

USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO RESERVATÓRIO DO APM MANSO (MT)

Milena Sousa Fernandes

Orientador: Luiz Carlos Pittol Martini



Milena Sousa Fernandes

USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE
ESPACIAL E TEMPORAL DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO
RESERVATÓRIO DO APM MANSO (MT)

Trabalho submetido à Banca
Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pittol
Martini

Florianópolis
2016

**USO DO SENSORIAMENTO REMOTO PARA ANÁLISE
ESPACIAL E TEMPORAL DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO
NO RESERVATÓRIO DO APROVEITAMENTO MÚLTIPLO
MANSO (MT)**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para conclusão do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado a em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

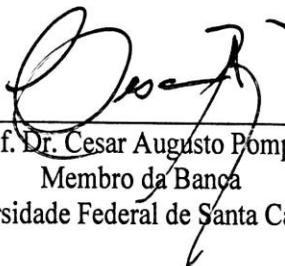
Florianópolis, 02 de dezembro de 2016



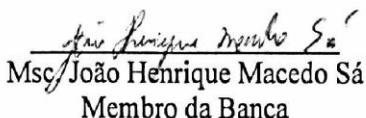
Prof. Dr. Luiz Carlos Pittol Martini
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Cesar Augusto Pompêo
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina



Msc. João Henrique Macedo Sá
Membro da Banca
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

FERNANDES, Milena Sousa

Uso do sensoriamento remoto para análise espacial e temporal de sedimentos em suspensão no reservatório do APM Manso (MT) / Milena Sousa FERNANDES ; orientador, Luiz Carlos Pittol Martini - Florianópolis, SC, 2016.
69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. sedimentos em suspensão. 3. sensoriamento remoto. 4. APM Manso. 5. MODIS. I. Martini, Luiz Carlos Pittol . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e sabedoria para chegar até aqui. Ao meu pai e a minha mãe dedico a minha eterna gratidão por terem tornado todas as minhas conquistas possíveis e por estarem sempre ao meu lado, me apoiando em qualquer que seja a situação. Agradeço também ao meu irmão, por ter me ajudado e me aguentado nos momentos de desespero.

Agradeço ao meu orientador, Luiz Martini, por todo o conhecimento compartilhado, por estar sempre disponível e oferecendo suporte para realização do trabalho.

Agradeço a minha amiga Nivea Gonçalves, que dividiu comigo o apartamento, momentos de dificuldade e também os momentos mais felizes que poderíamos ter vivido nesse último ano.

Agradeço a minha amiga Amanda Kruger pela amizade, pelas noites estudando juntas e pela paciência durante todo o percurso.

RESUMO

A construção de barragens ocasiona a redução das velocidades da corrente e causa a deposição gradual dos sedimentos carregados pelos corpos d'água afluentes. Portanto, é de grande importância o monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão em reservatórios e o sensoriamento remoto é uma ferramenta que pode ser utilizada para essa finalidade. Com o objetivo de avaliar alguns sensores remotos disponíveis para análise temporal e espacial dos sedimentos, neste trabalho utilizou-se uma série de 15 anos de dados do sensor MODIS e foram obtidas relações positivas com dados pluviométricos e fluviométricos do Aproveitamento Múltiplo Manso, localizado no município de Chapada dos Guimarães (MT). Para análise espacial, foram utilizadas imagens do Landsat-8 e foram formuladas hipóteses para a distribuição dos sedimentos com base em eventos hidrológicos. Os resultados indicaram que é possível utilizar produtos de sensoriamento remoto para monitoramento hidrossedimentológico desde que os dados estejam devidamente calibrados com medidas realizadas in situ.

Palavras-chave: sedimentos em suspensão, sensoriamento remoto, APM Manso, MODIS.

ABSTRACT

The construction of dams causes the reduction of stream velocities and the gradual deposition of the sediments carried by tributaries. Therefore, it is important to monitor the suspended sediment concentration in reservoirs and the remote sensing is a tool that can be used for this purpose. In order to evaluate some remote sensing data products available for temporal and spatial analysis of sediments, this work utilized a 15-years data of MODIS sensor and found positive relationships with rainfall and fluviometric data measured in the dam named Aproveitamento Múltiplo Manso, locate near to Cuiabá (MT). For spatial analysis, Landsat-8 images were used and hypotheses were formulated for sediments distribution based on hydrological events. The results indicated that it is possible to use remote sensing data products for hydrosedimentological monitoring as long as the data is properly calibrated with measurements performed in situ.

Keywords: Suspended Solids, Remoting Sensing, APM Manso, MODIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento espectral dos alvos por banda	35
Figura 2- Bacia do reservatório APM Manso e principais afluentes.....	42
Figura 3- Gráfico climatológico da bacia do Manso.....	43
Figura 4- Localização dos pontos de amostragem	45
Figura 5- Concentração de sedimentos em suspensão e vazão de 1998 a 2016 ..	51
Figura 6- Concentração de sedimentos em suspensão e vazão ano 2000.....	52
Figura 7- Precipitação mensal de 2000 a 2016	52
Figura 8- Nível do reservatório de 2012 a 2015	53
Figura 9- Série temporal de reflectância banda 1 e 2	55
Figura 10- Relação da reflectância banda 1 e 2 com CSS	56
Figura 11- Relação da reflectância banda 1 e 2 com a precipitação	57
Figura 12- Relação banda 1 e 2 com o nível do reservatório	58
Figura 13- Distribuição dos sedimentos em suspensão - 27/11/2015	60
Figura 14- Distribuição dos sedimentos em suspensão - 23/08/2015	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados de operação APM Manso	44
Tabela 3- Localização dos pontos de amostragem.....	47
Tabela 4- Interpretação dos coeficientes de correlação	49
Tabela 5- Correlação entre precipitação e CSS.....	53
Tabela 6- Correlação banda 1 e 2 com CSS - Ponto 1	57
Tabela 7- Correlação banda 1 e 2 com precipitação- Ponto 1.....	58
Tabela 8- Correlação banda 1 e 2 com nível do reservatório	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Faixas espectrais Landsat MSS e TM.....	36
Quadro 2- Faixas espectrais Landsat ETM e OLI.....	37
Quadro 3- Produtos da superfície gerados pelo MODIS.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas
ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
APM – Aproveitamento Múltiplo Manso
ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer
CSS – Concentração de sedimentos em suspensão
ETM – Enhanced Thematic Mapper
EOS – Earth Observation System
ESRI - Environmental Systems Research Institute
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
IVP – Infravermelho Próximo
LPDAAC – Land processes distributed active archive center
MSS – Multispectral scanner system
MP1 – Compartimento Morfopedológico- Fundo de vale
MP3 - Compartimento Morfopedológico- Terraço
MP5 – Compartimento Morfopedológico- Topo de colina
MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
NDWI – Normalized Difference Water Index
OLI – Operational Land Imager
RBS – Reflective solar band
REM – Radiação Eletromagnética
RT – Tempo de retenção
SPOT - Satellite Pour l'Observation de la Terre Radiometer
TEB – Thermal emissive band
TIRS – Thermal Infrared Sensor
TM – Thematic Mapper
UHE – Usina Hidrelétrica
USGS – The United States Geological Survey
UTM – Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	25
1.1. OBJETIVOS.....	26
1.1.1. Objetivo Geral	26
1.1.2. Objetivos Específicos	26
2. REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1. ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS	27
2.1.1. Produção de sedimentos.....	27
2.1.2. Transporte e deposição de sedimentos.....	29
2.2. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A RECURSOS HÍDRICOS	30
2.2.1. Comportamento espectral da água	32
2.2.2. Índice de diferença normalizada da água - NDWI.....	33
2.2.3. Sensores Imageadores	35
3. METODOLOGIA.....	41
3.1. ÁREA DE ESTUDO	41
3.2. DADOS UTILIZADOS	45
3.2.1. Imagens Landsat	45
3.2.2. Imagens MODIS	46
3.2.3. Dados do monitoramento in situ	46
3.3. PROCESSAMENTO.....	47
3.4. ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1. ANÁLISE DOS DADOS	51
4.1.1. Hidrossedimentologia	51
4.1.2. Precipitação.....	52
4.1.3. Nível do reservatório	53
4.1.4. Série temporal de reflectância MODIS	54
4.2. ANÁLISE TEMPORAL DOS DADOS MODIS	55
4.3. ANÁLISE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS	59

5. CONCLUSÃO.....	63
REFERÊNCIAS	65

INTRODUÇÃO

A energia hidráulica é a fonte renovável mais utilizada no mundo e corresponde a 17% da energia elétrica global gerada. No Brasil, as hidrelétricas são responsáveis por cerca de 75% da potência instalada e a formação de barragens para a construção das usinas é relativamente antiga, pois iniciou-se no final do século XIX e teve impulso após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), quando a adoção de hidrelétricas passou a ser relevante na produção de energia brasileira (ANEEL, 2008).

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente modificam as condições originais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens geram uma redução das velocidades da corrente e provocam a deposição gradual dos sedimentos carreados pelo curso d'água, o que ocasiona assoreamento e diminuição gradativa da capacidade de armazenamento do reservatório. Com isso, a operação do aproveitamento hidro energético pode tornar-se inviável com o passar dos anos e pode ocorrer perda da vida útil dos empreendimentos afetados, além de ocasionar impactos ambientais ao ecossistema da represa e aos corpos hídricos associados.

