



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**USO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO MONITORAMENTO ESPACIAL E
TEMPORAL DO FLUXO DE SEDIMENTOS NO BRAÇO DO RIO INDAIÁ,
RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS-MG**

CARLOS EDUARDO TONIAZZO PINTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 43

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

BRASÍLIA-DF

2013



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**USO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO MONITORAMENTO ESPACIAL E
TEMPORAL DO FLUXO DE SEDIMENTOS NO BRAÇO DO RIO INDAIÁ,
RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS-MG**

CARLOS EDUARDO TONIAZZO PINTO

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de pós-graduação em Geociências Aplicadas (área de concentração Geoprocessamento e Análise Ambiental), do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília-UnB, para obtenção do título de mestre em Geociências Aplicadas.

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

BRASÍLIA-DF

2013



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

**USO DE IMAGENS DE SATÉLITE NO MONITORAMENTO ESPACIAL E
TEMPORAL DO FLUXO DE SEDIMENTOS NO BRAÇO DO RIO INDAIÁ,
RESERVATÓRIO DE TRÊS MARIAS-MG**

CARLOS EDUARDO TONIAZZO PINTO

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jean Michel Martinez (orientador) (IRD)

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista (IG-UnB)

Prof. Dr. Laerte Guimarães Ferreira Junior (UFG)

BRASÍLIA-DF

2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por estar sempre presente na minha vida.

Ao meu professor orientador Jean Michel Martinez pela sua paciência e disposição para esclarecer as dúvidas no decorrer desse trabalho.

Ao coordenador do projeto CT-ENERG: “redução de perdas, aumento de eficiência e redução de custos de operação e de manutenção”, Marco Ianirruberto pela oportunidade de trabalho.

Ao estudante de doutorado e amigo Paulo Henrique Menezes pela ajuda nos trabalhos de campo e pelas sugestões para melhoria do trabalho. Agradeço também ao estudante de doutorado Raul Espinoza Villar pelo apoio no trabalho de campo e nas análises dos resultados.

Agradeço a Silvana Lima Martins pelas sua amizade e sua ajuda nas fases finais da escrita

Agradeço aos professores do curso de pós-graduação em Geociências aplicadas que sempre se mostraram presentes e dispostos para esclarecer todas as dúvidas e dificuldades no decorrer de todo curso.

A minha família, em especial a minha querida mamãe Alda, que sempre incentivou na minha vida acadêmica.

Agradeço todos os amigos e amigas que fiz na UnB durante o mestrado (Eluzai, Serjão, Gervásio, Laiza, Marcelo, Kássia, Larissa, Michelle)

RESUMO

O conhecimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para uma gestão adequada dos seus recursos hídricos, bem como para o suporte das decisões relativas ao desenvolvimento de atividades antrópicas e ao acompanhamento de impactos como assoreamento, poluição e eutrofização. Estudos de monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos ainda passam por muitas dificuldades, a dimensão das regiões de estudo, que muitas vezes determinada pela extensão das bacias hidrográficas, eleva os custos dos estudos e impossibilita análises espaciais periódicas. As técnicas convencionais utilizadas para o monitoramento das águas não podem acompanhar a crescente demanda de controle da qualidade das águas, sendo necessário criar soluções alternativas. Atendendo a essa necessidade, destacam-se os sensores remotos que permitem levantar dados e monitorar alvos em um curto espaço de tempo.

Assim, esse trabalho foi focado em monitorar o fluxo de entrada de sedimentos no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias-MG, com base em dados das imagens de satélites e medições em campo. Foram usadas séries temporais de 12 anos das imagens MODIS (Terra e Aqua), compostas a cada 8 dias. Estimativas de reflectância da superfície da água foram calculadas usando o algoritmo MOD3R, e técnicas de radiometria e coletas de sedimentos em suspensão *in situ* foram usadas para calibrar as respostas das imagens de satélites e simular bandas espectrais. Dados hidrossedimentométricos da estação de monitoramento do rio Indaiá foram integrados nas análises para entender a relação entre as respostas das imagens de satélites e as medições de campo.

As medições da reflectância feitas por radiometria *in situ* ao longo do braço do rio Indaiá detectaram uma variação nas curvas de reflectância espectral, que foi relacionada com o conteúdo de sedimentos em suspensão presentes na água. A análise da série temporal de imagens MODIS mostrou boa relação com as medições hidrossedimentométrica realizadas pela CEMIG no rio Indaiá, mas variações na hidrologia do reservatório comprometeram as análises nos períodos de seca (entre os anos de 2000 e 2002).

A boa correlação entre as campanhas de amostragem de sedimentos em suspensão e as bandas MODIS simuladas, possibilitam obter estimativas de concentrações de sedimentos usando dados de reflectância da série temporal das imagens MODIS. As concentrações de sedimentos gerados a partir de dados de reflectância do MODIS permitem compreender o padrão da entrada do fluxo de sedimentos ao longo do braço do rio Indaiá. Os resultados demonstram o grande potencial das imagens de satélite em monitorar a concentração de sedimentos e a deposição em diferentes regiões no braço do rio Indaiá.

Palavras chave: Fluxo de sedimentos, sensoriamento remoto, MODIS, Reservatório de Três Marias, assoreamento, propriedades óticas, reflectância

ABSTRACT

Knowledge of the hydrology of a watershed is essential to the management of its water resources, as well as to support decisions regarding the development of human activities and monitoring of impacts such as sedimentation, pollution and eutrophication. Studies about monitoring and management of water resources still go through many difficulties: the size of the study areas, often determined by the extent of watersheds, raises the costs of studies and prevents the periodic spatial analysis. Conventional techniques used for water monitoring cannot keep up with the growing demand for control of water quality, so it's necessary to create alternative solutions. Due to this need, we highlight the remote sensors that allow collecting data and monitoring of targets that are on the surface in a short time.

Thus, this work aimed at monitoring the sediment inflow in a stretch of the Indaiá river, located in the Tres Marias reservoir-MG, based on data from satellite images and field measurements. A 12-year time series of MODIS images (Terra and Aqua) 8-day composites was used in this study. Estimates of the water surface reflectance were calculated using the MOD3R algorithm. Field radiometry and water sampling were used to calibrate the responses of satellite images to suspended sediment concentration. Suspended sediment time series from the CEMIG monitoring station of Indaiá river were integrated in the analyzes to understand the relationship between the responses of satellite images and field measurements.

The reflectance measurements, assessed by the field radiometry along the stretch of the Indaiá river, made possible to detect a variation related to the content of sediment suspended in the water. The analysis of time series of MODIS images showed good relationship with the measurement data of sediment in water, but variations in the hydrology of reservoir (i.e. dramatic dry periods) hampered the analyzes undertaken during dry periods between the years 2000 and 2002.

The good correlation between the sampling campaigns suspended sediment and simulated MODIS bands, allowed to calculate suspended sediment concentrations using MODIS reflectance time series. The concentrations of suspended sediment assessed from MODIS reflectance data makes possible to understand the pattern of incoming flows of sediments along the stretch of Indaiá river. The results demonstrate the great potential of satellite imagery to monitor the sediment concentration and deposition pattern within a reservoir.

Keywords: sediment discharge, remote sensing, MODIS, Tres Marias Reservoir, optical properties, reflectance, sedimentation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.	13
Figura 2. Coeficiente de absorção e espalhamento da água pura em função do comprimento de onda. Modificado (DEKKER, 1993).	16
Figura 3. Comportamento espectral da água em diferentes concentrações de sólidos em suspensão. Modificado de Lillesand e Kiefer (1987).	17
Figura 4. Fluxograma da metodologia desenvolvida.	20
Figura 5. Imagens MODIS (produto de reflectância da superfície) do satélite Terra. (A) - Resolução espacial de 250 metros / (B) - Resolução espacial de 500 metros.	22
Figura 6. Máscaras criadas para análise da reflectância da água no braço do rio Indaiá no reservatório Três Marias.	23
Figura 7. Localização dos pontos de amostragem radiométrica.	25
Figura 8. Medições radiométricas (A) Reflectância; (B) Coeficiente de atenuação vertical da luz descendente (K_d).	27
Figura 9. Fluxo de vazão sólida diária na estação do rio Indaiá. Fonte CEMIG.	29
Figura 10. Volume de água no reservatório de Três Marias-MG (ONS, 2012).	30
Figura 11. Curvas de reflectância espectral em diferentes pontos de amostragem no braço do rio reservatório Três Marias.	31
Figura 12. Análise de regressão entre concentração de sedimentos em suspensão e a reflectância no centro de banda do vermelho 670 nm (A) e infravermelho 859 nm (B) do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias.	33
Figura 13. Medidas de reflectância em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.	33
Figura 14. Coeficiente de atenuação vertical da luz descendente em diferentes pontos do braço rio Indaiá, reservatório Três Marias.	34
Figura 15. Análise de regressão entre concentração de sedimentos em suspensão e o coeficiente de atenuação vertical da luz descendente no centro de banda do (A) vermelho 670 nm e (B) infravermelho 859 nm do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias.	34
Figura 16. Estimativas de reflectância da superfície da água na região do infravermelho do MODIS nas máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.	36

Figura 17. Fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá em função da reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho.....	38
Figura 18. Fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá em função da reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho. Detalhe da máscara 2 para os meses janeiro-2000/janeiro-2001 e janeiro-2001/janeiro 2002.....	39
Figura 19. Análise de regressão entre a concentração de sedimentos em suspensão (campanhas) e as bandas das imagens MODIS simuladas a partir medições radiométricas (TriOS).....	40
Figura 20. Médias mensais estimada por satélite (período 2000-2012) da concentração de sedimentos das máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.....	41
Figura 21. Médias mensais estimada por satélite (período 2000-2012) da concentração de sedimentos em todos os meses do ano em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.....	42
Figura 22. Comparação entre a concentração de sedimentos em suspensão estimada por satélite no mês de março (médias anuais de reflectância) e as medições realizadas em março 2012, em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. Geral.....	11
2.2. Específicos.....	11
3. ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.1. Histórico.....	12
3.2. Caracterização da área de estudo.....	12
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
4.1. Processos de transporte de sedimentos.....	14
4.2. Sensoriamento remoto da cor da água.....	15
4.3. Resposta espectral dos componentes opticamente ativos.....	16
4.4. Imagem de satélite.....	18
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
5.1. Hidrossedimentologia.....	20
5.2. Imagens MODIS.....	21
5.3. Análise das imagens de satélite.....	22
5.4. Amostragem de campo.....	24
5.4.1. Radiometria.....	25
5.4.2. Sedimentos em suspensão.....	27
6. ANÁLISE DOS DADOS.....	29
6.1. Hidrossedimentologia.....	29
6.2. Volume da água no reservatório.....	29
6.3. Comportamento espectral da água.....	31
6.3.1. Reflectância da superfície.....	31
6.3.2. Coeficiente de atenuação vertical da luz descendente (K_d).....	33
6.4. Comportamento temporal das imagens de satélite.....	34
7. RESULTADOS.....	37
7.1. Comparação entre as imagens de satélite e os dados de vazão sólida.....	37

7.2. Calibração e validação das imagens de satélite com medições de campo (TriOS)	39
7.3. Variação temporal das concentrações de sedimentos	40
7.4. Variação espacial do padrão de sedimentação.....	41
8. DISCUSSÃO	43
9. CONCLUSÕES	46
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional e aos avanços tecnológicos, os usos múltiplos da água crescem desde o abastecimento público, a produção de alimentos, até as atividades de lazer ou de geração de energia. Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008) afirmam que os recursos hídricos necessitam de uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva. Segundo esses autores, uma base de dados consolidada transforma-se em instrumento fundamental de gestão, podendo ser uma das formas mais eficazes de enfrentar o problema de escassez, estresse e deterioração da qualidade da água. Vale ressaltar que esse conjunto de problemas está presente em diferentes escalas, e em âmbito local, regional, continental e global.

No Brasil estudos de monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos ainda passam por muitas dificuldades, tanto em termos de análises quantitativa, quanto qualitativas. A falta de dados é um dos principais problemas, devido ao alto custo dos levantamentos de campo. A dimensão das regiões de estudo, muitas vezes determinada pela extensão das bacias hidrográficas eleva os custos e impossibilita análises periódicas.

A Agência Nacional de Águas (ANA) possui uma extensa rede de monitoramento no Brasil, mas poucas informações são disponíveis em termos de monitoramento da qualidade dos recursos hídricos. Porém, podemos destacar algumas bacias que possuem redes de monitoramento eficientes e integradas que atendem a demandas específicas, como as das empresas hidrelétricas ou de abastecimento de água.

O conhecimento do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é fundamental para a adequada gestão dos seus recursos hídricos, bem como para o suporte das decisões relativas ao desenvolvimento de atividades antrópicas e o acompanhamento de eventuais impactos, tais como os processos de assoreamento, poluição e eutrofização. Contudo, as técnicas convencionais utilizadas não conseguem acompanhar a crescente demanda pelo controle da qualidade da água. Hopper (1997) afirma que a eficácia do monitoramento hidrológico é dado em função do número de parâmetros, da frequência e da distribuição espacial das medições na bacia.

Estudos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica permitem uma análise de viabilidade de diversas atividades econômicas. Segundo Lima et al (2004), um exemplo é a construção de uma barragem e a formação do reservatório, o que implica modificações nas condições naturais do curso da água. As barragens por sua vez, geram uma redução na velocidade da corrente e, conseqüentemente, na capacidade de transporte de sedimentos pelo rio, favorecendo sua deposição nos reservatórios que, aos poucos, vão perdendo a capacidade

de armazenar água. Portanto, o conhecimento da vida útil de um reservatório dependerá do fluxo de sedimentos no curso de água.

As propriedades de qualidade da água são monitoradas por estudos *in situ* e alguns parâmetros, como matéria orgânica dissolvida, sedimentos em suspensão e clorofila, podem ser estudados por sensoriamento remoto. Segundo Valério (2009), a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto pode auxiliar na superação da limitação espaço-temporal dos métodos tradicionais *in situ*, pois adquire informações necessárias em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo a análise estrutural dos ecossistemas aquáticos.

É nesse contexto que a tecnologia de sensoriamento remoto se insere como fonte de informação a ser integrada às redes hidrológicas convencionais. Embora a tecnologia de sensoriamento remoto esteja disponível e seja amplamente utilizada em vários campos do conhecimento, como é o caso da gestão da produção agrícola, previsão meteorológica, sistemas de alerta de fogo e de desflorestamento, seu uso pela comunidade gestora de recursos hídricos é ainda insipiente (NOVO, 2007).

Os corpos de água representam uma mistura complexa de diversos materiais dissolvidos e particulados que possuem propriedades ópticas características. Esses materiais interagem com a luz solar de forma diferenciada devido as suas concentrações e naturezas, modificando a cor da água, pois eles absorvem e/ou espalham seletivamente a luz incidente (KAMPEL e NOVO, 2005).

Os primeiros estudos realizados no mundo (MERTES *et al.*, 1993) e no Brasil (NOVO *et al.*, 1989), demonstraram a possibilidade de relacionar, por sensoriamento remoto, a cor das águas continentais ao seu conteúdo em sedimentos. Verificou-se nesses estudos que as propriedades ópticas das águas são fortemente influenciadas pelo conteúdo e tipo de sedimento.

No Brasil, trabalhos utilizando esta técnica aplicada a corpos de água continentais, tem sido desenvolvidos demonstrando grande potencial para mapear a composição das águas (NOBREGA, 2002; RUDORFF, 2006; BARBOSA, 2007). Contudo, esses trabalhos não foram sistematizados em redes de monitoramento hidrológicos. Isso deve-se a falta de sensores espaciais adequados, os quais permitiriam um monitoramento preciso em termos de resolução temporal (número de imagens disponíveis por unidade de tempo) e/ou espacial (tamanho dos rios que poderiam ser estudados) para propiciar uma relevante rede de monitoramento.

Estudos realizados por Carvalho (2001) e Macedo (2009) nas bacias de contribuição do reservatório de Três Marias, na região do alto São Francisco, revelam elevados índices de

carga de sedimentos. Entre estas, a bacia do rio Indaiá é a que apresenta um alto grau de degradação, sendo um dos rios que contribui com uma grande carga de sedimentos para o reservatório. Dessa forma, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto em reservatórios poderia ajudar na compreensão dos processos que envolvem transporte e deposição de sedimentos no reservatório de Três Marias.

