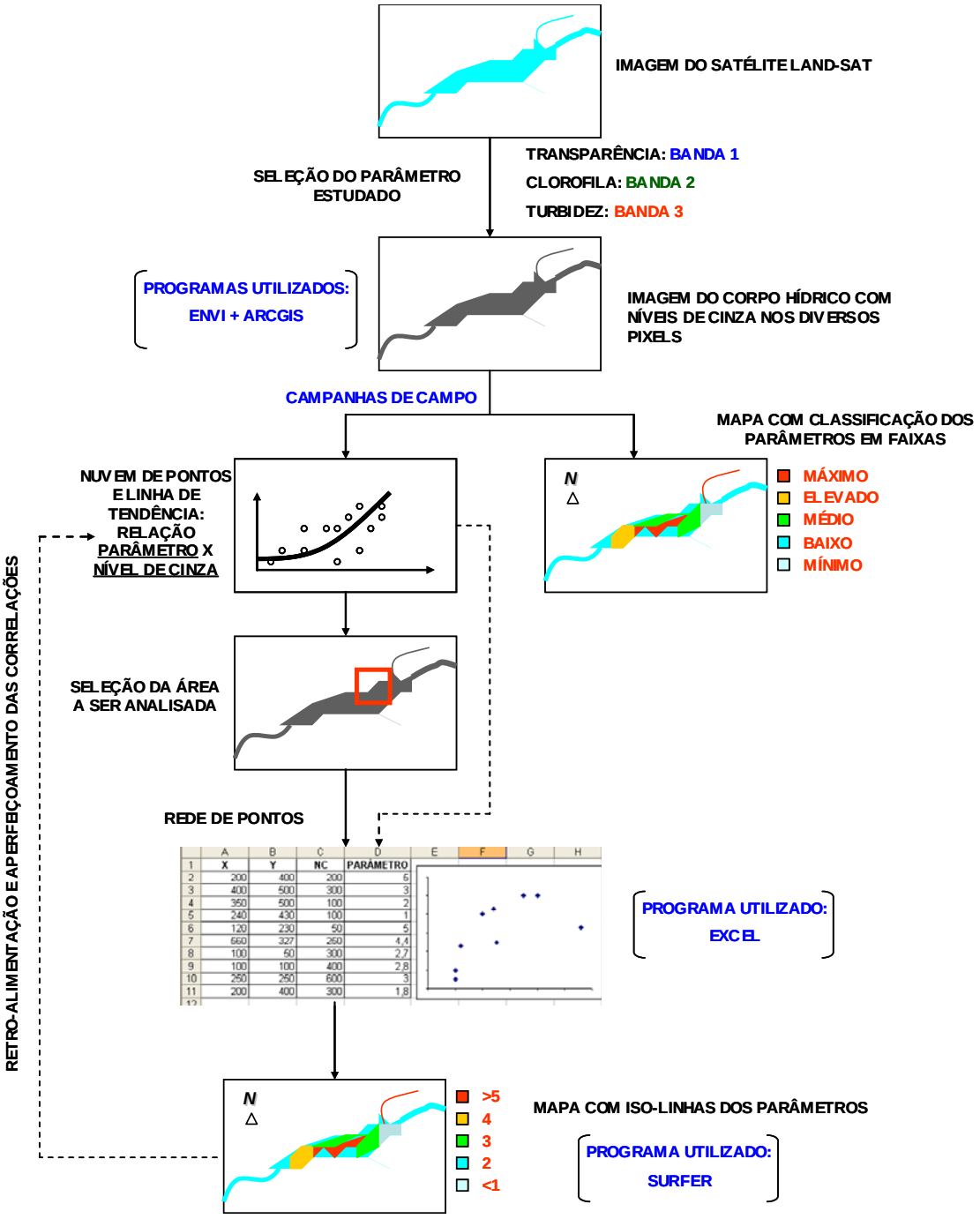


Figura 44 – Fluxograma que resume a metodologia proposta neste trabalho

A despeito da idéia aqui lançada e dos resultados promissores obtidos pela metodologia, sua extensão para a estimativa de valores numéricos dos parâmetros, o que é feito diante do uso da função de ajuste (parâmetro *versus* nível de cinza), ainda carece de estudos mais aprofundados que permitirão a lapidação do modelo. Dentre esses estudos, sugere-se, para pesquisas futuras, a verificação dos seguintes itens:

- Obtenção de uma nuvem de pontos mais densa, no estabelecimento da linha de tendência. Este fator demanda campanhas de campo freqüentes para o estabelecimento de curvas de ajuste mais representativas e que possibilitam a retro-alimentação do modelo;
- Campanhas de campo realizadas em diversas épocas do ano, para verificar, especificamente, qual é o real nível de influência das condições de luminosidade e insolação, e das condições atmosféricas, como a umidade do ar, na resposta espectral das imagens.

Em linhas gerais, o modelo de análise apresentado neste trabalho, que utiliza imagens de satélite para identificar alterações na qualidade da água, obteve resultados satisfatórios. Recomenda-se o uso desta metodologia para identificar pontos críticos dentro do reservatório, direcionar e estabelecer a freqüência de campanhas de campo. Salienta-se que este se trata de um procedimento de estimativa de parâmetros e não um procedimento para se obter valores exatos dos mesmos. Enfim, os objetivos traçados foram alcançados, porém precisam ser debatidos e aprofundados. O despejo de substâncias poluidoras das mais variadas formas estabelece a necessidade de se buscar meios para controlar a poluição e tratar a água que já está degradada. Este trabalho é uma pequena contribuição para identificação de ambientes aquáticos degradados a fim de apontar o problema e seus causadores, como primeiro passo para corrigi-lo.

REFERÊNCIAS

Agencia Nacional de Energia Elétrica, **Sistema de Informações Georreferenciada do Setor elétrico – SIGEL;** Disponível em <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=544&idPerfil=2> Acessado em 12 de agosto de 2009.

Agencia Nacional de Energia Elétrica; **Guia de Práticas Sedimentométricas**; Brasília DF. 2000.

Agencia Nacional de Energia Elétrica; **Guia de Energia Hidráulica**; Brasília DF. 2000.

Agencia Nacional de Energia Elétrica **Estudo de Vida Útil Econômica e Taxa de Depreciação.** VOLUME 2 / 2. Escola Federal de Engenharia de Itajubá - CERNE - Centro de Estudos em Recursos Naturais e Energia – 2002

Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed. – Brasília : Aneel, 2005.

Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília : Aneel, 2008.

ANA – **Agência Nacional das Águas**. Disponível em www.ana.gov.br. Acesso em: 15 de junho de 2009.

ALBUQUERQUE P.M. **Processamento de Imagens: Métodos e Análises.** Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT Coordenação de Atividades Técnicas - CAT

AGUSTI, S.; PHILIPS, E.J. **Ligth Absorption By Cyanobacteria: Implications Of The Colonial Growth Form**. Limnology And Oceanography, 1992.

BARBOSA C.C.F. ET AL. **CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DAS MASSAS D'ÁGUA AMAZÔNICAS.** Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2419 - 2425.

BINDING Caren E. ET AL. **Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie.** Remote Sensing of Environment - Received 5 February 2007; received in revised form 31 July 2007; accepted 28 August 2007

Borges P.S.F. ET AL. **Sensoriamento Remoto e Geoestatística aplicados à estimativa de batimetria em reservatórios do Setor Elétrico Brasileiro.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2471-2478

CAMARA G., ET AL, **Introdução a Ciência da Geoinformação.** INPE-10506-RPQ/249, São José dos Campos, 2001

Carvalho N. O. ET AL. **Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios**; Agencia Nacional de Energia Elétrica; Brasília DF. 2000.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia Fluvial**; São Paulo. Ed. Edgard Blucher, 1981

CEMIG – **Companhia Energética de Minas Gerais**. Disponível em www.cemig.gov.br. Acesso em: 15 de junho de 2009.

COELHO, Ricardo Pinto. **O Aporte de Fósforo e a Presença de Cianobactérias no Reservatório de são Simão.** Convênio Cemig/Fundep 4830-1 - Relatório Final – 6 – 2004.

CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental. **Variáveis de Qualidade das Águas**. São Paulo, 2001, Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br/ Água /rios/variaveis.asp> Acesso em 30/08/2009.

DAVIS C., FONSECA F. **Introdução aos Sistemas de Informação Geográficos.** Curso de Especialização em Geoprocessamento, UFMG, Belo Horizonte, 2001.

DIAS N.W. ET AL. **Sensoriamento Remoto para a Caracterização do Aporte de Sedimentos e Compostos Orgânicos da Represa de Paraibuna, São Paulo.** Artigo Completo submetido para o XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

ELACHI, C. **Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing**. New York. Wiley & Sons., 1987.p.412.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em www.embrapa.gov.br. Acesso em: 08 de agosto de 2009

ERBERT M. **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** Dissertação de Mestrado CEPSRM – UFRGS. 2001

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de Limnologia**; 2 ed. Rio de Janeiro, Interciência, 1998.

FERREIRA A. B. **Influência do Sistema Terrestre no Comportamento das Variáveis Limnológicas e na Reflectância Espectral de Sistemas Aquáticos –** Dissertação Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria – 2008 – Centro de Ciência Rurais – Programa de Pós Graduação em Geomática

FLORENZANO, Teresa Galotti. **Imagens de satélite para estudos ambientais**; São Paulo, Oficina de Textos. 2002.

GARCIA, Gilberto J**. Sensoriamento Remoto Princípios e Interpretação de Imagens**; Ed. Nobel, Rio Claro, SP, 1982.

Global Land Cover Facility - **Universidade de Maryland – EUA** – Disponível em http://glcf.umiacs.umd.edu/research/portal/geocover/ortho.shtml. Acesso em 12 de Agosto de 2009.

GORDON Howard R. ET AL. **Remote sensing of ocean color: Assessment of the water-leaving radiance bidirectional effects on the atmospheric diffuse transmittance for SeaWiFS and MODIS intercomparisons.** Remote Sensing of Environment - Received 18 October 2007; received in revised form 14 December 2007; accepted 22 December 2007

HELLWEGER, F. L. ET AL. **Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor**. Estuarine, Coastal and Shelf Science 61: 437-448. 2004.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatistica. **Senso Demográfico de 2001.** Disponível em www.ibge.gov.br. Acesso em: 20 de junho de 2009.

INPE – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. **Introdução ao SPRING-Apostila Teórica**. 2004.

INPE – **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. Disponível em http://www.dgi.inpe.br/CDSR/ > Acessado em 10/10/09

KIRK, J. T. **Light and photosysthesis in aquatic ecosys**tems. 2 ed. Cambridge University Press, Cambridge. 509p. (1995)

Libos M. ET AL. **Sensoriameto remoto (SR) e sistema de informações geográficas (SIG) para modelagem de qualidade da água. Estudo de caso: bacia do rio Cuiabá,** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2219-2227.

Lima D.L. ET AL. **Caracterização da dispersão espacial de plantas aquáticas usando sensoriamento remoto e geoestatística,** Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5879-5886.

LONDE L.R. ET AL. **Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 389-396.

LONDE, L.R. **Comportamento espectral de fitoplâncton de águas interiores do brasil como suporte à aplicação de sensores hiperespectrais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. Tese de Doutorado.

LORENZEN,C.J. **Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations Limnology & Oceanography.** 1967 - 12:343-346.

LUND, J.W.G.. **A simple counting chamber for nannoplankton Limnology & Oceanography.** 1959 - 4:57-65

MANTOVANI, J.E. **Comportamento Espectral da Água: faixas expectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e matéria inirganica particulada**, São José dos Campos: INPE, 1993.

MANTOVANI, J.E, NOVO, E. M. L. M. **Comportamento Espectral da Matéria Orgânica Dissolvida.** Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 917-923.

MEDEIROS C.N. ET AL **Uso do sensoriamento remoto e processamento digital de imagens utilizadas para mapear a mancha urbana do município de Parnamirim (RN).** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 617-624.