Os danos ambientais e econômicos devido à acumulação de sedimentos nos reservatórios podem ser significativos e de difícil remediação. Dependendo da região, alguns reservatórios menores estão sujeitos a um assoreamento rápido, que pode acontecer até mesmo em uma única enchente (ICOLD, 1989). Além disso, os processos da sedimentação podem ser complexos. Os sedimentos transportados pelo sistema fluvial são primeiramente depositados devido à redução de velocidade da água no reservatório. À medida que os sedimentos se acumulam no lago, a capacidade de armazenamento de água vai diminuindo. Enquanto uma contínua deposição ocorre, há uma redistribuição de sedimentos nos reservatórios influenciada pela operação e também pela ocorrência de grandes enchentes, que normalmente são responsáveis pelos maiores aportes de sedimentos. Quando a vida útil do aproveitamento é afetada pelos depósitos, então são necessárias mudanças na operação do reservatório ou outras medidas que procurem remediar o problema, mas que em geral apresentam custos muito elevados para serem efetivadas.

Em uma hidrelétrica, os estudos sedimentológicos devem ser realizados em todas as fases do aproveitamento, desde o planejamento (inventário, viabilidade e projeto básico) até a fase de operação. Embora esses estudos muitas vezes sejam negligenciados devido ao período de

vida útil projetado para reservatório ser muito grande, tem se verificado que a vida útil dos reservatórios diminui devido às mudanças de uso e ocupação do solo no entorno, tornando necessário ações que reduzam a produção e transporte de sedimentos nas áreas de influência direta dos reservatórios.

É nesse contexto que a tecnologia de sensoriamento remoto se insere como fonte de informação a ser integrada às convencionais medidas diretas da quantidade de sedimentos nos corpos hídricos. Embora o sensoriamento remoto no Brasil seja amplamente utilizado em vários campos do conhecimento, como na agricultura, previsão meteorológica, sistemas de alerta de fogo e de desflorestamento, seu uso para gestão de recursos hídricos ainda não é muito explorado, principalmente em estudos relacionados à qualidade da água e sedimentos.

Dessa forma, este trabalho visou empregar a tecnologia do sensoriamento remoto para avaliar a distribuição espacial e temporal das descargas de sedimentos em um reservatório artificial. Utilizou-se como reservatório de estudo o Aproveitamento Múltiplo Manso (APM Manso), localizado no Estado de Mato Grosso. No trabalho, foram utilizados produtos de sensoriamento remoto dos sistemas Landsat, e MODIS, bem como dados, pluviométricos e de qualidade da água registrados pela operadora do sistema de geração de energia do APM Manso, Furnas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar o uso de imagens orbitais de sensores remotos para análise do comportamento espacial e temporal dos sedimentos em suspensão no reservatório do Aproveitamento Múltiplo Manso.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Fazer análise temporal da concentração de sedimentos a partir de séries temporais de reflectância utilizando dados do sensor MODIS;
- Relacionar os dados da estação de monitoramento pluviométrica e fluviométrica in situ, fornecidos por FURNAS, com os dados temporais de reflectância do sensor MODIS;
- Analisar a distribuição espacial dos sedimentos através da interpretação de imagens do Landsat 8.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS

Um estudo do Banco Mundial mostrou que a vida útil média dos reservatórios existentes em todos os países no Mundo decresceu de 100 para 22 anos, tendo sido avaliado em 6 bilhões de dólares anuais o custo para promover a remoção dos volumes que vão sendo assoreados. Ficou demonstrado também que a perda média anual de volume dos reservatórios devido ao depósito de sedimentos era de 1%, sendo variável de país para outro, bem como de região para outra (MAHMOOD, 1987).

A partir de estudo realizado pela Eletrobrás/IPH (1994), pode-se concluir que a perda de capacidade de armazenamento dos reservatórios no Brasil é de aproximadamente 0,5% por ano. Essa taxa pode corresponder a perdas de capacidade de armazenamento de 2.000×10^6 m³ por ano, o que corresponde a um volume maior do que muitos dos médios reservatórios existentes. Por outro lado, constata-se que a erosão no país tem aumentado com o crescimento da população e do uso do solo (CARVALHO, 1994).

O Brasil já possui muitos reservatórios total ou mesmo parcialmente assoreados. O assoreamento visível normalmente é a menor parte do depósito. Por falta de levantamentos sistemáticos e de sua divulgação, não se conhece a verdadeira situação dos reservatórios do país (CARVALHO, 1994).

2.1.1. Produção de sedimentos

Os processos erosivos são fenômenos naturais do ciclo hidrológico terrestre, no entanto, eles têm sido intensificados pelo homem. Diversos estudos e autores apresentam que a interferência do homem sobre o solo provoca a intensificação dos processos erosivos. Por sua vez, essas intervenções nas bacias hidrográficas têm ocasionado uma produção cada vez maior de sedimentos que são transportados para os rios (MIRANDA, 2011).

Muller (1995) ressalta que a erosão é um problema de duas faces; a primeira deve-se ao fato da mesma dilapidar camadas férteis de solos, prejudicando terrenos utilizados para agricultura, e a segunda quanto à deposição dos materiais erodidos em leitos de rios e reservatórios, interferindo nas funções ambientais e utilização econômica desses corpos hídricos. Do mesmo modo, Branco (1998) citam que os

processos erosivos removem as camadas superficiais dos solos, reduzindo sua produtividade. Além disso, os sedimentos produzidos prejudicam a qualidade das águas e servem como veículo para outros poluentes, como fertilizantes ou produtos químicos que são adsorvidos a estes materiais.

A erosão corresponde à separação e remoção das partículas das rochas e dos solos devido à ação dos ventos e principalmente das águas e constitui o processo inicial da sedimentação e nela reside a fonte dos problemas decorrentes dos sedimentos no ambiente (CARVALHO et al., 2000).

Em sua maior parte, os sedimentos em suspensão têm origem na erosão pluvial, que consiste primeiramente na desagregação do material, que é a separação das partículas de solo pelo impacto das gotas, e pela ação cisalhante do escoamento das águas da chuva. Este processo transporta os sedimentos mais finos. Mas o transporte das partículas desagregadas dentro do canal também ocorre por meio do rolamento de partículas de sedimentos de tamanho médio e grande, tornando um importante mecanismo de transporte em terrenos inclinados (SHI et al., 2012).

A erosão fluvial ocorre de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios, transportando e distribuindo os sedimentos em suspensão e para as margens do canal. No processo de erosão fluvial, o transporte e deposição de sedimentos são definidos de acordo com os parâmetros hidráulicos do canal, ou seja, são definidos pela velocidade e turbulência do fluxo e também pelas características das partículas (CUNHA, 2012). Já a produção de sedimentos em suspensão em um reservatório durante a seca é consequência do processo de erosão do canal, gerando materiais com granulometria maior. Nas estações chuvosas, a erosão do solo das encostas, causada pelo escoamento superficial das águas pluviais, gera sedimentos relativamente mais finos e são transportados através dos afluentes até as margens do reservatório (XU, 2002).

A produção de sedimentos refere-se à quantidade que uma bacia exporta em um determinado período de tempo. Ela pode ser expressa em termos absolutos (t/ano) ou com relação à área drenada ($t/\text{km}^2.\text{ano}$), que é denominada de produção de sedimento específica ou taxa de produção de sedimento. Normalmente, a produção de sedimento de uma bacia é calculada a partir de programas de monitoramento da descarga sólida nos rios ou por meio da medição do volume de sedimentos acumulado em reservatórios e lagos (CHEPAR, 1999).

2.1.2. Transporte e deposição de sedimentos

Com relação ao transporte e a velocidade de sedimentação, verifica-se que existem diferenças de um reservatório para outro, sendo esses processos condicionados pela vazão, tempo de residência e seção transversal dos rios que formam o reservatório, além da característica morfométrica do sistema, localização e uso da bacia hidrográfica (CARVALHO, 2000).

O curso d'água, ao entrar no reservatório, tem as áreas de seções transversais aumentadas, enquanto as velocidades da corrente decrescem, criando condições de deposição de sedimento. As partículas mais pesadas, como pedregulhos e areias grossas, são as primeiras a se depositar enquanto o sedimento mais fino adentra ao reservatório. A barragem constitui um impedimento à passagem da maior parte das partículas para jusante, que apenas pode ocorrer com o escoamento pelo vertedouro e pelos condutos (CARVALHO et al., 2000).

Para Glymph (1973), a quantidade de sedimento depositada em um dado reservatório depende da quantidade de material em suspensão enviada para o mesmo e da capacidade do reservatório reter as partículas em suspensão.

Segundo Vanoni (1977), a deposição e a distribuição dos sedimentos dentro de um reservatório dependem de vários fatores como declividade de escoamento, a geometria do reservatório, o modo como este é operado, as características minerais das partículas finas e as características química das águas.

Para Mahmood (1987), vários fatores influenciam a formação dos depósitos, sendo que os principais são a quantidade de sedimentos afluentes, a eficiência de retenção do sedimento no reservatório, a densidade dos depósitos e o volume de sedimento depositados. Já os fatores que contribuem para o transporte dos sedimentos são vários, podendo ser citado como principais a quantidade e intensidade das chuvas, o tipo de solo e da formação geológica, a cobertura e o uso do solo, a topografia, a erosão das terras, o escoamento superficial, as características dos sedimentos e as condições morfológicas do canal.

Sedimentos que se depositam pela influência do reservatório se estendem para montante e para jusante, não se distribuindo uniformemente dentro do lago. A deposição de montante se denomina depósito do remanso (backwater deposit), em referência ao fenômeno hidráulico, sendo também remontante à medida que aumentam os depósitos nessa área. As deposições de dentro do reservatório são chamadas de delta (delta), depósito de margem (overbank) e depósito do

leito (bottom-set deposit). O delta se forma com sedimentos grossos, enquanto os depósitos do interior se formam com sedimentos mais finos. As enchentes produzem outro tipo de deposição ao longo do curso d'água e do reservatório e que é denominada depósito de várzea ou depósito de planície de inundação (MAHMOOD, 1987).