Esse trabalho de mestrado encontra-se inserido na linha de pesquisa e estudos sobre monitoramento de reservatórios do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília - UnB. Coloca-se no âmbito do objetivo específico da chamada pública CT-ENERG: “redução de perdas, aumento de eficiência e redução de custos de operação e de manutenção”. O projeto geral tem como objetivo estabelecer uma metodologia que permita a análise espaço-temporal dos processos erosivos, transporte e deposição dos sedimentos que atingem os reservatórios, mediante integração de ferramentas geofísicas, geoquímicas e de sensoriamento remoto.

Assim, esse trabalho foi focado em monitorar o fluxo de entrada de sedimentos no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias-MG, com base em dados das imagens de satélites e medições em campo. Pretende-se investigar o uso de imagens de satélite para monitorar parâmetros de qualidade da água, em particular, os sedimentos em suspensão.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

- Monitorar o fluxo de entrada de sedimentos e a sua distribuição espacial e temporal, no braço do reservatório Três Marias – MG, correspondente a foz do rio Indaiá, a partir de imagens do satélite MODIS.

2.2. Específicos

- Caracterizar as propriedades ópticas das águas do reservatório de Três Marias, a partir de medições radiométricas *in situ* e avaliar a relação entre a refletância de sensoriamento remoto e a concentração de sedimentos em suspensão;
- Relacionar dados da estação de monitoramento hidrossedimentométrico *in situ* com as estimativas de concentração de sedimentos em suspensão obtidas a partir do sensor MODIS;
- Caracterizar a distribuição espaço-temporal de concentração de sedimentos a partir das análises das séries temporais de refletância no braço do rio Indaiá;
- Detectar tendências (intra e interanual) nas séries temporais de fluxo de sedimentos geradas a partir de dados dos satélites.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Histórico

A Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (CEMIG), criada em 22 de maio de 1952, teve como principal objetivo realizar um plano global de eletrificação para o Estado de Minas Gerais, o que atendesse ao parque industrial mineiro em fase de expansão, substituindo as usinas isoladas existentes por um sistema integrado eficiente que pudesse atender a demanda de energia das cidades de entorno. Entre 1957 e 1961, por conta de um contrato firmado com a Comissão do Vale do São Francisco - CVSF, a CEMIG construiu a usina de Três Marias, visando a produção de energia elétrica, o amortecimento de enchentes e a melhoria da navegabilidade do rio São Francisco.

A UHE Três Marias iniciou sua operação em 1962, fazendo parte do Sistema Interligado Nacional. Tem uma capacidade de geração de 396,00 MW, com um reservatório de 15 bilhões m³ de volume útil, e fornece energia a importantes cidades mineiras, dentre elas, a capital Belo Horizonte. A bacia de contribuição da usina apresenta uma área de drenagem de cerca de 50.000 km², tendo como principais tributários os rios Abaeté, Borrachudo, Indaiá, Pará e Paraopeba (ONS, 2012).

3.2. Caracterização da área de estudo

O reservatório de Três Marias localiza-se na região do alto São Francisco, no estado de Minas Gerais, entre os paralelos 18° e 21° sul e os meridianos 43°30' e 46°40' oeste. A área drenada estende-se desde as cabeceiras na Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, até a cidade de Pirapora (MG), abrangendo as sub-bacias dos rios das Velhas, Pará e Indaiá, além das sub-bacias dos rios Abaeté e Jequitibá.

São encontradas na região duas tipologias climáticas, de acordo com a classificação de Köppen:

Cwa - clima temperado brando com verão quente (temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C) e inverno brando (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C); a estação seca coincide com o inverno.

Aw - clima tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média do mês mais frio é sempre superior a 18 °C.

A região apresenta altas taxas pluviométricas, com valores que podem variar entre 1.150 e 1.450 mm anuais. O regime pluviométrico é típico das regiões de clima tropical, com a ocorrência dos valores mensais máximos no período do verão e dos mínimos no inverno. Os

meses de novembro, dezembro e janeiro correspondem aos meses mais chuvosos com cerca de 55 a 60% do total anual precipitado. Junho, julho e agosto são os meses mais secos com menos de 5% de precipitação anual (MACEDO, 2009).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) divide a bacia do rio São Francisco em nove sub-bacias. A região corresponde à sub-bacia 40. Esta sub-bacia representa a área de drenagem do reservatório de Três Marias e parte da área de drenagem do alto São Francisco (sub-bacias 40 e 41).

Os principais afluentes que contribuem diretamente para o reservatório são: na margem esquerda, os rios Borrachudo e Indaiá. E na margem direita, os rios Pará, Paraopeba e São Francisco (curso principal).

Esse estudo foi focado no encontro do rio Indaiá com o reservatório, denominado braço do rio Indaiá (Figura 1). O rio Indaiá nasce na cota altimétrica de 1.170m, próximo à comunidade de Cachoeirinha, no município de Córrego Danta-MG. Em seu percurso de 226 km, sua bacia hidrográfica é da ordem de 3.340 km², cruza a BR-262, indo desaguar no reservatório de Três Marias (OLIVEIRA, 2007).

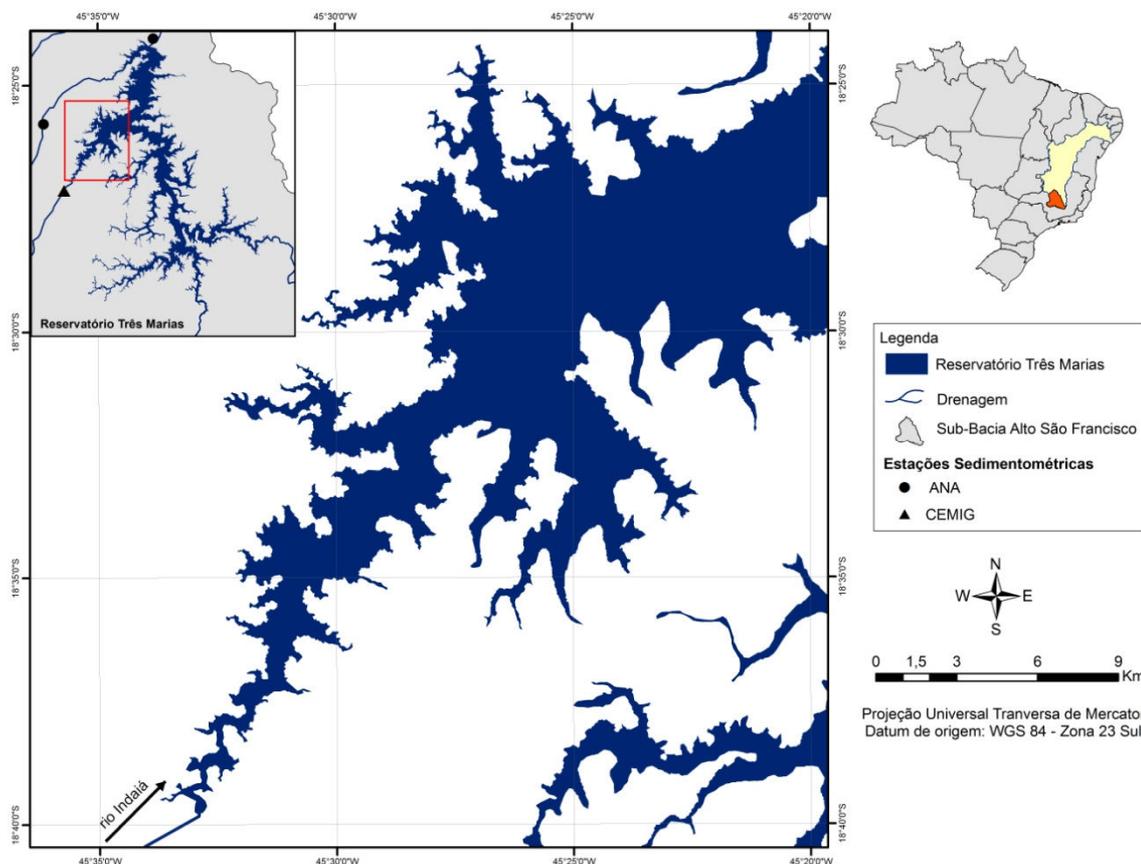


Figura 1. Localização do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Processos de transporte de sedimentos

O transporte de sedimentos é um fenômeno natural e faz parte da evolução da paisagem, originando várias formas geomorfológicas, pois, desde seus primórdios, a Terra tem sido modelada, entre outros fatores, pelos processos de erosão natural e deposição de sedimentos (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Os processos de produção e deposição de sedimentos ao longo de uma bacia têm seus efeitos potencializados pela influência do homem, por meio de desmatamentos, construções, mineração e atividades agrícolas desordenadas (SIVIERO e COIADO, 1999). A deposição de sedimentos numa bacia hidrográfica podem trazer muitos problemas, pois o sedimento quando é transportado para os corpos de água modifica a qualidade das águas superficiais, além de servir como veículo à outros poluentes (PAIVA, 2003).

A produção de sedimento refere-se à quantidade de sedimento que uma bacia exporta em um determinado período de tempo. Ela pode ser expressa em termos absolutos (t/ano) ou em termos específicos, ou seja, sua relação com a área drenada (t/km² ano). Esta última é denominada de produção de sedimento específica ou taxa de produção de sedimento. A produção de sedimento pode ser calculada para toda a bacia hidrográfica, para a área de influência de um reservatório ou de uma seção transversal do rio, como por exemplo, uma estação sedimentométrica (MORRIS e FAN, 1997). Normalmente, a produção de sedimento de uma bacia é calculada a partir de programas de monitoramento da descarga sólida nos rios (SHEN e JULIEN, 1992; CARVALHO, 1994), ou por meio da medição do volume de sedimentos acumulado em reservatórios e lagos (CHEPAR, 1999).

Os sedimentos exercem grande influência nos parâmetros de qualidade das águas, pois, ao serem transportados para os cursos de água, carregam consigo outros elementos que, dependendo da situação do rio, podem ser benéficos (nutrientes, material orgânico, etc.) ou maléficos (metais pesados, etc.) ao meio ambiente e aos seus usuários (CARVALHO *et al.*, 2000). Muitos estudos tem enfatizado a relação da qualidade dos sedimentos com a qualidade de um corpo hídrico, uma vez que a coluna sedimentar tem a capacidade de acumular e/ou liberar contaminantes (GRANBERG e SELCK, 2007).

Carvalho (2001) afirma que o transporte e deposição de sedimentos nos rios e reservatórios têm causado vários danos ambientais e econômicos, inclusive a diminuição da vida útil de aproveitamentos dos recursos hídricos. Em função dessas características, a avaliação dos sedimentos tem se destacado em estudos que visam avaliar a qualidade dos

ecossistemas aquáticos. Exemplos de reservatórios totalmente ou parcialmente assoreados são encontrados em diferentes regiões, como é o caso das bacias do Tocantins, Atlântico, São Francisco, Paraná e do Uruguai.

Partindo dessas premissas, surge a necessidade do uso de novas técnicas que visam conhecer o comportamento dos sedimentos e possibilitar, assim, a avaliação da qualidade dos rios e reservatórios.

4.2. Sensoriamento remoto da cor da água

Os trabalhos em sensoriamento remoto que estudam a cor da água em imagens de satélite estão focados em aplicações como estimar matéria orgânica, clorofila e sedimentos em suspensão. Poucos trabalhos são voltados a aplicações usando o sensoriamento remoto em sistemas aquáticos continentais. Segundo Meneses e Madeira Netto (2001), isso deve-se a uma razão tecnológica, haja vista que os sistemas sensores ópticos utilizados são afetados pelos problemas de coberturas de nuvens, dificultando a análise periódica dos corpos de água. Devido a essas restrições, as aplicações que precisam de alta frequência de dados não se tornaram operacionais.

As variações da cor da água em imagens de satélite são complexas em relação a outros alvos naturais. Segundo Novo (2001) existem algumas razões que dificultam a interpretação das imagens nos corpos de água, tais como: a região espectral de maior penetração da luz na água fica apenas entre 400 e 700 nm; os componentes opticamente ativos da água apresentam espectros de absorção semelhantes, tornando difícil a discriminação; e a reflectância da água é muito baixa em torno de 4%, isso faz com que os sensores disponíveis sejam muitas vezes insensíveis às mudanças de cores.

A luz solar incidente penetra na superfície da água e, em função das interferências com elementos presentes na coluna da água e da própria água, sofre um conjunto de efeitos (absorção e espalhamento). Moore (1978) afirma que para o monitoramento da qualidade da água à partir de imagens de satélites alguns parâmetros devem ser considerados: 1) ângulo zenital solar e ângulo de visada do sensor a bordo do satélite; 2) interferência da atmosfera (aerossóis, vapor da água e moléculas); 3) reflectância da radiação solar na superfície da água, como *sun glint*; 4) elementos presentes na superfície como espumas ou vegetação flutuando que podem alterar a reflectância registrada pelo sensor; e 5) águas turvas os quais podem aumentar a energia do retroespalhamento ocasionada pela concentração, tamanho e forma das partículas suspensas.

4.3. Resposta espectral dos componentes opticamente ativos

A Figura 2 mostra as variações espectrais do coeficiente de absorção e de espalhamento da água. A absorção da luz pela água pura é mínima na região compreendida entre 400 e 500 nm, passando a ser significativa a partir de 550 nm e aumentando rapidamente no infravermelho. O espalhamento da luz pelas águas, ao contrário da absorção, é máximo na região do azul e decresce exponencialmente em direção ao infravermelho, porém apresentando valores muito baixos (DEKKER, 1993). Essas propriedades contribuem para o alto coeficiente de atenuação e para o baixo sinal de reflectância das massas de água (WOODRUFF *et al.*, 1999). Como mencionado anteriormente, esse comportamento do meio aquático limita os estudos de sensoriamento remoto na região entre 400 e 900 nm (KIRK, 1994).

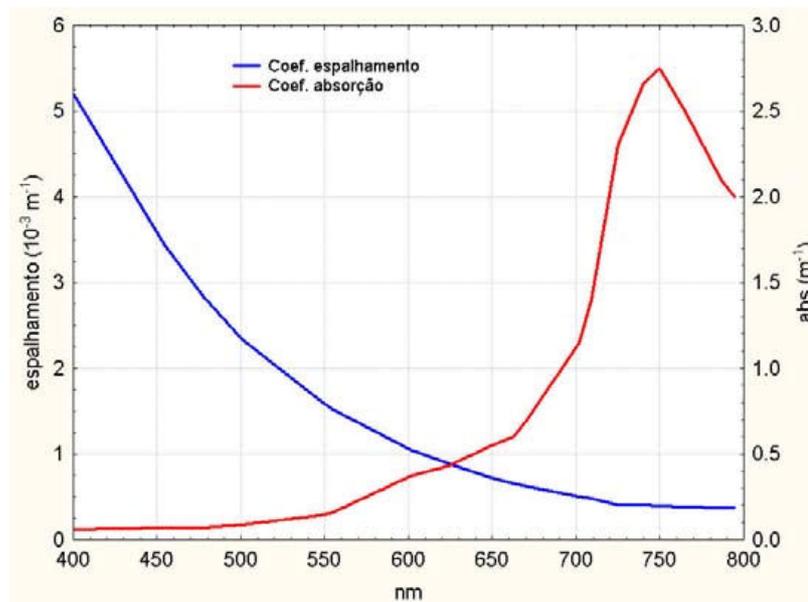


Figura 2. Coeficiente de absorção e espalhamento da água pura em função do comprimento de onda. Modificado (DEKKER, 1993).

Segundo Novo (2008), os constituintes que afetam o comportamento espectral da água são chamados de componentes opticamente ativos e podem ser formados por: 1) organismos vivos (fitoplâncton e zooplâncton); 2) partículas em suspensão (orgânicas e inorgânicas) e; 3) substâncias orgânicas dissolvidas.