MENEZES, P.R. **Avaliação e Seleção de Bandas do T**M. (Tese de Doutorado) – Instituto de Biociências – USP, São Paulo, 1986. 233 p.

MILLIE, D.F. ET Al. **High-Resolution airborne remote sensing of bloom-forming phytoplankton**. **Journal of Phycology**, v. 28, p. 281-290, 1992.

Mobley, C.D. **The optical properties of water**. Handbook of optics, 2 ed., McGraw-Hill, 1994.

MOREIRA, Mauricio Alves. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**; 2°ed. – Viçosa: UFV,2003.

NOVO, E. M. L. M. **Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto.** XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações.** 2ª edição. São José os Campos, d. Edgard Blücher Ltda, 1998. 308p.

NOVO, E. M. L. M. **Comportamento espectral da água**. In: MENESES, P. R. & NETTO, J. S. M. (Orgs.). **Sensoriamento remoto – reflectância dos alvos naturais**. Editora Universidade de Brasília – UnB. Embrapa Cerrados. 2001

PADIAL P.R. ET AL. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO GUARAPIRANGA, RIO GRANDE E BRAÇO TAQUACETUBA DO COMPLEXO BILLINGS.** Pós – Graduação em Ecologia Instituto de Biociências – 2006 – Universidade de São Paulo.

PEREIRA, M. D. B. **Parâmetros limnológicos passíveis de serem monitorados através de dados espectrais obtidos por sensores remotos orbitais**. Tese de dourado. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo. 1992.

RESOLUÇÃO Nº 302, DE 20 DE MARÇO DE 2002 – Conselho Nacional de Meio ambiente – CONAMA

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M. **Tratamento de água**: **tecnologia atualizada**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

ROSA, Roberto. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, 5° edição, Uberlândia. Ed. EDUFU, 2003.

ROSA, Roberto. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**, 6° edição, Uberlândia. Ed. EDUFU, 2007.

SCHMUGGE Thomas J. ET AL. **Remote sensing in hydrology**. Advances in Water Resources 25 (2002) 1367–1385

SETTI A. A., Lima. ET AL. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2ª ed. – Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. 207 p.

SLATER, P.N. **Remote Sensing, optics and optical Systems**. Reading, Addison-Wesley, 1980. 575 p.

SILVA, Sebastião Alves. **Avaliação do assoreamento do Lago Bonsucesso, Jataí – GO** / Sebastião Alves da Silva. - Curitiba, 2007. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia.

Sloff C.J. **Modelling reservoir sedimentation processes for sediment management studies**. Proc. conf. "Hydropower into the next century", Portoroz, Slovenia, 15-17 sept. 1997, p. 513-524, Aqua Media Int., UK.

SOUZA R.B. **SENSORIAMENTO REMOTO DOS OCEANOS.** Espaço & Geografia, Vol.6, No 1 (2003), 123:145 ISSN: 1516-9375

STEFFEN C.A. **TÉCNICAS RADIOMÉTRICAS COM O SPECTRON SE-590.** Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, 14-19 abril 1996, INPE, p. 969-975

TEIXEIRA F.J. ET AL. **Previsão de Vida útil do Reservatório de Barra Bonita Utilizando Digitalização de Mapas e Comparação Batimétrica.** Pesquisa e Tecnologia – Minerva, *4*(1): 1-10 - 2004

TUNDISI, J.G. **Comparação do Estado Trófico de 23 Reservatórios do Estado de São Paulo: Eutrofização e Manejo.** In TUNDISI, J.G. (Orgs.). Limnologia e Manejo de Represas. Editora da Universidade de São Paulo – USP – 1988.

UTERMOHL, H.. **Zur Vervollkommung der quantitativen Phytoplankton Methodik. Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie –** Mitteilungen. 1958 - 9- 1-38.

VASCONCELOS C.M. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens.** Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas CAT- Out. 2001

WACHHOLZ F. ,FILHO W.P. **Características Liminológicas e a Reflectância da Água do Reservatório Costa e Silva – RS** - *1° SIMPGEO/SP, Rio Claro, 2008 ISBN: 978-85-88454-15-6*