Esses depósitos causam diferentes impactos ou consequências. Os depósitos de remanso criam problemas de enchentes a montante. Os depósitos do interior do lago causam a redução da capacidade de armazenamento, sendo que a variação do nível d'água condicionará a formação do delta. Enquanto a maior parte dos depósitos do delta reduzem gradualmente a capacidade útil do reservatório, os depósitos do leito reduzem o volume morto. Parte do delta também fica contida no volume morto. Os sedimentos que alcançam a barragem e passam pelo vertedouro e condutos, provocam abrasões nas estruturas, comportas, tubulações, turbinas e outras peças (CARVALHO et al., 2000).

2.2. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A RECURSOS HÍDRICOS

Sensoriamento remoto é a ciência de obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação (AVARY; BERLIN, 1992). De acordo com Novo (1998), o princípio básico consiste em transformar a radiação eletromagnética que chega ao sensor em sinal passível de interpretação, na forma de processamento fotográfico, eletrônico, entre outros. Esse sinal poderá ser analisado comparando-se os diversos níveis de reflectância (parcela da radiação eletromagnética incidente que é refletida pela matéria) com dados de comportamento espectral (curvas de reflectância dos objetos coletados sob as diversas condições ambientais e experimentais) dos principais componentes da superfície terrestre: a vegetação, os solos, a água, as superfícies construídas (concreto, asfalto), dentre outras.

A detecção remota tem se mostrado útil em estudos ecológicos, hidrológicos e geomorfológicos. Seu valor em regiões de difícil acesso tem sido demonstrado em estudos da Bacia Amazônica, onde as variações sazonais na área de inundação de floresta são necessárias para avaliar as propriedades biogeoquímicas (SMITH, 1992). Schutz apud Eid e Campana(1999) cita que a utilização do sensoriamento remoto e dos sistemas de informações geográficas têm sido bastante úteis e satisfatório no manejo dos recursos hídricos, destacando-se como

exemplo o monitoramento do assoreamento de um reservatório na Alemanha e a previsão e controle de enchentes utilizando-se radares meteorológicos.

O uso do sensoriamento remoto, especialmente nos comprimentos de onda do infravermelho próximo (IVP) e micro-ondas, tem sido utilizado no mapeamento da extensão de corpos d'água e da superfície devido à alta absorção do IVP e à reflectância das micro-ondas pela água (SMITH, 1997). Em ambos os casos, um corpo d'água superficial parece muito escuro e tem alto contraste com a cobertura terrestre circundante. Algumas das técnicas aplicadas à morfometria de lagos incluem:

- a) digitalização direta na tela;
- b) estimativa do Índice de Diferença de Água Normalizada (NDWI) ou o NDWI modificado (MNFDWI);
- c) corte de densidade baseado em um valor que define o limiar água-terra.

A detecção remota também tem sido utilizada com sucesso para estimar o nível de água de lagos utilizando imagens ópticas de satélite de alta e média resolução e dados auxiliares. Baup et al. (2014) usou dados de altimetria de satélite juntamente com imagens de alta resolução para estimar o volume de um lago no sudoeste da França. Sima e Tajrishy (2013) fizeram o mapeamento do lago Urmia no Irã utilizando dados de altimetria de radar e imagens de satélite para desenvolver equações de modelagem analítica para calcular as características de volume, área e elevação.

Os sensores utilizados para estudos hidrológicos podem ser classificados em dois tipos: (1) passivo, no qual o sensor recebe energia naturalmente retida ou emitida a partir da superfície terrestre; e (2) ativo, na qual o sensor fornece sua própria iluminação e registra a quantidade de energia incidente retornada da superfície da imagem. Os sensores ativos são importantes para estudos em áreas que possuem períodos de chuva prolongados, porém a fraca resolução espacial dos radiômetros de micro-ondas aplica-se apenas a áreas muito grandes (SMITH, 1997).

Os sensores passivos que têm sido mais utilizados possuem as bandas do visível e do infravermelho. Dentre eles estão os empregados nos diversos satélites Landsat, como o *Multispectral Scanner (MSS)*, o *Thematic Mapper (TM)* e o mais recente, o *Operational Land Imager (OLI)*. Também se pode citar o *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*, o *Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT)*, o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*

Radiometer (ASTER) e o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS).

2.2.1. Comportamento espectral da água

Segundo Novo e Ponzoni (2001), a absorção de luz no meio aquático é decorrente da presença de quatro componentes básicos: a própria água, substâncias dissolvidas na água (substância amarela ou matéria orgânica), biota fotossintetizadora (fitoplâncton e macrófitas, quando presentes) e partículas não vivas (partículas orgânicas mortas e partículas inorgânicas).

Ao conduzir uma investigação de sensoriamento remoto de corpos d'água, é primeiramente útil entender como a água pura seletivamente absorve e/ou espelha a radiação incidente ou a luz solar descendente na coluna d'água. Depois é importante considerar como a luz incidente é afetada quando a coluna d'água não é pura, mas contém materiais orgânicos e inorgânicos (BUKATA et al., 1995).

Uma característica notável é que a quantidade mínima de absorção e espalhamento da luz incidente na coluna d'água, portanto com melhor transmissão, ocorre no comprimento de onda do azul (400 a 500 nm), com o valor mínimo localizado em aproximadamente 460-480 nm. Nesses comprimentos de onda, do violeta ao azul claro, a luz penetra mais do que qualquer outro tipo de luz na coluna d'água (JENSEN, 2011).

Os melhores comprimentos de onda para discriminar terra de água pura são o infravermelho próximo e o infravermelho médio (740 – 2500 nm). Nessas regiões do espectro eletromagnético, os corpos d'água aparecem muito escuro, mesmo pretos, porque eles absorvem praticamente todo o fluxo radiante incidente, especialmente quando a água é profunda e pura ou sem a presença de sedimentos em suspensão ou matéria orgânica. De forma oposta, as coberturas da terra, tipicamente compostas por vegetação, refletem quantidades significativas de energia no infravermelho próximo e médio. Consequentemente essas coberturas aparecem relativamente claras nas imagens obtidas nessas bandas (JENSEN, 2011).

Muitos corpos naturais de água contêm uma variedade de constituintes orgânicos (clorofila *a*, por exemplo) e inorgânicos (minerais em suspensão na água). Quando as águas naturais contêm uma mistura desses materiais, um dos problemas mais difíceis é extrair informações quantitativas sobre esses constituintes específicos a partir de dados de sensoriamento remoto (DOROXAN et al., 2002).

Minerais ricos em silício, alumínio e óxidos de ferro são encontrados em suspensão em muitos corpos d'água naturais. As partículas variam de argila fina para silte e areia fina a grosseira. Os sedimentos são provenientes de uma variedade de fontes, incluindo erosão de áreas agrícolas, o intemperismo de terrenos montanhosos, a erosão costeira causada por ondas naturais ou tráfego de barcos e as erupções vulcânicas. A maior parte dos sedimentos em suspensão está concentrada em corpos d'água interiores ou costeiros (BUKATA et al., 1995).

Monitorar o tipo, a quantidade e a distribuição espacial de sedimentos em suspensão em corpos d'água interiores e costeiros é muito importante, pois a erosão do solo em uma bacia hidrográfica lança uma carga de sedimentos nos corpos d'água que resulta em assoreamentos mais rápidos dos rios, reservatórios obras para controle de inundação e estuários, podendo diminuir sua vida útil e funções ambientais (JENSEN, 2011).

Doxaran et al. (2002) usaram dados do satélite SPOT para medir sedimentos em suspensão no estuário Gironde na França. As melhores correlações entre os dados do SPOT e os sedimentos em suspensão foram obtidas usando a banda do infravermelho próximo atmosféricamente corrigida. De forma similar, Binding et al. (2005) concluíram que o sucesso do uso dos comprimentos de onda do infravermelho próximo para medir sedimentos em suspensão depende do fato de que em águas com turbidez elevada existe espalhamento suficiente para haver forte absorção pela água nesse comprimento de onda. Em águas com turbidez baixa, os comprimentos de onda adequados para o desenvolvimento de algoritmos para quantificar sedimentos em suspensão podem ser restritos à região do visível.

2.2.2. Índice de diferença normalizada da água - NDWI

Existem alguns métodos e técnicas de processamento de imagens de sensoriamento remoto para análises hidrológicas. Dentre eles, há os que utilizam uma banda única e as análises são feitas de acordo com as diferenças de reflectividade entre os corpos de água e outros alvos da superfície. Para esses estudos, normalmente são selecionadas as bandas de infravermelho médio ou a do infravermelho próximo, pois a água tem forte absorção nessas faixas espectrais, enquanto a vegetação e o solo têm forte reflexão. No entanto, esses métodos falham em áreas montanhosas, onde os efeitos de sombra do terreno são difíceis de

eliminar e pequenos corpos d'água podem ser ignorados durante o processo de extração de informações (GAO, 1996).

Ao utilizar imagens de sensores com várias bandas como fonte de dados, é possível a aplicação de métodos de delimitação multi-banda, que são amplamente utilizados para delimitação de corpos d'água. Esses métodos extraem corpos d'água com base na característica de reflectância de cada faixa, dentre eles estão o método de relação espectral multi-bandas, o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) e a transformação de *Tasseled Cap*.

O NDWI foi desenvolvido por McFeeters (1996) e tem sido amplamente utilizado. Este método é derivado do Índice de diferença normalizada da vegetação (NDVI) para a detecção e caracterização da vegetação. O NDVI utiliza radiações ou reflectâncias de um canal vermelho em torno de 0,66 µm e um canal próximo de IV em torno de 0,86 µm. O canal vermelho constitui uma região espectral de forte absorção de clorofila, enquanto o canal de IR apresenta alta reflectância pelas copas de vegetação (BORGES, et al.).