As partículas inorgânicas em suspensão estão associadas a minerais provenientes de rochas e solos, que são carregados para os corpos de água. Essas partículas também chamadas de sedimentos em suspensão ocasionam o efeito de espalhamento da luz na superfície da água

(RUDORFF, 2006). Muitos pesquisadores demonstraram a forte relação existente entre a concentração de sedimentos e a resposta espectral das imagens de satélite (NOVO *et al.*, 1989; CHEN *et al.*, 1992; e MARTINEZ, *et al.*, 2009). Essa relação tem sido aplicada em sensoriamento remoto para estimar a distribuição dos sedimentos em suspensão sobre águas continentais.

A concentração das substâncias orgânicas dissolvidas presentes nos corpos de água é função da atividade fotossintética do fitoplâncton (autóctone) ou de materiais terrestres (alóctone). A transformação do fitoplâncton em matéria orgânica dissolvida é consequência da fotólise, hidrólise e da decomposição bacterianas das estruturas celulares fitoplanctônicas (BUKATA *et al.*, 1995). Esse componente quando presente na água, causa absorção da energia incidente na região do espectro entre 400 e 700 nm. No vermelho, a absorção é pequena, aumentando exponencialmente em direção aos comprimentos de onda mais curtos (ALCÂNTARA, 2009).

Tanto medidas de campo quanto experimentos de laboratório, tem demonstrado que há um aumento do coeficiente de espalhamento da água com o aumento da concentração de partículas sólidas em suspensão na água (partículas orgânicas e inorgânicas) (LILLESAND e KIEFER, 1987). A Figura 3 indica o aumento da reflectância (analisada em laboratório), quando se tem a maior quantidade de partículas em suspensão, há um deslocamento da reflectância da água em direção aos comprimentos de onda maiores.

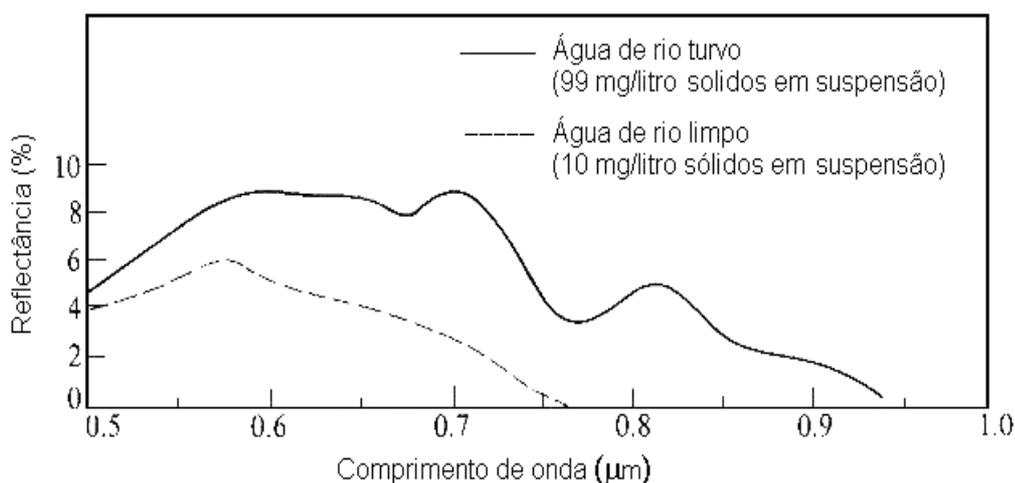


Figura 3. Comportamento espectral da água em diferentes concentrações de sólidos em suspensão. Modificado de Lillesand e Kiefer (1987).

4.4. Imagem de satélite

Na última década tornou-se cada vez mais comum a utilização de imagens de satélite que apresentam resolução moderada nos estudos hidrológicos. O aumento da utilização de imagens orbitais é consequência do baixo custo de seus produtos bem como da qualidade das suas informações (ROSENDO, 2005).

O sensor MODIS, principal instrumento a bordo das plataformas Terra e Aqua, foi projetado para fornecer uma série de observações globais da superfície terrestre, oceano e atmosfera nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético, com resolução temporal diária. O instrumento MODIS possui uma resolução radiométrica de 12 bits, em 36 bandas espectrais contidas no intervalo de 0,4 a 14,4 μm do espectro eletromagnético. Duas bandas são adquiridas na resolução de 250 m, outras cinco bandas na resolução de 500 m e as demais 29 bandas em 1 km (RUDORFF *et al.*, 2007).

Como nos demais instrumentos a bordos dos satélites Terra e Aqua, os dados MODIS são transferidos para estações terrestres em *White Sands*, Novo México, através de um sistema denominado *Tracking and Data Relay Satellite System* (TDRSS). Estes são então enviados para os dados de pesquisa EOS e os sistemas de operações (EDOS) no *Goddard Space Flight Center*. Neste centro começam os processamentos dos dados propriamente dito. São divididos em cinco níveis (0 a 4), que irão variar em função do grau de processamento realizado. Vale ressaltar que, após o processamento do nível zero pelo sistema operacional, o centro de arquivos denominado *Goddard Space Flight Center Earth Sciences Distributed Active Archive Center* (GES DAAC) irá produzir os níveis 1A e 1B e os produtos de geolocalização. Os produtos de níveis mais elevados são, inicialmente, produzidos pelo Sistema de Processamento Adaptativo do sensor MODIS (*MODIS Adaptive Processing System - MODAPS*), e então distribuídos entre três outros centros de DAACs (JUSTICE *et al.*, 2002a). Resumindo, todos os produtos MODIS são gerados, segundo Justice *et al.* (2002b) em um determinado nível hierárquico, que são:

Nível 0 – este nível retrata a imagem em seu estado bruto, sem tratamento de espécie alguma. Não é disponível ao usuário, não constando, portanto, das listas de produtos padrões do sensor MODIS.

Nível 1 (1A): contém uma base de dados de 36 canais do MODIS sendo, utilizado como dado de entrada para geolocalização, calibração e processamento. Indicadores de qualidade são adicionados aos dados para indicar a perda ou *pixels* ruins. Medidas no visível, infravermelho próximo e médio são feitas apenas durante o dia, enquanto que as medidas na faixa do infravermelho termal são feitas tanto de dia, quanto de noite.

Nível 1 (1B): os produtos contêm os dados de calibração e geolocalização para as 36 bandas geradas pelo nível 1 A. As radiâncias são em $W/(m^2.\mu m.sr)$. Em adição, o BRDF (reflectância bidirecional) pode ser determinado para bandas reflectivas solares (1-19, 26) através do conhecimento da irradiação solar (por exemplo, determinação de dados MODIS e a geometria de iluminação do alvo). Dados adicionais são fornecidos, incluindo as estimativas de qualidade, de erro e dados de calibração.

Nível 2: os produtos deste nível são derivados de radiâncias calibradas de prévios produtos MODIS. Os produtos conhecidos como nível 2G (L2G) são gerados a partir de um conjunto de dados de um simples dia do nível 2, reorganizados e armazenados em uma grade baseada na Terra (*earth-based grid*), preservando todas as amostras dos dados originais do nível 2. Cabe salientar que, a menor quantidade de dados processados em um determinado período é definida nos níveis 1 e 2 como granular (*granule*) e correspondem à aproximadamente 5 min. de imageamento. O MODIS imagea 288 “grânulos” a cada 24 h, sendo sua cobertura equivalente a uma área aproximada de 2340 Km (*acrosstrack*) por 2030 Km (*along-track*).

Nível 3: neste nível os produtos são espacialmente reamostrados e temporalmente compostos para produzir uma simples estimativa das variáveis geofísicas para cada grade de localização. As escalas de tempo dos produtos destes níveis variam de um simples dia para um ano inteiro.

Nível 4: os produtos deste nível são gerados pela incorporação dos dados MODIS em modelos para se estimar as variáveis geofísicas.

5. MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 4 apresenta o fluxograma dos métodos utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

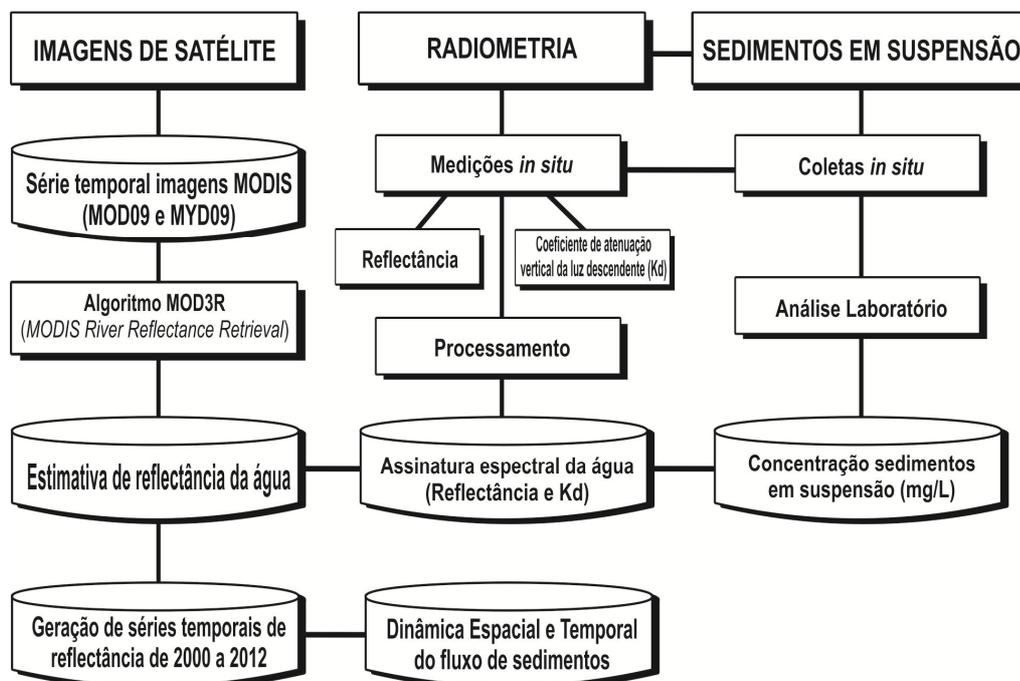


Figura 4. Fluxograma da metodologia desenvolvida.

Foram utilizados nesse estudo bases de dados distintas, coletados *in situ* e derivados de imagens de satélite. Os dados *in situ* utilizados foram: dados de descarga sólida (sedimentos em suspensão e vazão total) da estação do rio Indaiá monitorada pela CEMIG; medições com radiômetros (reflectância e K_d); e coletas de água para determinar a concentração de sedimentos em suspensão em cada ponto amostrado. As imagens utilizadas são do sensor MODIS, produtos de reflectância da superfície MOD09 e MYD09 dos satélites TERRA e AQUA respectivamente. Os itens apresentados acima estão descritos no decorrer do texto.

5.1. Hidrossedimentologia

A CEMIG opera estações fluviossedimentométricas com o objetivo de monitorar o aporte de sedimentos nos reservatórios, visando quantificar e caracterizar os sedimentos trazidos pelos rios ao reservatório de Três Marias.

Este monitoramento conta atualmente com estações localizadas em diferentes bacias hidrográficas que operam em regime detalhado de coleta de amostras e medições de descargas sólidas. Para a medição do transporte de sedimentos nas estações de monitoramento, a

CEMIG utiliza técnicas de amostragem que permitem, a partir de sua análise, o cálculo do volume transportado. Para isso, são feitas coletas ao longo do ano, de forma mais concentrada na estação chuvosa, uma vez que os maiores volumes de sedimentos são transportados pelas maiores vazões.

As amostras coletadas são encaminhadas ao Laboratório Sedimentológico da CEMIG em Belo Horizonte. Os estudos realizados caracterizam o sedimento quanto à granulometria e concentração. As informações obtidas subsidiam estudos hidrossedimentológicos que avaliam a vida útil dos reservatórios, os impactos nas comunidades ribeirinhas e nas vidas aquáticas, os locais com maior deposição de sedimentos, além de orientar as ações dos Comitês de Bacias Hidrográficas quanto à degradação da bacia.

Para compreensão da variabilidade do ciclo hidrossedimentológico, foram utilizados nesse estudo dados de descarga sólida (sedimentos em suspensão e vazão total) de junho de 1999 a dezembro de 2002 da estação de monitoramento do rio Indaiá, localizada a 10 km do encontro do rio com o reservatório, próximo a cidade de Biquinhas-MG.

5.2. Imagens MODIS

Nesse estudo foram adquiridas imagens do sensor MODIS, produtos de reflectância da superfície (Nível 3) MOD09 e MYD09 (a bordo dos satélites TERRA e AQUA), que são fornecidas previamente calibradas, georreferenciadas e corrigidas dos efeitos atmosféricos. No trabalho, são utilizadas imagens de dois tipos A1 e Q1, com resolução espacial de 500 e 250 metros, respectivamente.

As imagens de 500 metros (A1) são utilizadas apenas para as informações sobre a qualidade de processamento (pixel a pixel), enquanto as imagens de 250 metros (Q1) são utilizadas para analisar as duas bandas radiométricas cobrindo as regiões do vermelho e infravermelho. O sensor MODIS oferece cobertura em tempo de aquisição diária sobre as áreas tropicais.

As imagens utilizadas são composições de 8 dias, pois: i) isto reduz a quantidade de imagens com nuvens e, conseqüentemente, a quantidade de dados a serem analisados; e ii) reduz significativamente os efeitos da direção da reflectância BRDF (reflectância bidirecional) e da atmosfera. Os produtos de reflectância foram adquiridos a partir da base de dados específica GETMODIS (projeto HYBAM) de fevereiro de 2000 até junho de 2012, representando um total de 1024 imagens. A Figura 5 mostra as imagens selecionadas da área de estudo. A região escura no centro da imagem é referente ao reservatório, as regiões

avermelhadas representam a vegetação (cerrado, mata ciliar e reflorestamento) e as regiões claras, solo exposto.

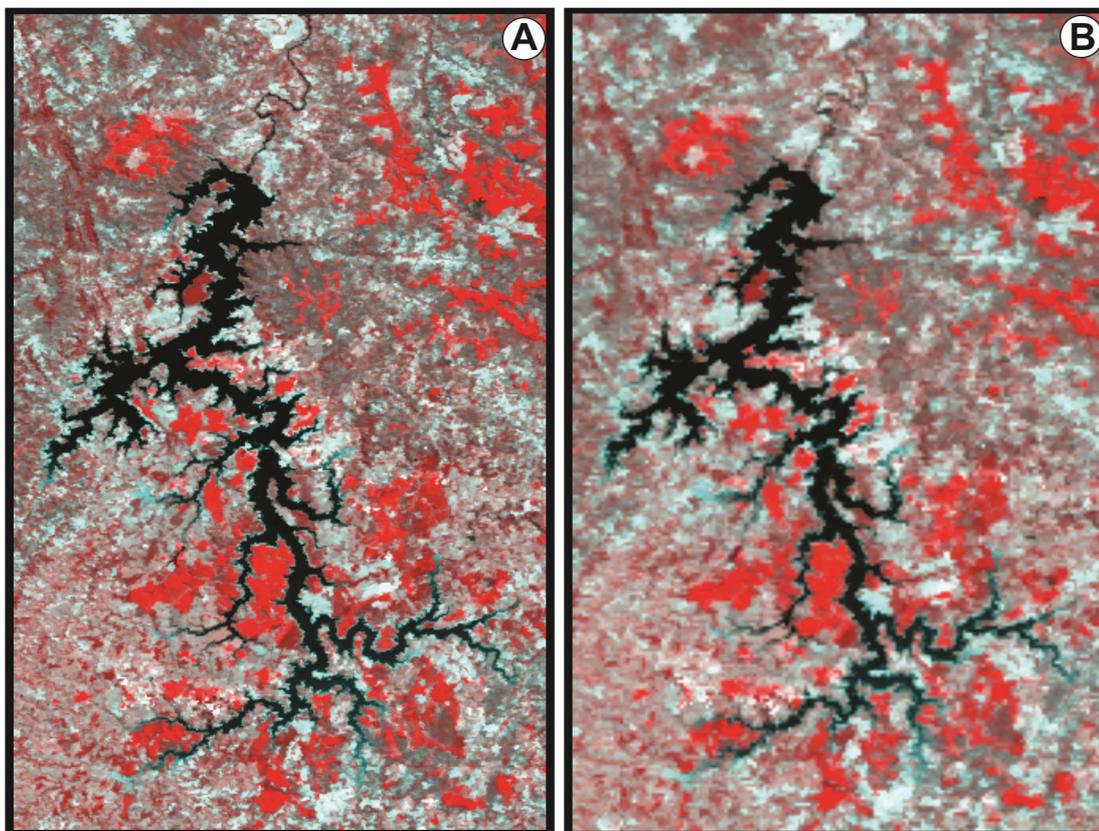


Figura 5. Imagens MODIS (produto de reflectância da superfície) do satélite Terra. (A) - Resolução espacial de 250 metros / (B) - Resolução espacial de 500 metros.