O NDWI foi desenvolvido para delinear recursos de águas abertas e melhorar sua presença em imagens digitais de sensoriamento remoto. O índice faz uso da radiação refletida do infravermelho próximo e da luz verde visível para realçar a presença da água ao eliminar a presença de características da terra e da vegetação terrestre. O NDWI também pode fornecer estimativas de turbidez de corpos de água usando dados digitais de sensoriamento remoto (McFETERS, 1996) e apresenta a seguinte Equação (1):

$$NDWI = \frac{VERDE - IVP}{VERDE + IVP} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

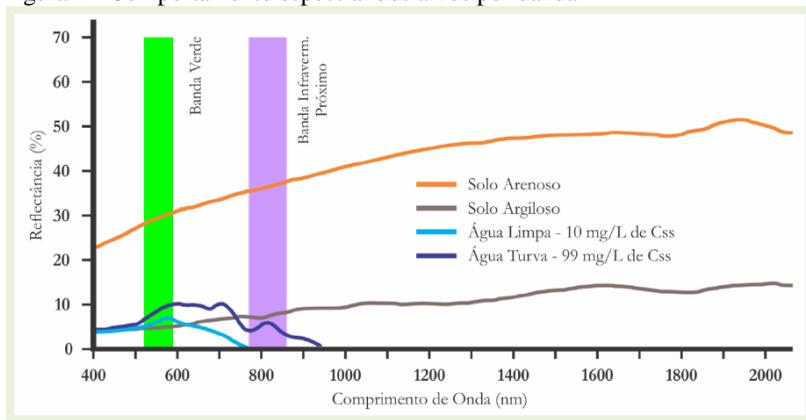
NDWI= Índice de diferença normalizada da água

VERDE= Faixa espectral verde visível

IVP= infravermelho próximo

Analisando a Figura 1, que mostrada os comprimentos de onda em relação à reflectância dos alvos, nota-se que os valores de reflectância da banda verde para feições de solo são menores em comparação com os valores da banda do infravermelho próximo, e esta relação inverte quando o alvo são corpos hídricos (FERREIRA; PEREIRA, 2009).

Figura 1 - Comportamento espectral dos alvos por banda



Fonte: Adaptado de Ferreira e Pereira Filho (2009).

Dada a diferença inversamente proporcional entre a reflectância dos alvos, entende-se que se o valor obtido do processamento do NDWI for negativo prevalece solo em relação à água, e se for positivo, prevalece a água em relação ao solo. Quanto mais positivo for o pixel obtido, maior é a pureza da água e menor será a concentração de sedimentos em suspensão (MCFEETERS, 1996).

2.2.3. Sensores Imageadores

Um imageador é um instrumento que a cada instante capta a energia eletromagnética da radiação de pequenas amostras de área da superfície terrestre (pixel), convertendo-a, através dos detectores, em um sinal elétrico cuja intensidade é correspondente à intensidade da radiação de cada pixel (MENESES; ALMEIDA, 2012).

O sinal elétrico, amplificado e filtrado, é amostrado e quantizado em valores digitais dentro de um valor escalar dimensionado em bits. A conversão ou relação entre o nível do sinal analógico/digital (conversor A/D) é feito usualmente com um quantizador linear que converte o sinal para o valor digital inteiro mais próximo. Com o uso de software de processamento de imagens, os valores digitais de uma imagem são convertidos em valores de brilho (tons de cinza) quando a imagem é exposta em um monitor de vídeo, tal que o valor digital zero converte-se em um nível de brilho escuro e o valor digital máximo em um nível de brilho claro, entre eles, estabelecendo-se

uma escala linear de brilhos de tons cinza (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.2.3.1. Landsat TM

O Mapeador Temático (TM) foi desenvolvido na década de 1970 como sucessor do sistema scanner multiespectral (MSS), que equipava as três primeiras missões Landsat. O projeto dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres oferecia melhorias na resolução espacial, radiométrica e geométrica das imagens (MARKHAM et al., 2004).

Os dados das imagens Landsat 4-5 TM consistem em sete faixas espectrais (Quadro 1), com resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 7. A faixa do infravermelho termal 6 era coletada a 120 metros, mas foi re-amostrada para 30 metros. O tamanho aproximado da cena é de 170 km norte-sul por 183 km leste-oeste e oferecem imagens a cada 16 dias (USGS, 2015a).

Quadro 1- Faixas espectrais Landsat MSS e TM

Sensor	Banda	Faixa espectral (μm)		Res. Espacial
MSS	4	0,5 - 0,6	verde	80 m
	5	0,5 - 0,7	vermelho	80 m
	6	0,5 - 0,8	IV próximo	80 m
	7	0,5 - 0,9	IV próximo	80 m
TM	1	0,5 - 0,10	azul	30 m
	2	0,5 - 0,11	verde	30 m
	3	0,5 - 0,12	vermelho	30 m
	4	0,5 - 0,13	IV próximo	30 m
	5	0,5 - 0,14	IV intermed	30 m
	6	0,5 - 0,15	IV termal	120 m
	7	0,5 - 0,16	IV médio	30 m

Fonte: Adaptado USGS, 2015.

2.2.3.2. Landsat OLI

O projeto Imageador Operacional da Superfície (OLI) é a mais avançada tecnologia de sensores Landsat a bordo do satélite Landsat-8.

Suas imagens têm resolução espacial pancromáticas de 15 metros e as demais bandas de 30 metros ao longo de uma faixa de 185 quilômetros de largura cobrindo grandes áreas da paisagem da Terra, fornecendo resolução suficiente para distinguir características como centros urbanos, fazendas, florestas e outros usos da terra (NASA, 2016).

O Landsat-8 possui dois sensores separados: o OLI e o Thermal Infrared Radiometer Suite (TIRS), que imageia a superfície terrestre em todas as partes visíveis e térmicas do espectro. Comparado aos sensores antecedentes do Landsat, o OLI tem características avançadas, que incluem a sua resolução radiométrica de 12 bits e a adição de uma banda centrada a 443 nm (PAHLEVAN, 2014).

A qualidade e quantidade de dados extremamente melhorada expande as aplicações existentes das imagens do Landsat, principalmente nos estudos da água, tais como concentrações próximas da superfície de clorofila-a e sólidos suspensos totais (PAHLEVAN, 2014).

As bandas espectrais do sensor OLI (Quadro 2), são as mesmas do sensor ETM do Landsat 7, com a adição de duas novas bandas espectrais: um canal visível de azul profundo (banda 1) e um novo canal infravermelho (banda 9) para a detecção de nuvens cirrus (USGS, 2015b).

Quadro 2- Faixas espectrais Landsat ETM e OLI

Sensor	Banda	Faixa espectral (µm)		Res. Espacial
ETM +	1	0,441 - 0,514	azul	30 m
	2	0,519 - 0,601	verde	30 m
	3	0,631 - 0,692	vermelho	30 m
	4	0,772 - 0,898	IV próximo	30 m
	5	1,547 - 1,749	IV onda curta	30 m
	6	10,31 - 12,36	IV termal	60 m
	7	2,064 - 2,345	Pan	15 m
OLI	1	0,435 - 0,451	aerosol	30 m
	2	0,452 - 0,512	azul	30 m
	3	0,533 - 0,590	verde	30 m
	4	0,636 - 0,673	vermelho	30 m

Fonte: Adaptado NASA, 2016.

2.2.3.3. MODIS

Os espectrorradiômetros de resolução de imagem moderada (MODIS), a bordo do NASA EOS (*Earth Observation System*) Terra e Aqua, foram lançados em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente (CHOI, 2013). O Terra MODIS e Aqua MODIS observam toda a superfície da Terra a cada 1 a 2 dias, adquirindo dados em 36 faixas espectrais, ou em grupos de comprimentos de onda com resolução radiométrica de 16 bits. Esses dados ajudaram a melhorar a compreensão da dinâmica e processos globais que ocorrem na superfície, nos oceanos e na atmosfera mais baixa. O MODIS tem um papel importante no desenvolvimento de modelos de sistemas terrestres globais e são capazes de prever as mudanças globais com precisão suficiente para ajudar em decisões políticas e em proteção do meio ambiente (CHOI, 2013).

Os produtos de dados científicos de alta qualidade são continuamente produzidos a partir da radiação e reflectância calibradas pelo sensor e distribuídos a usuários em todo o mundo para uma ampla gama de estudos sobre as propriedades terrestres, oceânicas e atmosféricas da Terra e suas mudanças no tempo. As observações MODIS são feitas em 20 bandas solares reflexivas (RSB) e 16 bandas emissivas térmicas (TEB) (XIONG, 2005).

As bandas do MODIS para o estudo da superfície terrestre possuem resolução espacial de 250 m (para os canais do vermelho e infravermelho próximo) e 500 m (para as bandas do azul, verde e infravermelho médio). Um resumo dos produtos gerados pelo MODIS (MODLAND) para o estudo dos ecossistemas terrestres pode ser verificado no Quadro 3.

Quadro 3- Produtos da superfície gerados pelo MODIS

Módulos	Produtos
PRODUTOS DE BALANÇO DE ENERGIA	
MOD 09	Reflectância da superfície
MOD 11	Temperatura da superfície e Emissividade
MOD 43	Albedo/BRDF
MOD 10 E 29	Cobertura de neve e extensão de gelo no mar
PRODUTOS DE VEGETAÇÃO	
MOD 13	Índices de vegetação (NDVI)
MOD 15	Índices de área verde (NDVI)
MOD 17	Fotossíntese e produtividade primária
PRODUTOS DA COBERTURA TERRESTRE	
MOD 12	Cobertura da terra
MOD 14	Anomalias termais
MOD 44	Conversão de cobertura vegetal

Fonte: Adaptado de Justice et al. (2002).

3. METODOLOGIA

Para realização do trabalho inicialmente foi definida e delimitada a área de drenagem do reservatório utilizando o programa ArcHydro, uma extensão do ArcGIS® 10.1 (ESRI, 2012). Depois foram selecionadas as imagens de reflectância da superfície do Landsat 8 e Landsat 5 através do portal Earth Explorer do Departamento Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2016a).

Em uma segunda etapa, realizou-se o processamento para extrair o NDWI das imagens de reflectância superficial dos Landsat, permitindo uma melhor análise da distribuição espacial dos sedimentos no reservatório no período de seca e chuvoso em diferentes anos. Para fazer a análise temporal e do comportamento dos sedimentos, primeiramente foi extraída uma série temporal de dados de reflectância obtidas em imagens do MODIS utilizando o aplicativo AppEARS (USGS, 2016b). A seguir, os dados extraídos foram correlacionados com dados do monitoramento hidrológico e sedimentológico feitos in situ, cedidos por Furnas, empresa responsável pelo APM Manso.

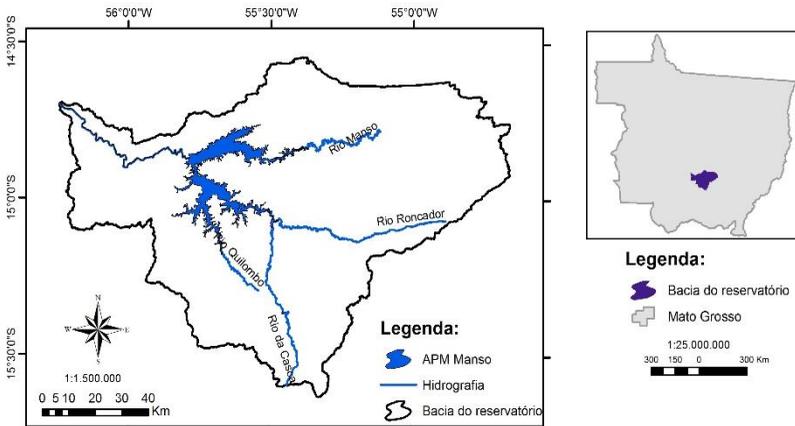
3.1. ÁREA DE ESTUDO

A bacia de estudo (Figura 2) é a do reservatório do Aproveitamento Múltiplo Manso (APM Manso) localizada no estado de Mato Grosso, na Bacia do Alto Paraguai, aproximadamente entre as coordenadas geográficas de latitude -14,546388/-15,634443 e longitude -56,242778/-54,66028.

O APM Manso é um reservatório que possui diferentes finalidades, por isso o conceito de aproveitamento múltiplo (APM), dentre eles está o de geração de energia hidrelétrica, com potência instalada de 212 MW. Mas a principal finalidade do reservatório é a regularização da vazão e controle de cheias no rio Cuiabá. O que levou à sua idealização foi uma grande cheia ocorrida em 1974 que causou enormes prejuízos na cidade de Cuiabá, levando a necessidade de se buscar alternativas para a contenção das inundações na área urbana.

Para delimitação da área de estudo utilizou-se o processo automático de delimitação de bacias hidrográficas no ArcHydro, em que são utilizadas informações de relevo de um Modelo Digital do Terreno (MDT). O MDT utilizado no trabalho é o da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e os dados estão disponíveis no portal eletrônico do USGS (USGS, 2015c).

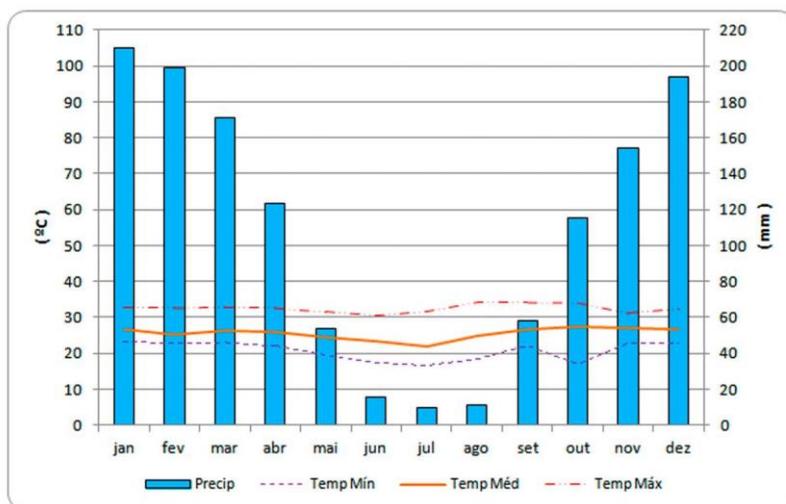
Figura 2- Bacia do reservatório APM Manso e principais afluentes



Fonte: Do autor, 2016.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região sul do estado de Mato Grosso, onde se localiza a bacia hidrográfica, é do tipo Aw -Tropical Chuvoso (FIGUEIREDO, 2007). Existem duas estações bem definidas: quente (temperaturas altas durante todo o ano, com média anual de 25,6 °C) e semiúmido (total anual de chuvas em torno de 1300 mm, mas com 4 a 5 meses secos, isto é, com precipitação inferior a 60 mm). O regime de chuvas é controlado principalmente por massas de ar equatoriais e tropicais. Nesse clima, o inverno se caracteriza como estação seca (maio/setembro), apresentando apenas cerca de 15% dos totais anuais de chuva. Já o verão se caracteriza como uma estação quente e úmida, marcada por temperaturas médias mensais entre 26 e 27°C e totais mensais de chuva em torno de 200 mm no trimestre de verão (Figura 3).

Figura 3- Gráfico climatológico da bacia do Manso



Fonte: INMET, 2015.

Nos aspectos hidrológicos, a bacia apresenta padrões de comportamento diferentes em seus setores norte e sul. No setor norte da bacia os rios são mais sinuosos, há maior densidade de drenagem e verifica-se uma superfície com menor grau de dissecação e maior declividade. Já no setor sul as amplitudes altimétricas e a média percorrida pelas encurradas são maiores, o grau de entalhamento e dissecação é mais expressivo e o relevo é mais colinoso, tornando essa região mais vulnerável aos processos erosivos (CANDIDO; SANTOS, 2010).

O lago do APM Manso possui as características morfométricas e hidrológicas apresentadas na Tabela 1, que permitem classificá-lo como médio em relação à área inundada e ao volume e pertence à classe C quanto ao tempo de retenção ($RT > 1$ ano).

Tabela 1- Dados de operação APM Manso

Dados do reservatório	
Bacia hidrográfica:	9365 km ²
Área inundada:	427 km ²
Volume acumulado:	7,3 x 10 ⁹ m ³
Volume útil:	2951 x 10 ⁶ m ³
Nível normal de operação:	287 m
Nível de maximorum:	289,8 m
Nível de desapropriação:	290,8 m
Nível mínimo de operação:	278 m

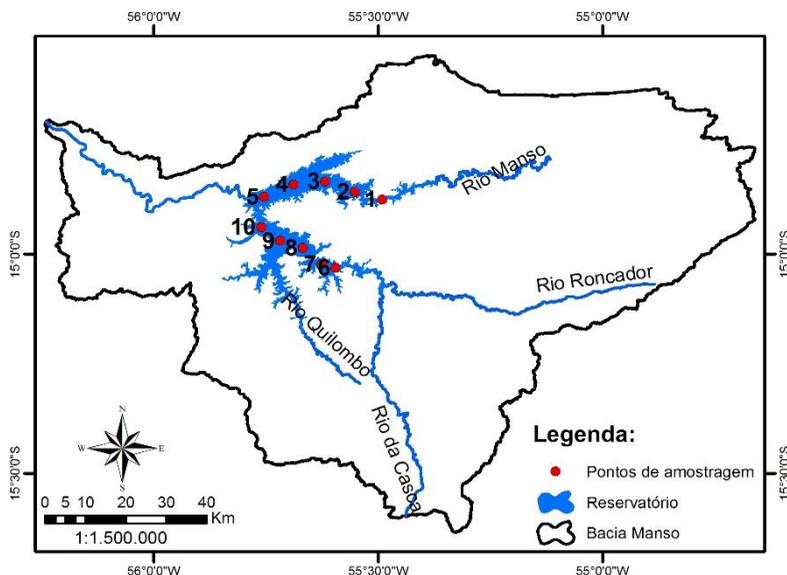
Fonte: FURNAS, 2007.

O enchimento completo do reservatório ocorreu durante um ano (dezembro/1999 a dezembro/2000) e é formado principalmente pela contribuição das águas dos rios Manso e Casca, que se confluíam próximo ao local onde hoje é a barragem, o que permitiu a formação de um lago bifurcado, cujas condições hidrogeoquímicas são distintas em cada braço (NETO et al., 1993).

As áreas de drenagem dos rios Manso e da Casca, a montante do reservatório, bem como parte do reservatório, estão localizadas nas unidades de paisagem denominadas Compartimentos Morfopedológicos MP1 e MP3 da bacia do rio Cuiabá. Porém, uma pequena parte das cabeceiras do Manso pertencem ao MP5, que está inserido na Unidade Morfoestrutural da Província Serrana contida na bacia do rio Cuiabá, compreendendo um conjunto de relevos condicionados por estruturas dobradas e falhadas, originando uma sucessão de anticlinais e sinclinais alongadas e nítidas rupturas de declive nas encostas e escarpas, fortemente dissecadas pelos processos erosivos (SALOMÃO et al. 2009).