5.3. Análise das imagens de satélite

Para calcular a reflectância da água no braço do reservatório em uma grande quantidade de imagens, é necessária a automatização do processo. Para isso, foi utilizado o algoritmo MOD3R (*MODIS River Reflectance Retrieval*), desenvolvido pelo *Institut de recherche pour le développement* (IRD).

O MOD3R é um programa de processamento de imagens desenvolvido em linguagem JAVA para a extração da reflectância da água dos corpos hídricos em séries temporais de imagens MODIS. O algoritmo determina com precisão e consistência os pixels de água pura na imagem ao longo do tempo, independentemente dos tipos de morfologia dos rios ou reservatórios. Com a extração dos valores de reflectância das bandas do vermelho e do infravermelho das imagens MODIS, é possível determinar as concentrações dos sedimentos em suspensão e fitoplâncton presentes na água.

O programa apresenta uma interface simples para seleção da série temporal de imagens e escolha dos parâmetros necessários para os cálculos. São gerados arquivos de saída com

resumos das imagens processadas. O resultado para cada imagem é acompanhado por um indicador de qualidade codificado entre um e três.

A análise para obtenção da reflectância da água no braço do reservatório foi dificultada devido à resolução espacial do sensor MODIS. Alguns trechos são estreitos e podem resultar em pixels misturados de água pura ou não. A mistura espectral ocorre quando diferentes materiais estão presentes em um mesmo pixel. Neste contexto, a mistura espectral na água pode ocorrer com alvos de vegetação ciliar ou bancos de areia e da hidrologia (nível do reservatório).

Para obter estimativas de fluxo de sedimentos ao longo do braço do Indaiá, foram criadas máscaras nas áreas de interesse. Como não existe uma metodologia específica para essas análises, foram primeiramente determinadas regiões que recobriam todo braço; porém, os resultados dos testes apresentaram muitas variações, sendo necessário subdividir e estimar regiões menores e homogêneas. A Figura 6 mostra as máscaras criadas.

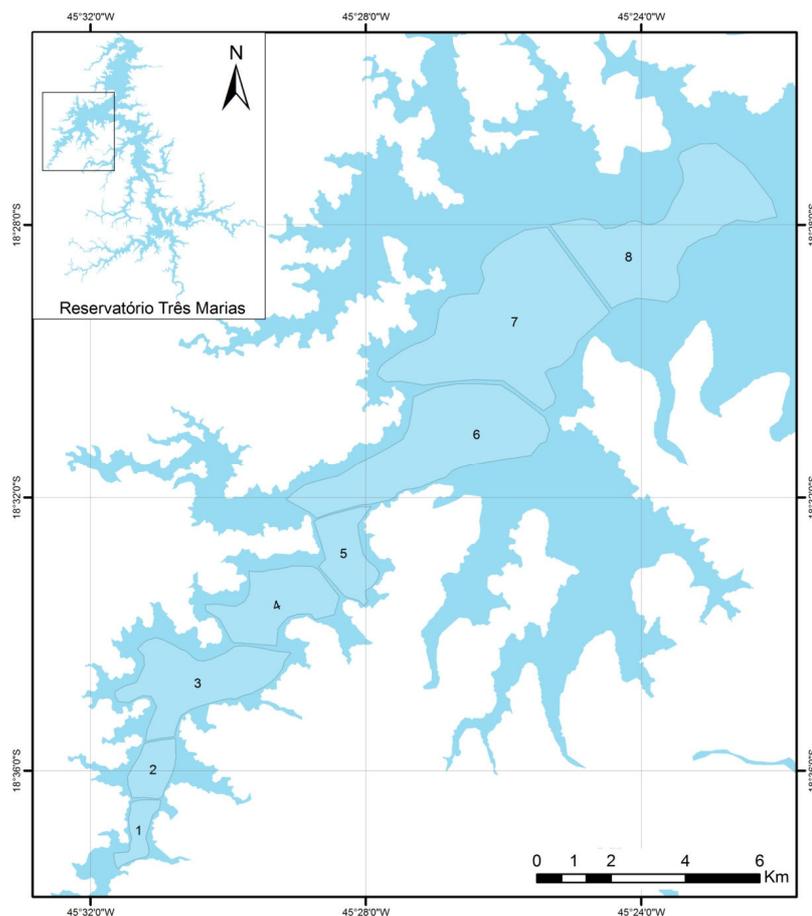


Figura 6. Máscaras criadas para análise da reflectância da água no braço do rio Indaiá no reservatório Três Marias.

A metodologia para a extração da reflectância do *endmember* da água usando o MOD3R é apresentada a seguir:

- Os dados de entrada são: a série de imagens da área de interesse e a máscara da região que será estimada;
- O primeiro passo é a extração dos pixels da máscara, excluindo os pixels de qualidade ruim (coberto por nuvens) usando as informações fornecidas nas imagens de 500 metros;
- Os valores de reflectância dos pixels são estimados e classificados em grupos homogêneos (*clusters*), através da metodologia estatística de *K-means*;
- O programa estima o *endmember* de vegetação de maneira automatizada (*cluster* com maior diferença positiva entre o canal do vermelho e Infravermelho);
- Cada *cluster* é testado como o potencial *endmember* de água, e o grupo que produz o menor erro residual é selecionado, solucionando o modelo linear de mistura espectral.

Esse procedimento é centrado na determinação automática do *endmember* de água por testes sucessivos de um grupo de pixels em cada modelo linear de mistura, para encontrar o grupo que melhor descreve outros grupos de pixels misturados na água do rio.

Os valores de estimativas da reflectância na água são classificados por alguns critérios de qualidades, como ângulo de incidência solar, ângulo de visada do satélite, presença de aerossóis e presença ou ausência de nuvens (banda de qualidade A1 MODIS). Para cada máscara criada, uma tabela em Excel é registrada com valores de reflectância nas bandas do vermelho e infravermelho. Os valores das imagens de ambos os satélites (Terra e Aqua) foram fusionadas selecionando as de melhor qualidade, com fim de obter uma série temporal com o maior número de dados possíveis.

5.4. Amostragem de campo

Para calibrar as imagens de satélites foram realizadas campanhas de amostragem de campo (radiometria e sedimentos em suspensão) no braço do rio Indaiá seguindo o sentido montante-jusante e uma medição na estação hidrossedimentométrica no rio Indaiá nos dias 23, 24, 25 e 26 de março de 2012. Foram amostrados 26 pontos (Figura 7) entre os horários de 10h00 e 16h00. Os itens a seguir descrevem os procedimentos utilizados nos trabalhos de campo.

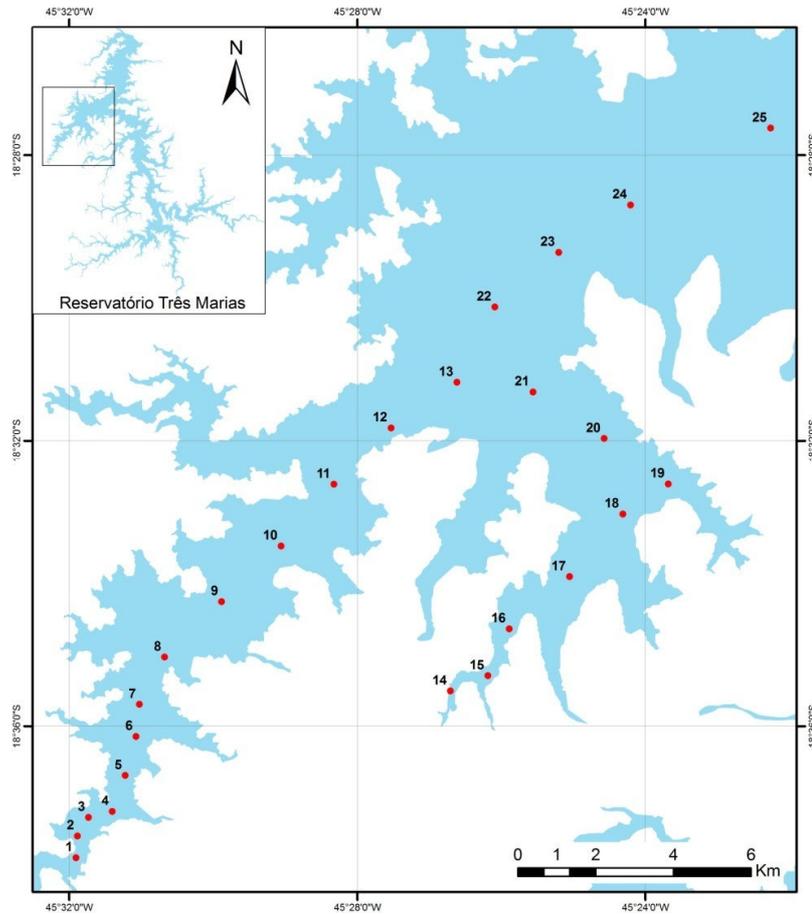


Figura 7. Localização dos pontos de amostragem radiométrica.

5.4.1. Radiometria

As medições radiométricas foram realizadas com os radiômetros TriOS-RAMSES (www.trios.de) que operam na faixa espectral do ultra violeta, visível e o infravermelho próximo (320-950 nanômetros). Com o objetivo de comparar com os dados de satélite, foram realizadas amostragens com os radiômetros TriOS, usando dois parâmetros de medições: reflectância da superfície e coeficiente de atenuação vertical da luz descendente (K_d) (Figura 8).

Para as medições da reflectância foram usados três aparelhos, colocados fora da água, posicionados em uma determinada geometria, com dois medidores de radiância (Figura 8a), um deles a 35° off nadir e outro a 35° com o zênite, e um sensor de irradiância (Figura 8a) colocado verticalmente. O sensor a 35° off nadir amostra a radiância da água diretamente (L_u), mas dependendo da rugosidade de superfície do lago ele também mede uma pequena porção da luz do céu que é refletida pela água. O sensor a 35° com o zênite mede a radiância proveniente do céu que seria refletida pela água (L_d), e o sensor colocado verticalmente mede a irradiância que chega sobre o local (E_d).

Equação 1 para o cálculo de reflectância de sensoriamento remoto:

$$Reflectância = \frac{Lu - Ld * f}{Ed} \text{ sr - esteroradiano}^{-1} \quad (1)$$

Onde:

f - fator que depende da rugosidade de superfície (o valor de 0,028 é usado para condições vento fraco - < 5 m.s-1- como sugere Mobley (1999)).

Ed - Irradiância descendente

Lu - Radiância subindo

Ld - Radiância descendo

Para as medições do coeficiente de atenuação difuso vertical da luz descendente (K_d) é usado o sensor de irradiância (RAMSES-ACC-VIS) submerso na água. Este aparelho possui um sensor de profundidade, cujos dados serão usados para cálculos posteriores. Para medição do K_d o sensor é colocado para cima, as medições são escalonadas em diferentes profundidades. A equação do K_d é apresentada abaixo (Equação 2).

$$K_d(\lambda) = \frac{1}{Z_1 - Z_2} * Ln \frac{Ed(\lambda)_{Z_1}}{Ed(\lambda)_{Z_2}} \quad (m^{-1}) \quad (2)$$

Onde:

Z_1 e Z_2 são as profundidades;

$Ed(\lambda)_{Z_1}$ e $Ed(\lambda)_{Z_2}$ são as medições de irradiância;

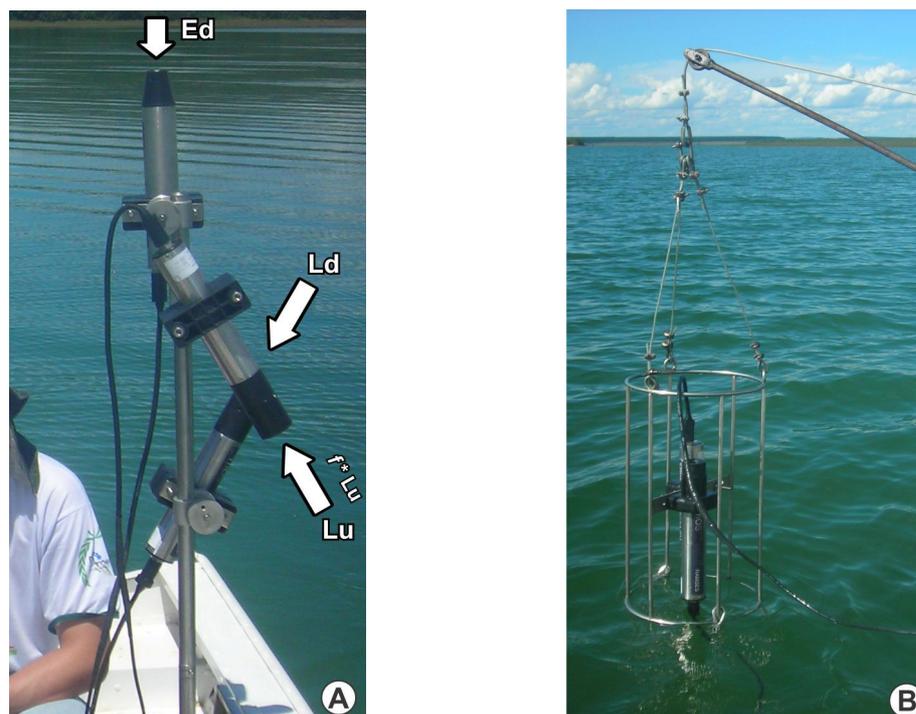


Figura 8. Medições radiométricas (A) Reflectância; (B) Coeficiente de atenuação vertical da luz descendente (K_d).

5.4.2. Sedimentos em suspensão

Em conjunto com as medições radiométricas, foram coletadas amostras de água em garrafas plásticas de 1 litro. Para cada ponto de amostragem foram coletadas 2 garrafas em diferentes profundidades (superfície e 2 metros). Todas as amostras foram devidamente identificadas e armazenadas para análise posterior no laboratório de Geoquímica do departamento de Geociências da UnB.

Para determinar a concentração de sedimentos em suspensão foram utilizadas membranas de malha 0,45 μm e filtradores de 250ml, ligados a um sistema de bomba a vácuo. Inicialmente, as membranas foram aquecidas a uma temperatura de 100°C durante 15 minutos, e posteriormente resfriadas em dissecadores. Ao atingirem a temperatura ambiente, as membranas foram pesadas para a determinação dos pesos iniciais (P_i). Em seguida, foram determinadas os volumes das amostras (vol), com as utilização de provetas graduadas, e realizada a filtragem das mesmas, observando sempre para não deixar sedimento nem na garrafa da amostra e nem na proveta. Após a filtragem as membranas foram novamente aquecidas a 100°C por 1 hora, resfriadas a temperatura ambiente e pesadas para determinação do peso final (P_f).

A concentração do material em suspensão foi obtida utilizando-se unidades de miligramas (mg) para os pesos iniciais e finais, e litros (L) para o volume da mistura água-sedimento, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Concentração (mg/L)} = \frac{Pf (mg) - Pi (mg)}{\text{Volume (L)}} \quad (3)$$

6. ANÁLISE DOS DADOS

6.1. Hidrossedimentologia

A primeira abordagem do estudo hidrossedimentológico é entender a variabilidade sazonal do comportamento da vazão sólida diária no rio Indaiá. Após a análise da consistência dos dados, foi traçado um gráfico que relaciona valores de descarga sólida diária da estação de monitoramento operada pela CEMIG no rio Indaiá (Figura 9). Os dados de descarga sólida apresentam uma variação regular e definida, com altos valores de descarga nos meses de novembro, dezembro e janeiro, com máximas de 321.000 (t/dia), e mínimas de 4,28 (t/dia) nos meses de junho, julho e agosto. Infelizmente, não tivemos acesso aos dados de vazão sólida em um período mais recente, o que limitou o uso desses dados de campo no trabalho de dissertação.

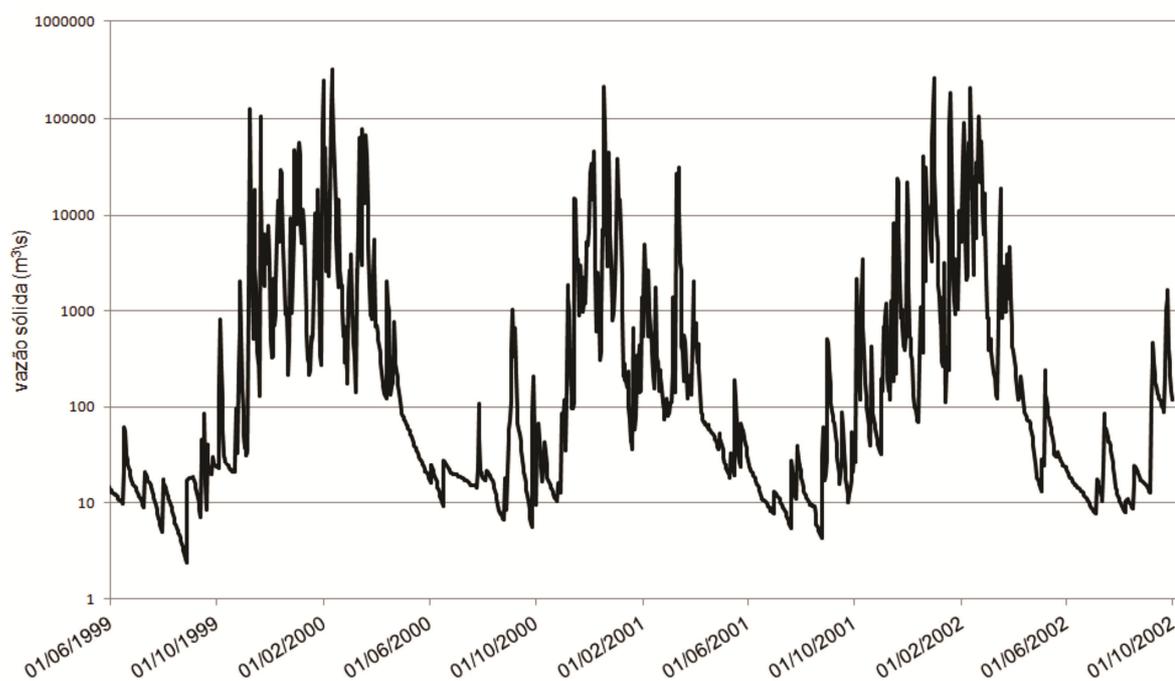


Figura 9. Fluxo de vazão sólida diária na estação do rio Indaiá. Fonte CEMIG.

6.2. Volume da água no reservatório

O reservatório de Três Marias foi criado com o objetivo de controlar as cheias do rio São Francisco e para geração de energia elétrica. Ele faz parte de uma rede interligada de linhas de transmissão de energia que são distribuídas para todo o território nacional. O Operador Nacional do Sistema (ONS) controla as decisões de operação, levando em conta a situação hidrológica de um conjunto de reservatórios. A Figura 10 apresenta o volume do

reservatório de Três Marias em um período de 2000 a 2011 para todos os meses do ano. Nota-se que nos anos de 2000 a 2003 o reservatório operou por vários meses com uma capacidade de 10 a 30% apenas. Os dados apresentados servirão para entender algumas variações nas análises da reflectância da água no decorrer desse estudo.

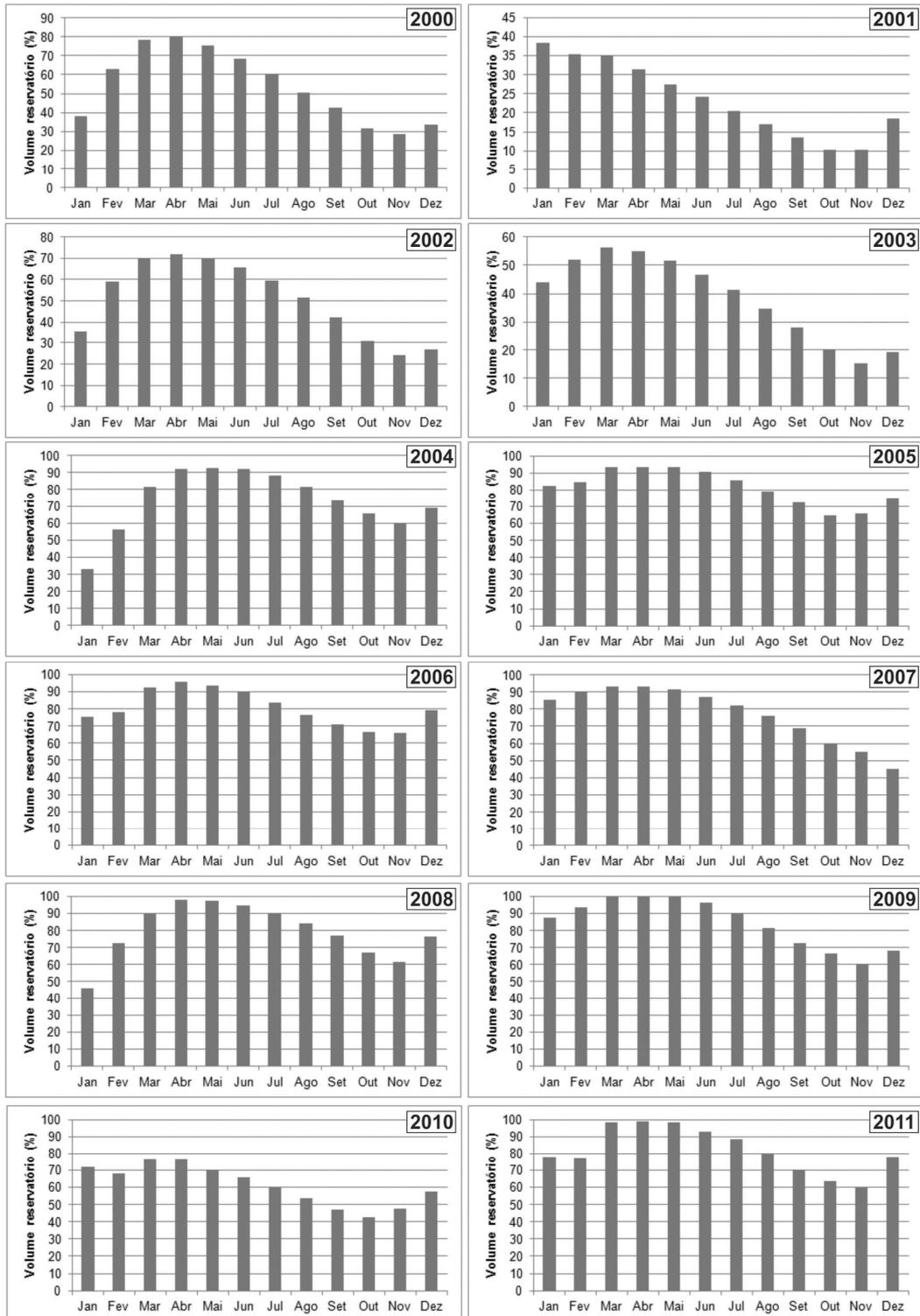


Figura 10. Volume de água no reservatório de Três Marias-MG (ONS, 2012).

6.3. Comportamento espectral da água

6.3.1. Reflectância da superfície

Como foi visto anteriormente, a reflectância depende dos componentes opticamente ativos presentes na água, assim a curva de reflectância espectral pode variar de acordo com o conteúdo de sedimentos que alteram a "cor" da água. A partir das medições radiométricas *in situ*, ao longo do braço do Indaiá, podemos encontrar diferentes curvas de reflectância espectral, como pode ser observado na Figura 11.

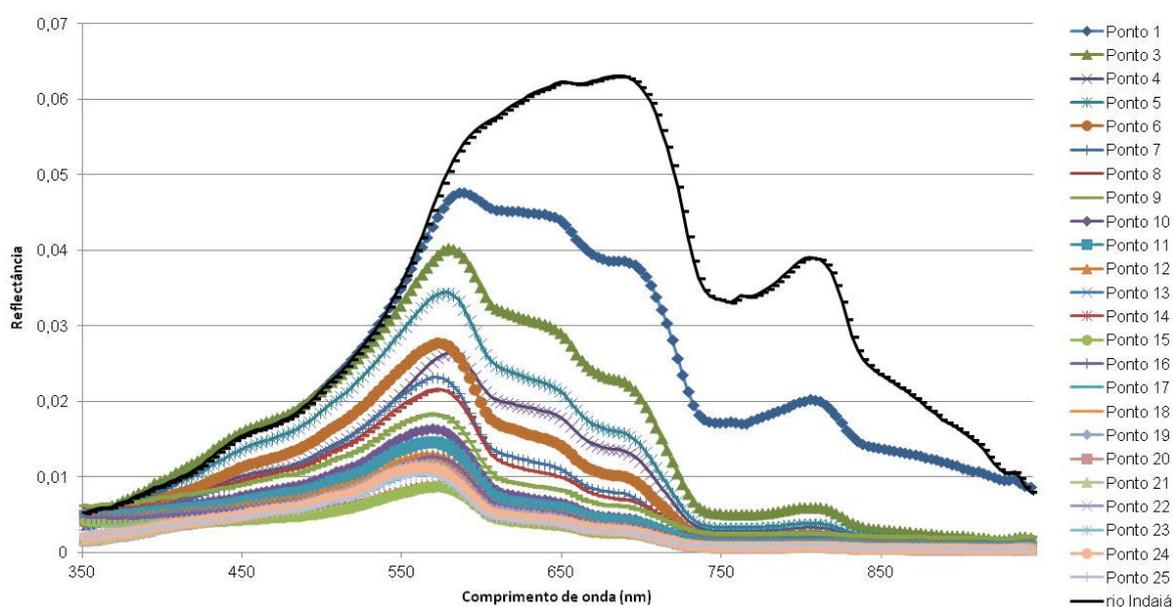


Figura 11. Curvas de reflectância espectral em diferentes pontos de amostragem no braço do rio reservatório Três Marias.

As curvas de reflectância apresentam respostas diferenciadas de intensidade do sinal, principalmente no canal do visível e infravermelho próximo (380 a 950 nm). Observa-se que a intensidade do sinal é maior nos primeiros pontos e diminui gradativamente ao longo do braço do reservatório. Devido as inconsistências das respostas do sinal, o ponto 2 foi desconsiderado.

A reflectância apresenta valores crescendo do azul para o verde para todos os pontos. Observamos que para a maioria dos pontos, a reflectância está mais alta no verde (500 a 570 nm) do que no vermelho (620-700 nm). Porém, para os pontos mais próximos do encontro do rio com o reservatório e no rio (estação hidrossedimentométrica do rio Indaiá), observa-se que a diferença entre as duas faixas espectrais tende a diminuir ou até inverter-se. No

infravermelho, a refletância apresenta valores baixos com um leve aumento na região entre 800 nm.

As propriedades óticas da água na faixa do azul estão dominadas pela absorção da luz dos componentes óticamente ativos (matéria orgânica dissolvida, sedimentos), o que explica as baixas refletâncias medidas entre 400 e 500 nm. O coeficiente de espalhamento pelo material em suspensão apresenta uma variação espectral fraca. Portanto, como a absorção da luz diminui de maneira exponencial negativa para os comprimentos de onda maiores, a refletância deve aumentar no verde em função da presença de material em suspensão em alta concentração.

Na região do vermelho, a água pura começa a absorver a luz mais intensamente o que explica que a refletância diminui de novo depois de 550 nm. Porém, com a concentração em sedimentos aumentando, o coeficiente de espalhamento cresce e a refletância no vermelho reflete o equilíbrio entre os processos de absorção (pela água) e de espalhamento (pelo material particulado). Nota-se na Figura 11, o efeito das variações espectrais da absorção da água nas ondulações das curvas de refletância entre 600 e 650 nm. A diminuição exponencial da absorção dos sedimentos para comprimentos de onda maiores faz que a absorção no vermelho é geralmente considerada cerca de zero. Se a concentração em sedimentos for o suficiente, notamos que a refletância no vermelho pode até passar a do verde (ponto do rio Indaiá), o que se deve ao aumento da absorção da luz pelo material particulado no verde, mas que segue fraca no vermelho. Finalmente, com o forte aumento da absorção da luz pelas moléculas de água no infravermelho (porém com uma leve parada em torno de 800 nm), a refletância segue baixa sistematicamente até chegar a níveis não significantes além de 950 nm.

A diferença da resposta espectral dos pontos analisados pode ser comparado com a variação na concentração de sedimentos em suspensão que foram coletados nos mesmos pontos das medições radiométrica *in situ*. As medidas de refletância nos comprimentos de onda na região do vermelho (670 nm) e infravermelho (859 nm) foram correlacionadas com a concentração de sedimentos (Figura 12). As análises permitem observar uma boa correlação nos 2 comprimentos de onda. O canal do infravermelho (859 nm) obteve um R^2 de 0,87, esse resultado mostra que o canal do infravermelho possui grande potencial para identificar a alteração das concentrações de sedimentos ao longo do braço. Observamos que a refletância para pontos abaixo de 1 mg/L não varia, o que poderia significar que as propriedades óticas dos outros elementos ativos (material orgânico, fitoplâncton, água) prevalecem sobre os sedimentos quando a concentração for muito baixa.

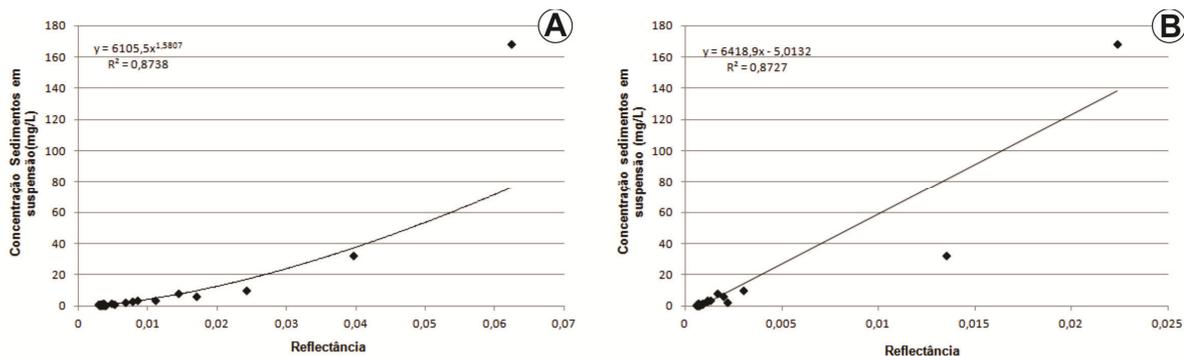


Figura 12. Análise de regressão entre concentração de sedimentos em suspensão e a reflectância no centro de banda do vermelho 670 nm (A) e infravermelho 859 nm (B) do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias.

Para entender melhor a variação espacial da reflectância dentro do braço do Indaiá, o gráfico seguinte relaciona a medição do sinal nos comprimentos de onda do vermelho (670 nm) e infravermelho (859 nm) com a distância no braço do rio Indaiá (Figura 13). Nota-se que a média da reflectância diminui ao longo do braço no sentido montante-jusante.