Para realização do estudo, foi necessário selecionar alguns pontos amostrais (Figura 4) dentro do reservatório para serem extraídos os valores de reflectância que serviram como pontos de monitoramento para a análise espacial e temporal dos sedimentos em suspensão.

Figura 4- Localização dos pontos de amostragem



Fonte: Do autor, 2016.

3.2. DADOS UTILIZADOS

3.2.1. Imagens Landsat

Para fazer a análise da distribuição espacial dos sedimentos foram utilizadas imagens de reflectância superficial dos sensores OLI-Landsat 8 (*Path*: 226; *Row*: 70 e 71). As imagens possuem resolução espacial de 30 metros e já são corrigidas e calibradas para efeitos atmosféricos. Elas foram obtidas gratuitamente por meio de solicitação na página Earth Explorer (USSG, 2016a).

Foram selecionadas cenas do período de seca e do período chuvoso, sem a predominância de nuvens, em diferentes anos. Procurou-se selecionar aquelas com datas mais próximas às das coletas de amostras de água para análise de sedimentos feitas *in situ* pelo monitoramento de FURNAS.

As datas selecionadas foram: 03/08/2015, 27/11/2015.

3.2.2. Imagens MODIS

Para fazer a análise temporal dos sedimentos em suspensão no reservatório utilizou-se o produto de reflectância da superfície MOD09 do satélite Terra, que são fornecidas calibradas, georreferenciadas e com atmosfera corrigida. As imagens escolhidas são do tipo A1, com resolução espacial de 500 metros e as bandas utilizadas foram b02 (infravermelho próximo) e b04 (verde).

O MODIS fornece dados diários de áreas tropicais, mas as cenas utilizadas possuem resolução temporal de 8 dias pois isso reduz a quantidade de imagens com nuvens e a quantidade de dados para serem analisados.

Para realização do estudo, as imagens do MODIS não precisaram ser baixadas e processadas, uma vez que selecionadas as datas o processo de extração dos dados é realizado diretamente pelo aplicativo AppEARS (USGS, 2016b). Foram extraídos dados do período entre 01/03/2000 e 01/06/2016, que retornaram 6714 valores de reflectância para cada banda, nos 10 pontos de amostragem.

3.2.3. Dados do monitoramento in situ

Os dados hidrológicos e sedimentológicos coletados in situ foram adquiridos por meio de solicitação de acesso à informação à empresa Furnas, responsável pelo APM Manso. Os dados de monitoramento disponibilizados são de sedimentos, descarga sólida e precipitação. Foram disponibilizados também os dados operativos do reservatório contendo o nível do reservatório, vazão e volume útil.

Os dados operativos da UHE Manso são monitorados diariamente desde 15/12/2000, pois são fundamentais para a operação da usina hidrelétrica, portanto não apresentam falhas. Os dados hidrológicos são das estações hidrométricas que possuem medição de sedimentos, listadas na Tabela 2. As estações possuem datas de coletas distintas, não seguindo um padrão cronológico e apresentam muitas falhas nas séries históricas.

Tabela 2- Localização dos pontos de amostragem

Nome	Código	Latitude	Longitude
UHE Manso Montante	66162000	-14,809873	-55,27607
UHE Manso Rio da Casca	66171400	-15,21371	-55,6413
UHE Manso Rio Quilombo	66174000	-15,213391	-55,64193
UHE Manso Rio Roncador	66171500	-15,091803	-55,441974

Fonte: Do autor, 2016.

As séries históricas de precipitação diária foram extraídas na página da Agência Nacional de Águas, no portal Hidroweb (ANA, 2016), selecionando as estações pluviométricas UHE Manso Montante (1455004) e Perezópolis (1454003), na cabeceira do rio Manso. Devido ao imageamento do MODIS não ser diário, foi utilizado um acumulado de 5 dias de chuva para relacionar com a data da imagem.

3.3. PROCESSAMENTO

Foram empregados processamentos diferentes para realizar a análise espacial e a análise temporal dos sedimentos no reservatório. A análise espacial requer maior nível de detalhamento, portanto necessita-se de imagens com boa resolução espacial. O processamento utilizado para a análise das imagens do Landsat foi o NDWI.

Depois que foram adquiridas as imagens do Landsat, foi feito o mosaico das duas rotas (70 e 71) nas imagens das bandas verde e infravermelho próximo, banda 3 e 5 respectivamente. Posteriormente, os mosaicos foram cortados com as dimensões do retângulo envolvente da bacia (S -14,546388/-15,634443; O -56,242778/-54,66028), de forma a diminuir a quantidade de dados para processamento.

O processamento dos mosaicos foi feito no software Arcgis® 10.1 (ESRI, 2012), utilizando operações aritméticas na ferramenta *Raster Calculator*. A operação utilizada foi:

$$C = \frac{(A - B)}{(A + B)}$$

Para o A foi atribuído a banda verde e no B a banda do infravermelho próximo, gerando uma imagem C de 32 bits reais. Com isso, foi criado um Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), gerando imagens com valores entre -1 a 1 para cada pixel e assim possibilitando distinguir quão pura é a água em um pixel selecionado.

Como a visão humana não consegue distinguir muitos níveis de cinza, as imagens foram classificadas atribuindo cores para intervalos de valores de pixel, melhorando a visualização e interpretação. O método de classificação utilizado foi pixel a pixel não-supervisionado, com 15 intervalos e cores diferentes.

O processamento da série temporal de 16 anos das imagens MODIS utilizados para fazer a análise temporal foi realizado automaticamente na página da LP DAAC/USGS através da ferramenta AppEEARS (USGS 2016b). O aplicativo possui um algoritmo que faz a extração dos valores de reflectância por banda e oferece também um índice de qualidade de cada dado.

Para gerar a série temporal de reflectância, primeiramente são escolhidos os pontos de amostragem, inserindo suas coordenadas geográficas. Depois é escolhido o intervalo de datas e o produto do MODIS que será utilizado para análise.

Depois de realizada a solicitação de extração da reflectância, ficam disponíveis os gráficos interativos com os resultados. Também é possível fazer o download da planilha com todos os dados.

O AppEEARS seleciona todas as imagens do período e não exclui aquelas com a presença de nuvens, por isso é oferecido uma banda com o índice de qualidade do pixel. Com isso, depois que foi feito o download da planilha, foram filtrados e excluídos os dados de qualidade ruim e que apresentam características de nuvens e de vegetação, pois o objetivo do estudo é a análise apenas da água. Ao final, de todos os 6714 dados adquiridos para cada banda foram utilizados somente 60% para análise.

3.4. ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL

Para a análise temporal utilizou-se a planilha gerada pelo AppEEARS com a série de dados. Com isso, foram feitos gráficos de dispersão e os dados das imagens foram relacionados com os valores do monitoramento pluviométrico e fluviométrico in situ, com o nível do reservatório, precipitação e concentração de sedimentos em suspensão.

Para fazer a análise espacial dos sedimentos foram extraídos das imagens e plotados no Excel os valores do NDWI dos pontos de

amostragem. Depois, também foram criados gráficos de dispersão e correlacionados com os valores medidos in situ.

Para fazer a correlação dos dados foram utilizadas regressões lineares simples e as análises foram feitas por avaliação qualitativa dos gráficos de dispersão e avaliação quantitativa dos coeficientes de Pearson (R) e de determinação (R^2).

O coeficiente de correlação de Person é uma medida do grau de relação entre duas variáveis quantitativa e varia entre os valores -1 e 1. O valor zero significa que não há correlação, 1 indica uma relação perfeita e -1 uma relação inversamente perfeita, ou seja, quanto mais próximo de -1 e 1, mais forte é a relação entre os dados (Tabela 3).

Tabela 3- Interpretação dos coeficientes de correlação

Escala de Pearson		
Fraca	Moderada	Forte
$0,0 \leq R \leq 0,5$	$0,5 \leq R \leq 0,9 \leq 1$	$0,9 \leq R \leq 1$
$0,0 \leq R^2 \leq 0,25$	$0,25 \leq R^2 \leq 0,81$	$0,81 \leq R^2 \leq 1$

Fonte: Adaptado Lopes et al., 2014.

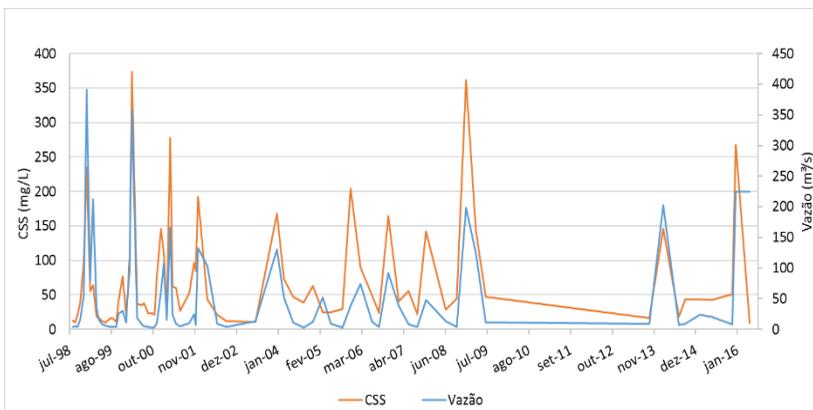
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DOS DADOS

4.1.1. Hidrossedimentologia

A primeira abordagem do estudo hidrossedimentológico consiste em entender a variabilidade sazonal do comportamento dos sedimentos gerados pelo rio Manso, com base nos dados medidos in situ. Os dados de concentração de sedimentos em suspensão foram plotados no gráfico juntamente com a vazão do mesmo período para observar a relação entre eles e fazer uma análise da consistência dos dados. Na Figura 5 é possível observar que o monitoramento sedimentológico não é feito com a mesma frequência, até 2001 era feito mensalmente, depois as análises eram trimestrais e a partir de 2009 apresentam muitas falhas. Mas consegue-se perceber que há uma relação positiva entre a vazão e a concentração dos sedimentos em suspensão.