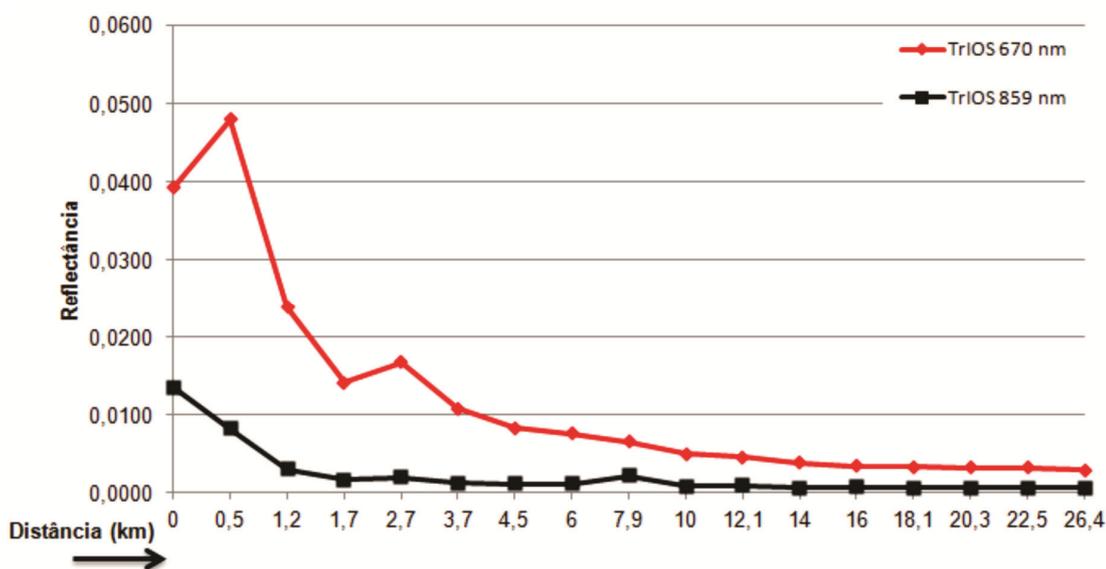


Figura 13. Medidas de reflectância em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

6.3.2. Coeficiente de atenuação vertical da luz descendente (Kd)

As medições *in situ* do coeficiente de atenuação da luz descendente (Kd) foram feitas em 7 pontos, juntos com as medições foram coletadas amostras de água para determinar a

concentração de sedimentos em suspensão. A Figura 14 apresenta as medições. Nota-se que a atenuação da luz é maior nos pontos próximos ao encontro do rio com o reservatório.

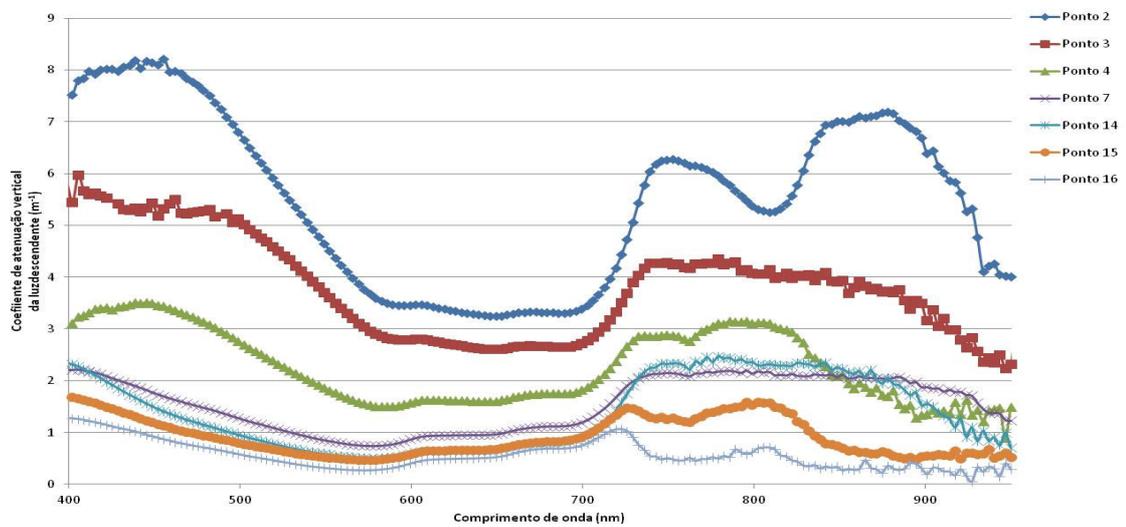


Figura 14. Coeficiente de atenuação vertical da luz descendente em diferentes pontos do braço rio Indaiá, reservatório Três Marias.

Na Figura 15 são apresentados dados da concentração de sedimentos correlacionados com as medições do K_d . Apesar de poucas medições realizadas, as análises demonstram boa correlação entre as duas medidas, com R^2 igual a 0,90 no canal do infravermelho.

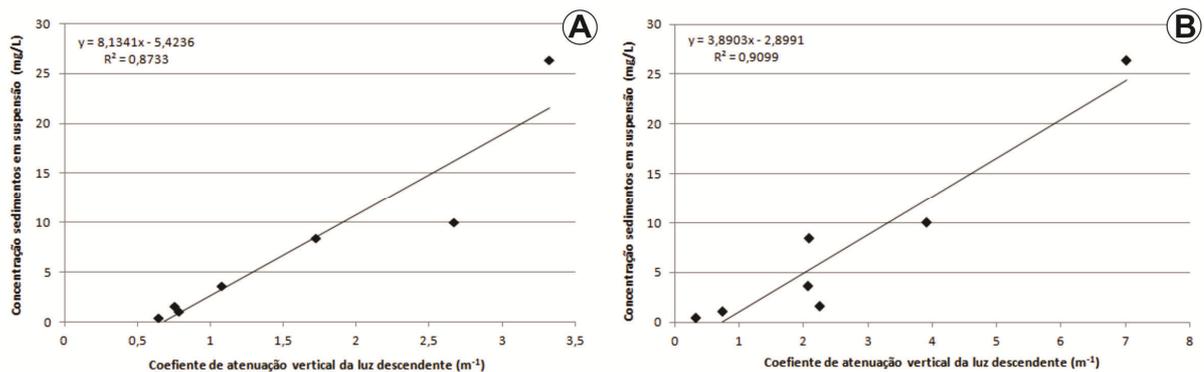


Figura 15. Análise de regressão entre concentração de sedimentos em suspensão e o coeficiente de atenuação vertical da luz descendente no centro de banda do (A) vermelho 670 nm e (B) infravermelho 859 nm do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias.

6.4. Comportamento temporal das imagens de satélite

A série temporal de 12 anos das imagens MODIS, compostas de 8 dias e processadas com o algoritmo MOD3R (item 5.3) foram classificadas e selecionadas por critérios de

qualidades, como ângulo da incidência solar, ângulo de visada do sensor, presença de aerossóis e presença ou ausência de nuvens (banda de qualidade MODIS A1), mas nem todas as imagens foram aproveitadas para estimar *endmember* de água. Das 1024 imagens analisadas (Terra e Aqua), 82% obtiveram qualidade aceitável e foram usadas para obter estimativas de reflectância da água. Os 18% restantes das imagens não foram aproveitadas, e isso pode estar relacionado à resolução efetiva do sensor, cobertura de nuvens (período chuvoso), largura do braço (poucos pixels puros amostrados) e da hidrologia (variação do nível do reservatório).

Como foi visto nas análises espectrais *in situ* do comportamento da água no braço do reservatório, o melhor contraste para identificar os componentes opticamente ativos presentes na água encontra-se na região do visível e infravermelho, particularmente nas bandas entre 620 e 859 nm. Os dados apresentados na Figura 16 são séries temporais de reflectância da água processadas com o algoritmo MOD3R (item 5.3) ao longo do braço do rio Indaiá para as 8 regiões de interesse (ver Figura 6). As análises foram centradas na banda 2 das imagens MODIS (produto de reflectância da superfície 250m) referente ao comprimento de onda do infravermelho (NIR).

Os gráficos obtidos através das análises da reflectância da água permite observar: 1) um ciclo sazonal bem definido (altos valores de reflectância nos meses de chuva e baixos valores nos meses de seca); 2) uma forte variação da reflectância ao longo do braço do reservatório no sentido da montante à jusante, com valores de reflectância que chegam a 2000 (máscara 1) e valores baixos de 100 e 50 (máscara 7 e 8); 3) altos valores de reflectância nos anos de 2000 a 2004 das primeiras máscaras analisadas, essa diferença na reflectância pode estar diretamente relacionada com o nível da água do reservatório Três Marias, que nos anos de 2000 a 2003 operou com o nível entre 10 a 30% de sua capacidade nos meses mais secos (Figura 10).

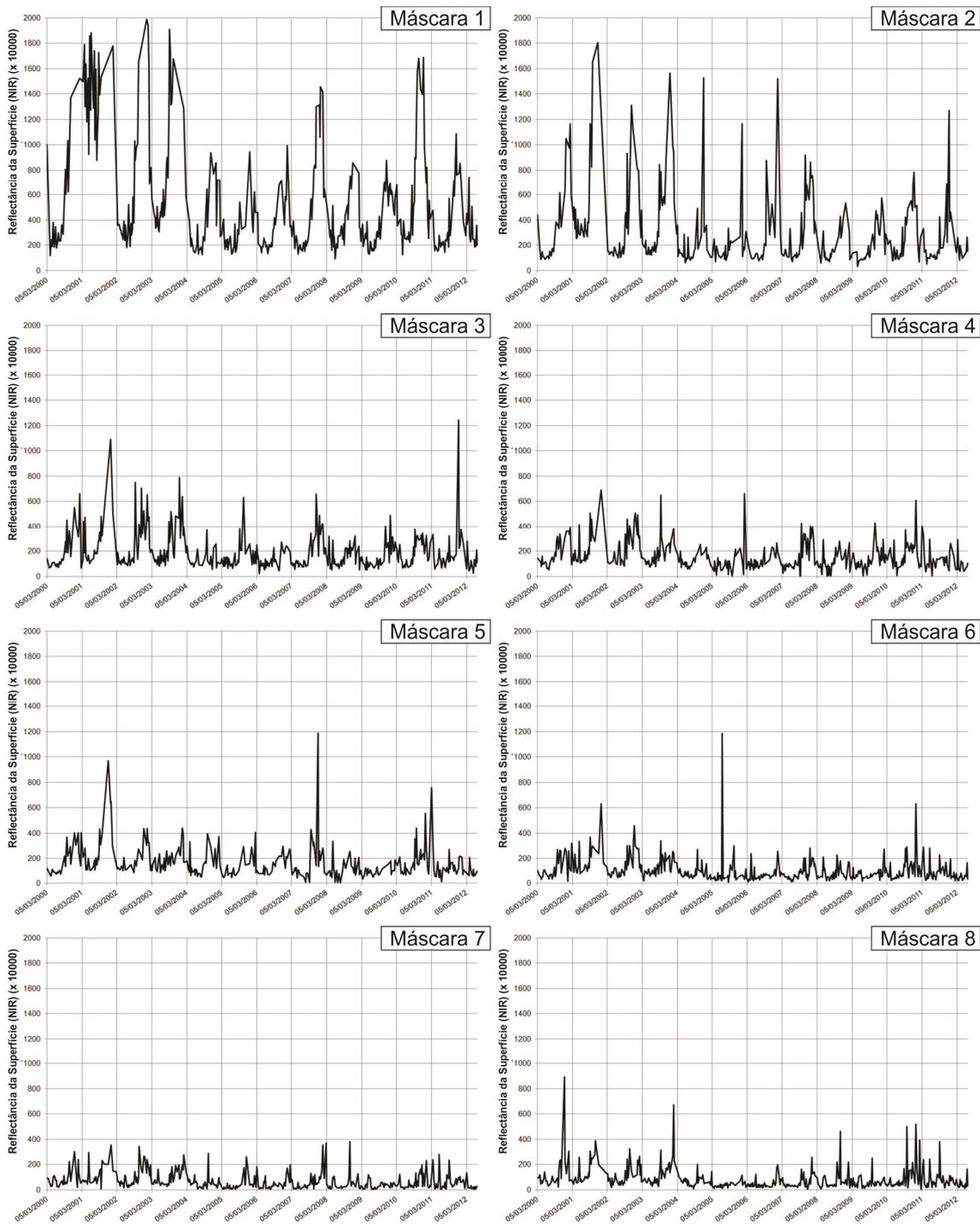


Figura 16. Estimativas de reflectância da superfície da água na região do infravermelho do MODIS nas máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

7. RESULTADOS

7.1. Comparação entre as imagens de satélite e os dados de vazão sólida

A possibilidade de relacionar a concentração de sedimentos em águas continentais usando as respostas espectrais das imagens de sensoriamento remoto foi investigada por Novo *et al.*, (1989); Doxaran, *et al.*, (2002); e Martinez *et al.*, (2009). Esses trabalhos relatam uma forte correlação entre sedimentos em suspensão e a resposta espectral das imagens, mas essa relação depende do comprimento de onda. A maioria dos estudos concorda que a melhor correlação entre sedimentos em suspensão e reflectância está centrada entre os 600 e 900 nm em águas continentais.

A Figura 17 apresenta a relação da série de descarga sólida diária da estação de monitoramento hidrossedimentológico do rio Indaiá, com as estimativas de reflectância da água dos dados MODIS (8 dias) nas bandas do vermelho e infravermelho em 2 ciclos sazonais hidrológicos para as máscaras definidas na Figura 6.

Os dados de reflectância MODIS da máscara 1 não se relacionam muito bem com os dados de vazão sólida no período de seca no ano de 2001. É provável que o baixo nível da água no reservatório naquele período favoreceu o crescimento de vegetação ciliar ou plantas aquáticas no início do braço do rio. Esse tipo de alvos podem ter gerados os altos valores de reflectância na máscara 1 no ano de 2001, pois a assinatura está próxima ao padrão da resposta espectral de alvos como vegetação (baixo no vermelho e alto no infravermelho) e não com a reflectância da água.

Seguindo com as análises das outras máscaras, é possível notar uma boa relação entre a resposta da reflectância dos dados MODIS com a descarga sólida de sedimentos. Quando a descarga sólida aumenta no rio, a reflectância no braço calculada nas bandas do vermelho e infravermelho aumenta. Observa-se que essa relação é contínua em todos os ciclos sazonais. Outro padrão de variação que pode ser visto nos dados MODIS é a diminuição da reflectância no sentido montante-jusante à medida que as máscaras afastam-se do encontro do rio com o reservatório.

Para uma melhor visualização da relação entre reflectância dos dados MODIS e a descarga sólida de sedimentos a Figura 18 mostra com mais detalhe a resposta das bandas vermelha e infravermelha na máscara 2 para os meses janeiro-2000/janeiro-2001 e janeiro-2001/janeiro-2002. Nota-se que alguns dados de reflectância do MODIS não foram aproveitados, isso deve a baixa resolução espacial do sensor e a quantidade de nuvens existentes no período de chuva, problemas que limitam o algoritmo MOD3R em encontrar

pixels puros de água no braço do reservatório e assim reduz significativamente a quantidade de dados de reflectância nesse período.