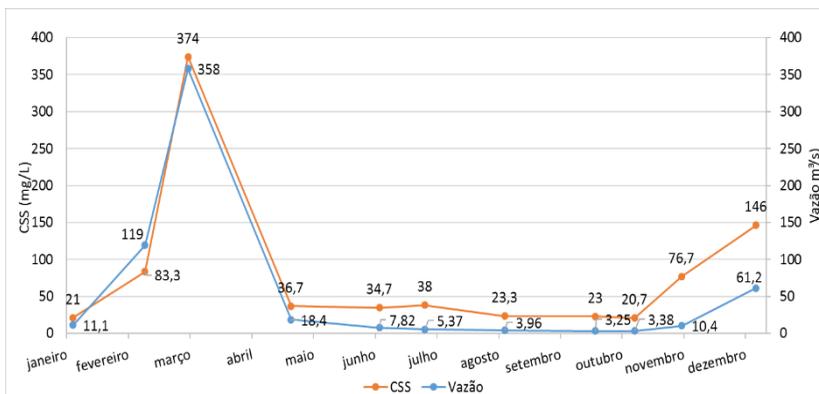
Figura 5- Concentração de sedimentos em suspensão e vazão de 1998 a 2016



Fonte: Do autor, 2016

Na Figura 6 apresenta-se a variação em um ano (2000) dos valores de vazão e concentração de sedimentos. Pode-se observar que os valores de CSS mais altos ocorrem nos meses de novembro a março com máxima de 374 mg/L, equivalente a uma descarga sólida de 11568 ton/dia, enquanto os valores mais baixos, ocorrentes de abril a setembro, apresentam máxima de 38 mg/L (126 ton/dia).

Figura 6- Concentração de sedimentos em suspensão e vazão ano 2000

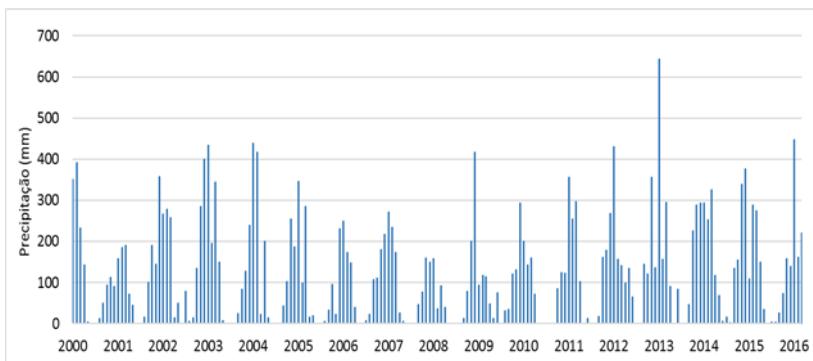


Fonte: Do autor, 2016.

4.1.2. Precipitação

A precipitação é um fator com grande influência na hidrosedimentologia pois grande parte dos sedimentos em suspensão têm origem na erosão pluvial, primeiramente pelo impacto das gotas e depois pelo escoamento superficial. Pensando nisso, é importante analisar a dinâmica das chuvas e sazonalidade para poder relacioná-las com a concentração de sedimentos em suspensão. Na Figura 7 a observa-se que em algumas épocas a pluviosidade é zerada, caracterizando o período de seca (abril a setembro) e são nesses períodos que a concentração de sedimentos em suspensão é menor.

Figura 7- Precipitação mensal de 2000 a 2016



Fonte: Do autor, 2016.

O gráfico relacionando a variável chuva com concentração de sedimentos medidos in situ não ficou ilustrativo devido às chuvas apresentarem muitos valores zerados, porém, a Tabela 4 mostra que os dados apresentam boa relação estatística.

Tabela 4- Correlação entre precipitação e CSS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,84
R-Quadrado	0,70
R-quadrado ajustado	0,69
Erro padrão	43,74
Observações	46,00

Fonte: Do autor, 2016.

4.1.3. Nível do reservatório

O nível do reservatório deve ser levado em consideração quando se estuda comportamento de sedimentos pois esse fator pode indicar possíveis assoreamentos. Porém, com a análise do gráfico e sabendo que o APM é utilizado para controle de cheias, é possível perceber que o nível do reservatório é controlado de acordo com a sazonalidade da precipitação. Portanto, nesse caso não foi possível utilizar a altura da lâmina da água como parâmetro de assoreamento. Mas devido à série de dados fornecida apresentarem valores diários e consistentes, e por existir relação com a vazão e precipitação, o nível do reservatório também foi utilizado para correlação com a série temporal de reflectância.

Na Figura 8 é apresentado o gráfico com uma série de 4 anos para representar como funciona o controle do nível do reservatório. É possível observar que os meses em que o reservatório fica com o nível mais baixo é em novembro e dezembro, isso ocorre, pois, o reservatório vai sendo esvaziado no período de seca para quando chegar o período chuvoso ter capacidade para amortecer as cheias, depois, vai enchendo até o mês em que acabam as chuvas e tem-se o pico do nível de água (abril). Esse ciclo se repete todos os anos com algumas poucas diferenças devido às variações da precipitação.

Figura 8- Nível do reservatório de 2012 a 2015

Fonte: Do autor, 2016

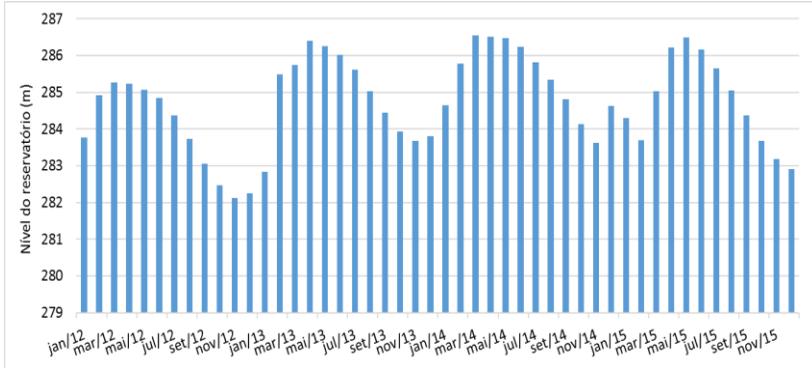
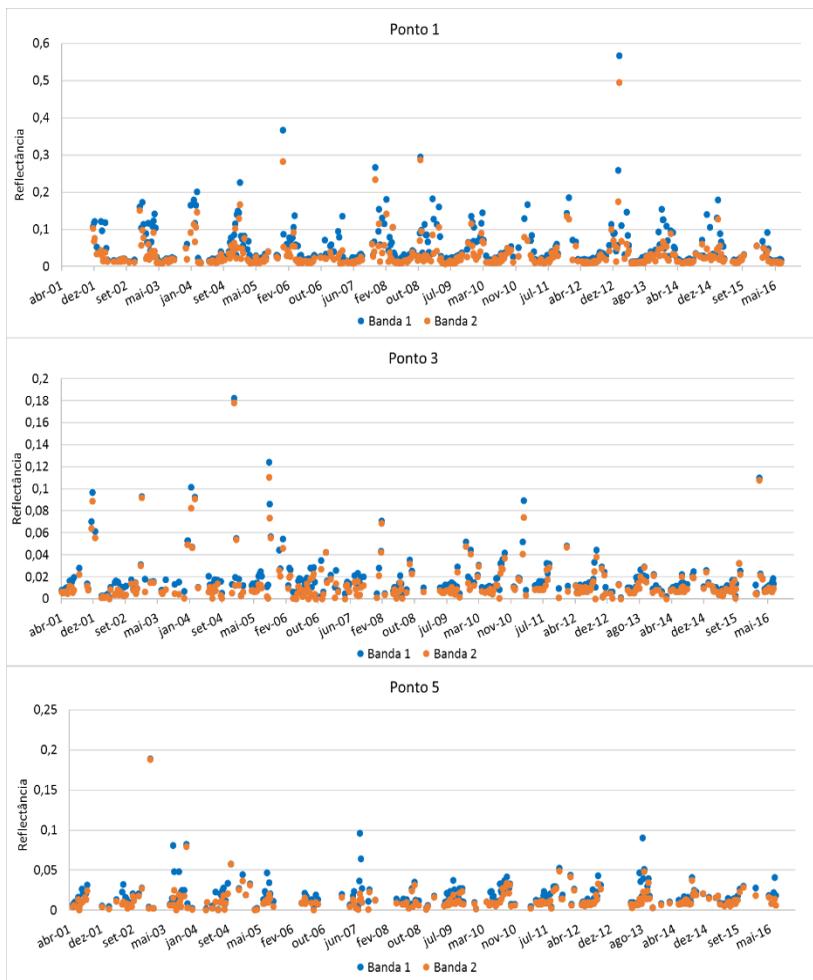


Figura 9- Série temporal de reflectância banda 1 e 2



Fonte: Do autor, 2016.