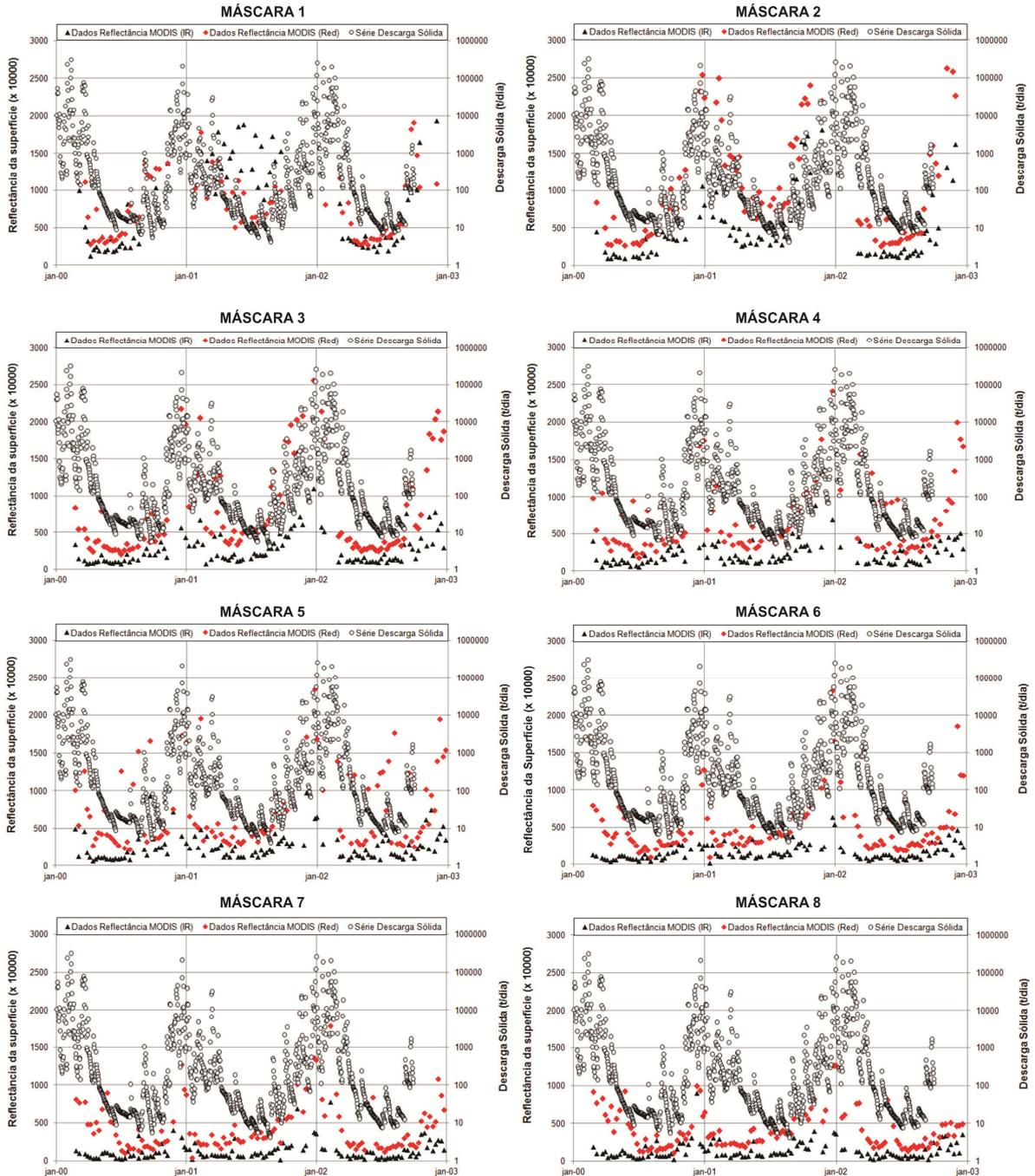


Figura 17. Fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá em função da reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho.

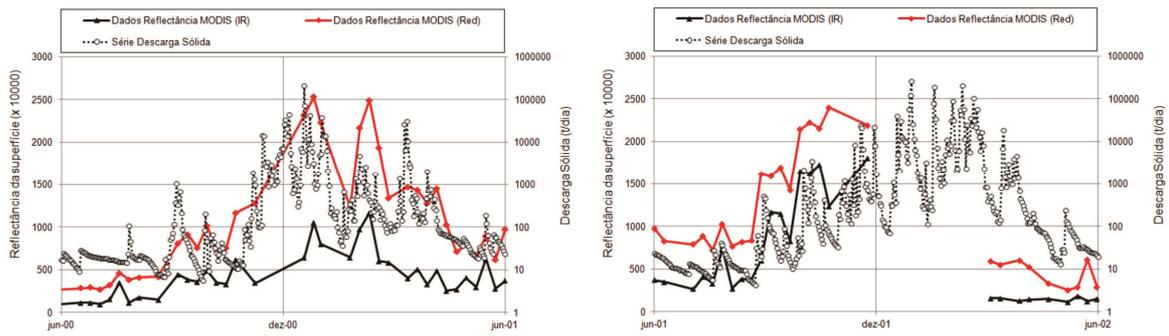


Figura 18. Fluxo da vazão sólida diária na estação do rio Indaiá em função da reflectância da superfície das imagens MODIS (8 dias), nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho. Detalhe da máscara 2 para os meses janeiro-2000/janeiro-2001 e janeiro-2001/janeiro 2002.

7.2. Calibração e validação das imagens de satélite com medições de campo (TriOS)

As medidas de reflectância dos dados MODIS processados com o algoritmo MOD3R são calibrados em campo utilizando as medições *in situ* realizadas com radiômetros portáteis (item 6.2). Para isso, os dados de medição *in situ* de radiometria foram utilizados para simular as bandas radiométricas do MODIS de acordo com a localização das bandas espectrais.

A Figura 19 apresenta os dados MODIS simulados nas bandas verde (550 nm), vermelho (670) e infravermelho (859 nm) em função da concentração de sedimentos em suspensão coletados *in situ*, podendo variar de 1,05 a 32,2 mg/L no braço do rio Indaiá e 169 mg/L na estação hidrossedimentométrica do rio Indaiá. As curvas de calibração do verde e vermelho não são lineares, obtendo um R^2 de 0,83 e 0,96 respectivamente. Na região do infravermelho, obteve-se uma curva de calibração quase linear ($R^2 = 0,93$). Os dados de reflectância foram convertidos para concentração de sedimentos usando a curva de calibração seguinte, com a reflectância da banda vermelha do MODIS.

$$\text{Concentração (mg/L)} = 1,002728 \times e^{(0,00271129 \times \text{reflectância MODIS vermelho})} \quad (4)$$

Os dados TriOS das medições de campo que foram simulados, comprova o grande potencial do sensor MODIS para estimar a variação dos fluxos de sedimentos em suspensão ao longo do braço do rio Indaiá no reservatório Três Marias.

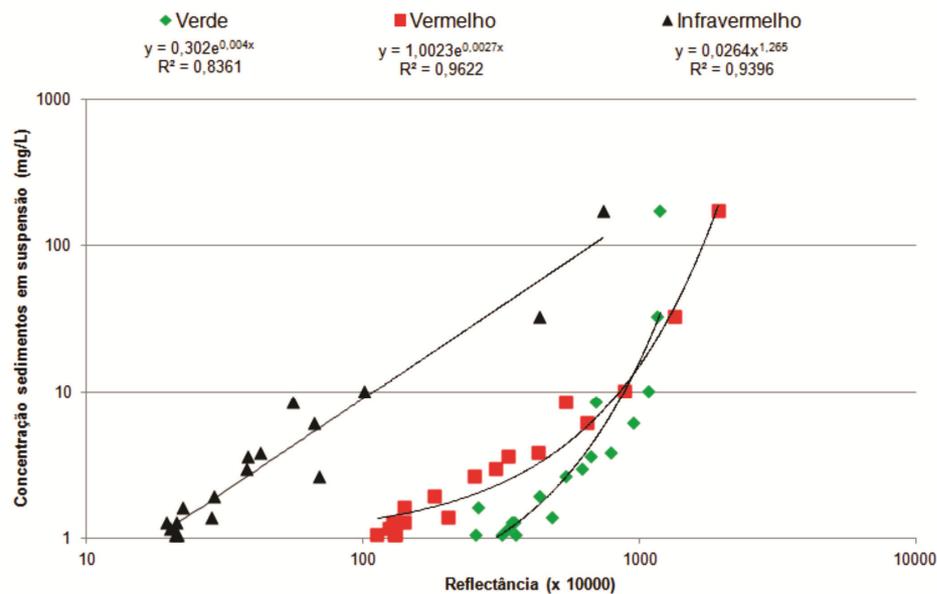


Figura 19. Análise de regressão entre a concentração de sedimentos em suspensão (campanhas) e as bandas das imagens MODIS simuladas a partir medições radiométricas (TriOS).

7.3. Variação temporal das concentrações de sedimentos

A resposta do comportamento temporal da reflectância ao longo do braço do rio Indaiá possibilita entender alguns processos do comportamento da entrada do fluxo de sedimentos. A Figura 20 apresenta médias mensais para cada máscara analisada. As médias foram obtidas através do processamento da série temporal de imagens MODIS (Terra e Aqua) usando o algoritmo MOD3R. Os dados de ambos os satélites foram fusionados e filtrados usando a banda de qualidade do produto MODIS A1. Em seguida foram obtidos médias de cada máscaras para todos os meses do ano. Os dados foram convertidos de reflectância para concentração de sedimentos (Equação 4).

As médias de concentração de sedimentos possibilitam observar que: 1) existem fortes valores de concentração nos meses de chuva, principalmente nas 2 primeiras máscaras; 2) ao longo da série temporal, as máscaras 1 e 2 obtiveram concentrações acima das outras regiões (descarga contínua de sedimentos); 3) o gradiente espacial de concentração é maior nos meses de chuva (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro); 4) nas máscaras 5, 6, 7 e 8 ocorreu um aumento dos valores médios de concentração no mês de maio. Esse último fato poderia ser associado ao uso agrícola intenso das margens do reservatório a partir da máscara 5. Foram analisadas visualmente imagens do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5, órbita/ponto 219/73 dos meses de maio nos anos 2001, 2004, 2005, 2007, 2010 e 2011. As análises mostraram que até a máscara 5 (primeiros 10 km), a vegetação nativa é predominante

nas margens do braço e depois da máscara 6, constatou-se uma intensa atividade de cultivo na margem esquerda e margem direita do braço do reservatório. É possível que o aumento da concentração de sedimento no mês de maio seja resultante das práticas de cultivo nesse período (safra).

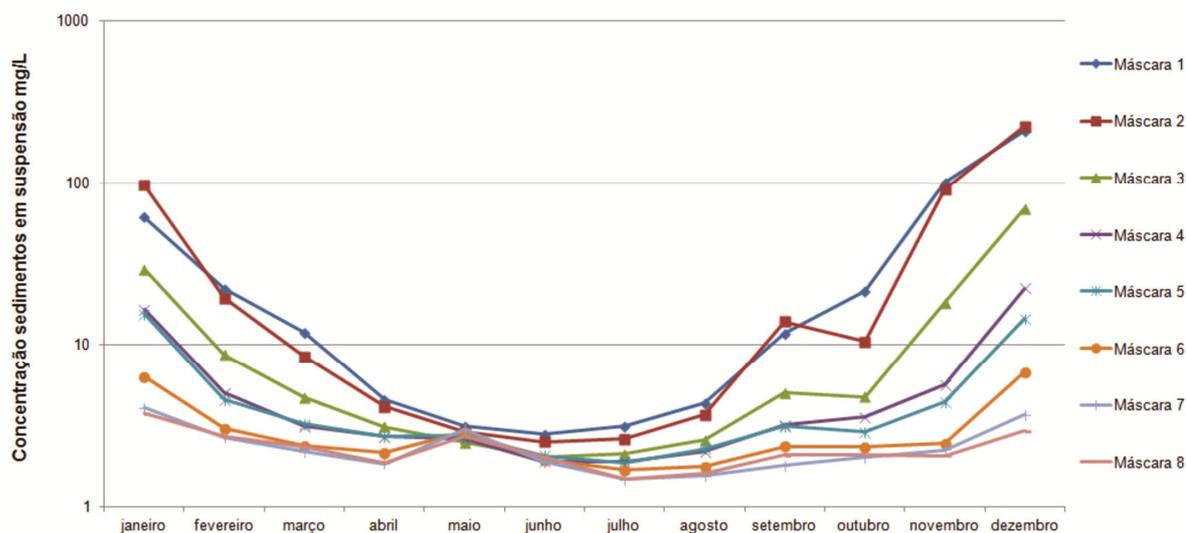


Figura 20. Médias mensais estimada por satélite (período 2000-2012) da concentração de sedimentos das máscaras analisadas no braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

7.4. Variação espacial do padrão de sedimentação

Usando dados de reflectância das imagens MODIS foi verificado a existência de concentração de sedimentos e padrões de sedimentação. Os resultados apresentados tem o propósito de caracterizar o comportamento da entrada de sedimentos referentes a velocidade de transporte e distância do fluxo de sedimentos.

As estimativas de reflectância foram calculadas para cada mês do ano em todas as máscaras, permitindo um estudo espaço-temporal do processo de fluxo da entrada de sedimentos ao longo de 12 anos. Usando os mesmos procedimentos da análise anterior as médias de reflectância foram calculadas usando o algoritmo MOD3R, os valores de reflectância foram extraídos das imagens dos satélites Terra e Aqua para cada máscara nas regiões de interesse. Em seguida os dados foram fusionados e filtrados por parâmetros de qualidade, como ângulo de incidência solar e ângulo de visada do satélite, presença de aerossóis e presença ou ausência de nuvens (banda de qualidade MODIS A1). Os dados foram convertidos de reflectância para concentração de sedimentos (Equação 4).

A Figura 21 apresenta médias de concentração de sedimentos para cada mês do ano em função da distância das 8 máscaras analisadas. Observou-se que: 1) os valores de concentração de sedimentos diminuem em função da distância das regiões analisadas no

sentido montante-jusante; 2) valores altos de concentração de sedimentos nos meses de chuvas (outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro), principalmente nos primeiros 5 km; 3) na máscara 5 ocorreu um aumento nos valores médios da concentração, na região entre 10 a 12 km, onde existem pequenos afluentes que influenciam na entrada de sedimentos para o braço do rio Indaiá.

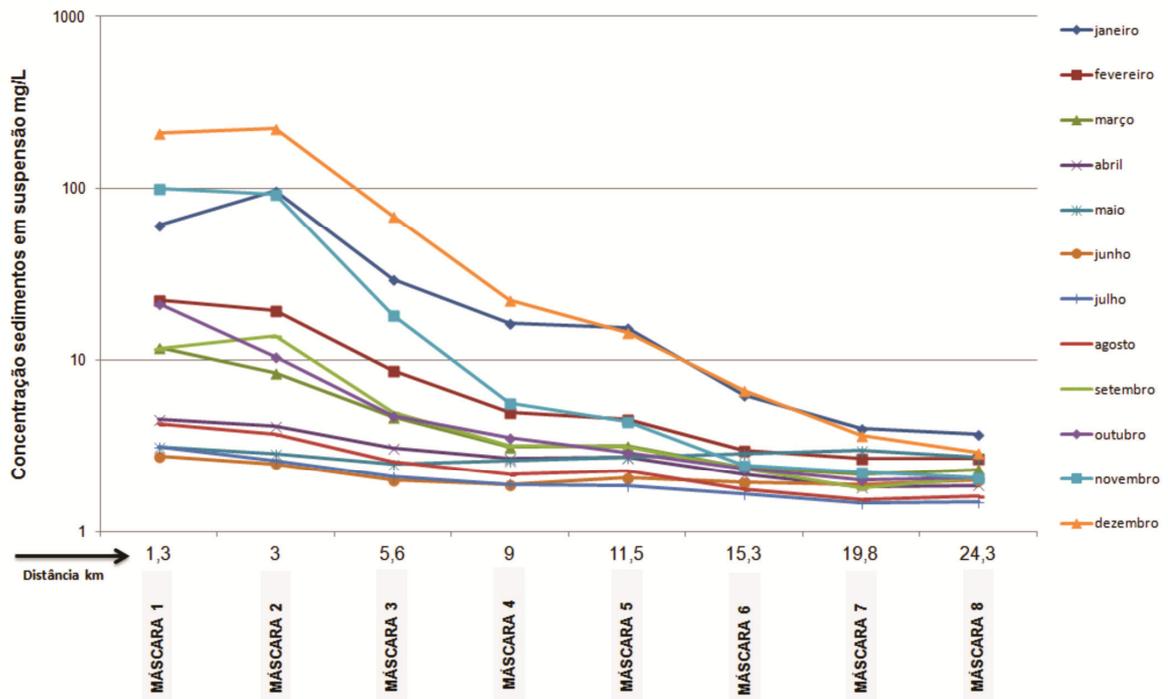


Figura 21. Médias mensais estimada por satélite (período 2000-2012) da concentração de sedimentos em todos os meses do ano em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá, reservatório Três Marias-MG.

8. DISCUSSÃO

Braga *et al.* (2012) estudaram o comportamento hidrossedimentológico em afluentes de um reservatório no centro oeste do Brasil e afirmam que o conhecimento do comportamento dos fluxos de sedimentos é fundamental para o planejamento e o uso sustentável dos recursos hídricos.

Carvalho *et al.* (2000) explicam que os sedimentos carregados pelo rio para dentro de um reservatório não são distribuídos uniformemente, as partículas maiores como pedregulhos e areias grossas são as primeiras a se depositar, enquanto os sedimentos mais finos adentram-se no reservatório. Embora os produtos de reflectância da superfície do sensor MODIS tenham uma resolução espacial média (250 metros) nas bandas do vermelho e infravermelho, suas imagens compostas de 8 dias permitem uma melhor avaliação temporal e podem identificar mudanças na concentração e deposição de sedimentos em reservatórios. Essas informações podem auxiliar na identificação das variações do fluxo de sedimentos e consequentemente da qualidade da água.

Os padrões de entrada de sedimentos no braço do Indaiá detectados por satélite são difíceis de validar porque não existe um banco de dados sobre a distribuição espacial dos sedimentos em suspensão dentro do reservatório. O que pode ser feito é comparar as amostras realizadas durante a campanha de março 2012 com as médias mensais estimadas com as imagens MODIS no período de 2000 à 2012. Apesar de que as duas fontes de dados não possam ser consideradas totalmente independentes (a calibração da reflectância para concentração de sedimentos em suspensão foi determinada com os dados daquela campanha), uma comparação entre os padrões espaciais registrados no campo e determinado por satélite é considerada como uma primeira validação dos resultados obtidos com as imagens MODIS.

A Figura 22 mostra que o padrão estimado por satélite de diminuição na concentração em sedimento em suspensão ao longo do braço do Indaiá é totalmente coerente com a medição *in situ*, apesar que o nível de concentração não seja similar em função das condições hidroclimáticas específicas ao período de medição. Em particular, notamos que o satélite consegue acompanhar muito bem a diminuição drástica da concentração de sedimentos nos 5 primeiros quilômetros do braço.

Entre 10 e 15 km, os dois perfis de concentração de sedimentos concordam na detecção de um leve aumento da concentração que deve-se ao encontro com um pequeno tributário na margem esquerda. Esse aumento, nota-se em quase todos os meses (Figura 21) confirmando o potencial do satélite em detectar variações finas no padrão de sedimentação

dentro do reservatório. Entre 15 e 25 km, os dados de satélite e os dados de campo mostram um perfil de concentração quase idêntico até o encontro do antigo curso principal do Rio São Francisco.

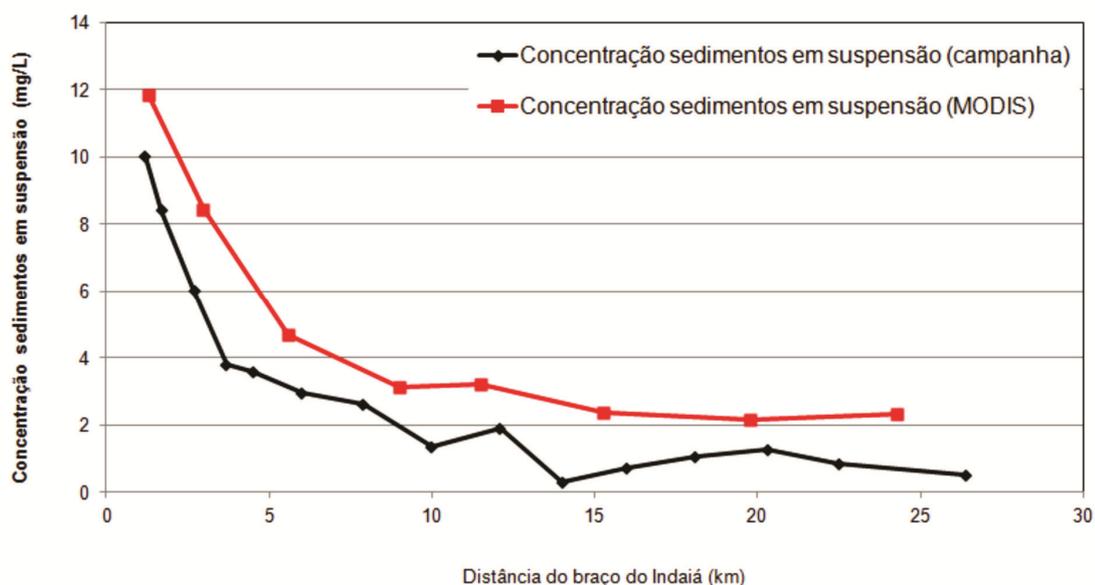


Figura 22. Comparação entre a concentração de sedimentos em suspensão estimada por satélite no mês de março (médias anuais de refletância) e as medições realizadas em março 2012, em função da distância ao longo do braço do rio Indaiá.

Em função dos resultados apresentados, diferentes limitações e pontos a estudar no futuro podem ser listados:

Devido a resolução espacial do sensor MODIS, a extração da reflectância da água usando as imagens de satélite poderia ser comprometida pela largura do braço, especialmente nos períodos de seca quando o nível do reservatório baixa. Nos períodos de seca extremas entre 2000 e 2002, uma assinatura espectral de vegetação foi detectado, porém somente nas regiões mais próximas a entrada do rio Indaiá. Fora esse período, notamos que as imagens de satélite permitem monitorar de maneira quase continua a qualidade das águas no braço do Indaiá. Dessa maneira, podemos considerar como um ótimo resultado o fato de que as imagens MODIS conseguem acompanhar o padrão de sedimentação numa extensão menor de 5 km (Figura 22).

Uma hipótese de trabalho importante é que a concentração de sedimento na superfície do lago seja representativa da concentração de sedimento na coluna de água inteira. É geralmente considerado que as partículas finas (menor de que 63 micrometros) apresentam um gradiente vertical limitado fazendo com que uma estimativa de superfície seja representável dos processos que acontecem na coluna de água. Ao contrário, as partículas maiores como areais, tendem a ser localizadas mais perto do fundo, de modo que as estimativas de satélite devem ser mais representativas dos processos de sedimentação das partículas finas.

Devido ao tempo limitado, não foi possível registrar as principais características do material particulado em função do tempo. Mais medições serão necessárias para caracterizar as variações verticais da concentração de sedimentos e da granulometria para confirmar a robustez da relação entre refletância e concentração de sedimento, e para todos os períodos hidrológicos. As medições do coeficiente de atenuação K_d poderiam ser aproveitados para acessar a homogeneidade da coluna de água.

As medições radiométricas *in situ* mostraram que, abaixo de 1 mg/L, a refletância não pode acompanhar as variações de concentrações. Essa insensibilidade deve-se provavelmente ao impacto dos outros componentes ativos (material orgânico dissolvido e particulado) e constituiria uma limitação ao uso do sensoriamento remoto. Porém, pode-se observar que os episódios de máxima entrada de sedimentos, significantes para os processos de assoreamento de um reservatório, estão associados à concentrações muito mais altas do que 1 mg/L.

Os resultados apresentados da série temporal de reflectância dos dados MODIS mostraram uma boa relação com os dados de vazão sólida coletados dentro do rio Indaiá. Dessa forma, comprovamos que as imagens de satélite poderiam servir como solução alternativa de baixo custo, em relação aos métodos tradicionais usados pela CEMIG, para entender os processos de assoreamento dentro do reservatório e serem integrados ao sistema de monitoramento do reservatório de Três Marias.

9. CONCLUSÕES

O objetivo do trabalho foi investigar o uso de imagens MODIS para identificar variações espacial e temporal na entrada do fluxo de sedimentos no braço do rio Indaiá no reservatório de Três Marias em um período de 12 anos. Assim, pôde-se concluir que:

- A análise das propriedades ópticas demonstra a excelente correlação entre a concentração de sedimentos em suspensão e a reflectância, em particular no verde, vermelho e infravermelho;
- Os dados de reflectância da superfície do sensor MODIS (canal vermelho, no modo a 250 metros) estão relacionados de maneira robusta com os dados de concentração de sedimentos;
- O algoritmo MOD3R mostrou-se eficiente em estimar valores de reflectância das águas no braço do reservatório;
- O percentual de registros válidos estimados nas imagens MODIS (> 80 %) atendem aos requisitos para um monitoramento operacional do fluxo de sedimentos. Em particular, o número de observações obtidas pelos satélites pode auxiliar no monitoramento de todo o ciclo hidrossedimentológico da região;
- Apesar que mais trabalhos sejam necessários para entender totalmente a variabilidade das propriedades ópticas em função da presença de sedimentos em suspensão (radiometria de campo, caracterização física das partículas como granulometria ou mineralogia), os resultados apresentados demonstram o grande potencial das imagens de satélites do tipo MODIS em identificar padrões finos no transporte de sedimentos dentro de um reservatório;

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTARA, E. H. Análise da turbidez na planície de inundação de Curuaí (PA, Brasil) integrando dados telemétricos e imagens MODIS/TERRA. (INPE-14621-TDI/1200). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 220 p. 2006.
- ARAÚJO, C.C.; MARQUES, J.A.V.; NETO, A.R.S.; Dourado, J.C.; Machado, R.N.S.. Estudo da produção de sedimentos da sub-bacia do ribeirão Taquaruçu Grande (TO). *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Curitiba, PR. n 105. ABRH. 2003.
- BARBOSA, C.C.F. *Sensoriamento Remoto na dinâmica de circulação da água do sistema de planície de curuaí/Rio Amazonas*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Tese (Doutorado) INPE-14614-TDI/1193, São José dos Campos - SP, 282 p. 2007.
- BUKATA, R.P.; JEROME, J.H.; KONDRATYEV, K. Y.; POZDNYAKOV, D.V. *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*. Burlington, Ontario, Canada. Environment Canada, Aquatic Ecosystem Conservation Branch, National Water Research Institute. 1995. 362 p.
- BRAGA, C.C.; ROCHA, I. R.; CABRAL, J.B.P.; BARCELOS, A.A. Análise de descarga sólida em suspensão dos afluentes do reservatório da UHE Barra dos Coqueiros-GO. *Revista Geonorte*, Manaus-AM. Edição Especial. v. 3, n. 4, p. 495-505. 2012.
- CARVALHO, N.O. *Hidrossedimentometria Prática*. Ed. CPRM.1994. 372p.
- CARVALHO, N.O. *Produção de Sedimentos em Função da Variabilidade Climática: O Estudo de Caso da Área Contribuinte ao Reservatório de Três Marias, Região do Alto São Francisco*. Projeto BRA/00/029, ANEEL, PNUD, CT Brasil, Brasília, DF, 2001. 51p.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Ed. ANEEL. 2000. 140p.

- CHEPAR. *Projeto HL-95 – Avaliação do processo de sedimentação do reservatório*. Ed. Itaipu. Relatório técnico. 1999. 78 p. (Anexos 1 a 5).
- Chen, Z.; Curran, P. J.; Hansom, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. *Remote Sensing of Environment*, v. 40, n.1, p. 67-77, 1992.
- DEKKER, A. G., *Detection of optical water quality parameters of eutrophic waters by high resolution remote sensing*, PhD Thesis, Vrije Universiteit, Amsterdam, The Netherlands, 1993.
- DOXARAN, D., FROIDEFOND, J.M., LAVENDER, S., CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, p. 149-161. 2002.
- GRANBERG, M.; SELCK, H. Effects of sediment organic matter quality on bioaccumulation, degradation, and distribution of pyrene in two macrofaunal species and their surrounding sediment. *Marine Environmental Research*. p. 313-335. 2007
- HOOPER, R.P., 1997. *Sediment sampling in the national stream quality accounting network*. In: U.S. Geological Survey (USGS) Sediment Workshop, February 4-7, 1997. Atlanta, GA. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/osw/techniques/workshop/hooper.html>>. Acesso em: 15 nov. 2011.
- JENSEN, J. R. *Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais*. São José dos Campos-SP: ed 1. Parênteses, 2009.
- JUSTICE, C.O.; TOWNSHEND, J.R.G.; VERMOTE, E.F., MASUOKA, E., WOLFE, R.E.; SALEOUS, N.; ROY, D.P.; MORISETTE, J.T. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n.1-2, Nov. p 3 – 15, 2002a.

- JUSTICE, C.O.; GIGLIO, B.; KORONTZI, S.; OWENS, J.; MORISETTE, J.T.; ROY, D.P.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1-2 :p. 244-26, 2002b.
- KAMPEL, M.; NOVO, E.M.L.M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: Souza, R.B. (Org) *Oceanografia por Satélites*. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 12, p.180-196. 2005.
- KIRK, J.T.O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- LIMA, J.E.F.W.; SANTOS, P.M.C.; CARVALHO, N. O.; SILVA, M.S. *Diagnóstico do Fluxo de Sedimentos em Suspensão na Bacia Araguaia-Tocantins*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Brasília, DF: ANEEL: ANA, 2004.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and image interpretation*. 2. Ed. New York: J. Wiley, 1987, 850p.
- MACÊDO. I.L. *Estudos de modelos em ambiente de geoprocessamento para previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: O caso da bacia do rio Indaiá - UHE Três Marias, MG*. 2009. 340 f. Tese (Doutorado) - Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2009.
- MARTINEZ, J.M., GUYOT, J.L., FILIZOLA, N., SONDAG, F. Increase in suspended sediment discharge of the Amazon River assessed by monitoring network and satellite data. *Catena*. 79, 257-264. 2009.
- MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. *Sensoriamento remoto. Reflectância dos alvos naturais*. Universidade de Brasília. Brasília – DF. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF, 2001. 262p
- MERTES, L.A.K., SMITH, C.T., E ADAMS, J.B. Estimating Suspended Sediment Concentrations in Surface Waters of the Amazon River Wetlands from Landsat Images. *Remote Sensing of Environment*., v. 43, p. 281-301, 1993.

- MORRIS, G. L.; FAN, J. *Reservoir sedimentation handbook. Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use*. McGraw-Hill. NY. 1997. 627p.
- MOORE, G.K. Satellite surveillance of physical water quality characteristics. In. *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 12., Ann Arbor, MI, 1977. Proceedings, Ann Arbor, University Michigan, 1977, p. 445-461.
- NOBREGA, I. W. *Análise espectral de sistemas aquáticos da Amazônia para a identificação de componentes opticamente ativos*. Tese (Doutorado), INPE-13059-TDI/1023, São José dos Campos - SP, 84 p, 2002.
- NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 3 ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- NOVO, E.M.L.M. Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo. *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 2007. p.46.
- NOVO, E.M.L.M.; HAMSOM, J.D.; CURRAN, P.J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentrations: *International journal of remote sensing*, v. 10, p. 1283-1289, 1989.
- NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Orgs). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. Brasília: UnB; Embrapa Cerrados, 2001. p.203-222.
- OLIVEIRA, M.R. *Investigação da Contaminação por Metais Pesados da Água e do Sedimento de Corrente nas margens do Rio São Francisco e tributários, a jusante da Represa da CEMIG no município de Três Marias, Minas Gerais*. Tese (Doutorado) . Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte - BH, 2007. 172p.

- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). *Volume útil dos principais reservatórios*. 2012. Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx>. Acesso em: 10 de nov, 2012.
- PAIVA, E.M.C.D. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D. (Orgs.). *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. p. 493-506.
- ROSENDO, J.S.R. *Índices de vegetação e monitoramento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia do Rio Araguari – MG – utilizando dados do sensor MODIS*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 130 p. 2005.
- RUDORFF, B.F.T.; SHIMABUKURO, Y.E.; CEBALLOS, J.C. *Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil*. 1.ed. São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. 425 p.
- RUDORFF, C. M. *Estudo da composição das águas da planície amazônica por meio de dados de reflectância do sensor Hyperion/EO-1 e de espectrômetro de campo visando à compreensão da variação temporal dos seus constituintes opticamente ativos*.: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Dissertação (Mestrado) INPE-14166-TDI/1083, São José dos Campos – SP. 166 p. 2006.
- SHEN, H.W.; JULIEN, P.Y. *Erosion and sediment transport*. In Maidment, D. R. *handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, INC. NY. 1992. p. 12-1, 12-61.
- SIVIERO, M.R.L.; COIADO, E.M. Produção de sedimentos a montante de uma seção no rio Atibaia associada à descarga sólida transportada. *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Belo Horizonte, MG. ABRH. 1999.
- TUNDISI, J. G.; MATSU MURA-TUNDISI, T. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631p.

VALÉRIO, A.M. *O uso do sensoriamento remoto orbital e de superfície para o estudo do comportamento do corpo de água do reservatório do Manso, MT, Brasil*. Dissertação (Mestrado). INPE-16234-TDI/1551, São José dos Campos - SP, 2009. 119p.

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

LOBO, F.L. *Biblioteca espectral de tipos de água das áreas alagáveis da Amazônia..* Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. 101p.