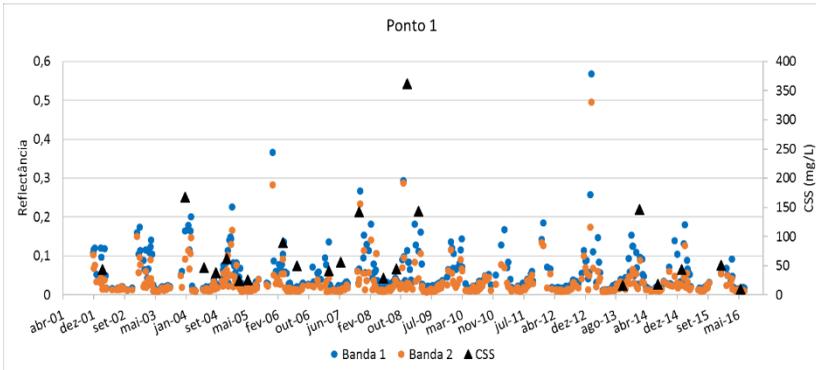
4.2. ANÁLISE TEMPORAL DOS DADOS MODIS

Estudos anteriores, como Doxaran et al. (2002), Binding et al. (2005), Miller e McKee (2004) demonstraram a possibilidade de relacionar dados de sedimentos com respostas espectrais de imagens de satélite. Esses trabalhos mostram uma forte correlação, principalmente

entre a reflectância da banda do vermelho com a concentração de sedimentos em suspensão.

A Figura 10 apresenta a relação dos dados de concentração de sedimentos com a série temporal de reflectância das bandas 1 e 2 do MODIS. O gráfico relaciona os dados do Ponto 1 pois a coleta in situ dos sedimentos é feita apenas nesse local, portanto a correlação desses valores com os demais pontos não se mostrou significativa.

Figura 10- Relação da reflectância banda 1 e 2 com CSS



Fonte: Do autor, 2016.

Devido à série de concentração de sedimentos em suspensão ser muito pequena, não é possível observar uma boa relação graficamente. Porém, em uma análise estatística apresentada na Tabela 5 identifica-se que existe uma correlação moderada entre os dados, indicando que o fato da radiação estar refletindo mais o vermelho e infravermelho pode ter ligação com a presença de sedimentos em suspensão no local.

O coeficiente de correlação poderia ter sido mais positivo se a quantidade de dados medidos in situ fosse maior. Além disso, não são todas as datas de coleta de sedimentos que coincidem com a data do imageamento. Para esses casos relacionou-se a data da imagem com a CSS de até 5 dias anteriores.

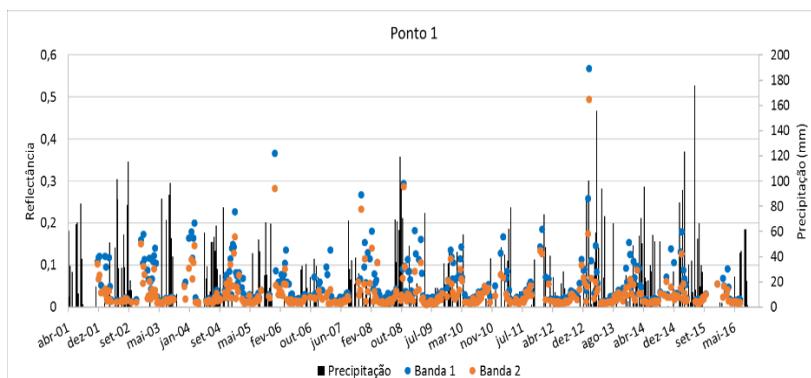
Tabela 5- Correlação banda 1 e 2 com CSS - Ponto 1

Estatística de regressão	Banda 1	Banda 2
R múltiplo	0,64	0,40
R-Quadrado	0,41	0,16
R-quadrado ajustado	0,38	0,12
Erro padrão	62,27	74,20
Observações	22,00	22,00

Fonte: Do autor, 2016.

A Figura 11 mostra a relação temporal da reflectância da banda 1 e 2 com a série de precipitação. Buscou-se relacionar essas duas variáveis devido boa correlação entre a precipitação e a concentração de sedimentos medidas in situ, como mostrada anteriormente. A série de pluviosidade utilizada apresenta dados diários possibilitando uma relação mais representativa que os de sedimentos em suspensão.

Figura 11- Relação da reflectância banda 1 e 2 com a precipitação



Fonte: Do autor, 2016.

Graficamente também não é possível observar a relação entre as variáveis, mas os dados pluviométricos apresentaram coeficiente de correlação moderado com a reflectância da banda 1 do MODIS, como mostra a Tabela 6. Isso pode indicar que em períodos chuvosos existe uma tendência a refletir um pouco mais a radiação na faixa do vermelho

e infravermelho nesse ponto do reservatório, e isso está relacionado com a presença de material em suspensão na água.

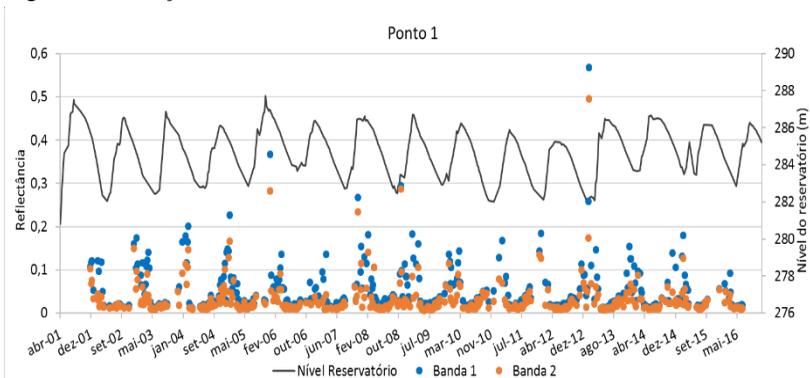
Tabela 6- Correlação banda 1 e 2 com precipitação- Ponto 1

Estatística de regressão	Banda 1	Banda 2
R múltiplo	0,57	0,47
R-Quadrado	0,33	0,22
R-quadrado ajustado	0,33	0,22
Erro padrão	23,15	24,93
Observações	406	406

Fonte: Do autor, 2016.

A relação da refletância com o nível do reservatório mostrada na Figura 12, ocorre diferente dos outros fatores. Pelo gráfico é possível observar que existe uma similaridade no comportamento das variáveis no tempo, porém na análise estatística apresentada na tabela x o coeficiente de correlação é muito baixo. Isso pode ter ocorrido devido a ao fato da dinâmica de chuvas e vazão do rio serem diferentes do nível do reservatório pois este é controlado pelo operador do sistema com o objetivo de geração de energia e controle de cheias.

Figura 12- Relação banda 1 e 2 com o nível do reservatório



Fonte: Do autor, 2016.

Tabela 7- Correlação banda 1 e 2 com nível do reservatório

Estatística de regressão	Banda 1	Banda 2
R múltiplo	0,24	0,29
R-Quadrado	0,06	0,08
R-quadrado ajustado	0,06	0,08
Erro padrão	1,24	1,23
Observações	414	414

Fonte: Do autor, 2016.

4.3. ANÁLISE ESPACIAL DA DISTRIBUIÇÃO DE SEDIMENTOS

O estudo do comportamento dos fluxos de sedimentos é de fundamental importância para a gestão de recursos hídricos e quando se trata de reservatórios de usinas hidrelétricas é um fator que afeta diretamente na operação e na produção de energia.

Carvalho (2000) explica que o transporte e a velocidade de sedimentação apresentam diferenças de um reservatório para outro, sendo esses processos influenciados pela vazão, tempo de residência e seção transversal dos rios que formam o reservatório, além da característica morfométrica do sistema, localização e uso do solo na bacia hidrográfica.

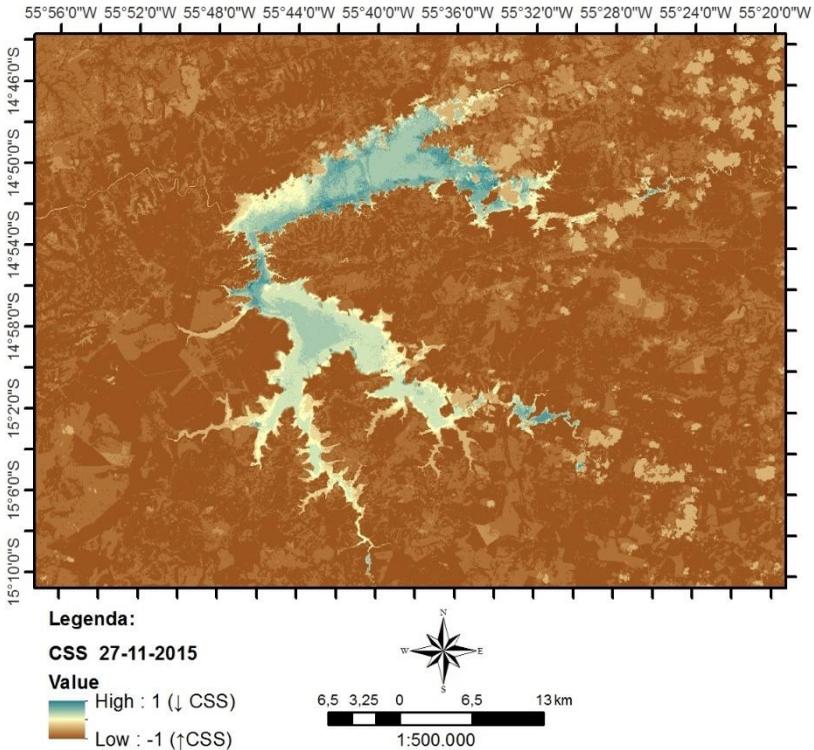
Mahmood (1987) cita também a quantidade e intensidade das chuvas, o tipo de solo e da formação geológica como fatores com grande influência no fluxo de sedimentos.

Com as imagens do landsat 8 e com os valores do NDWI é possível fazer algumas análises e propor hipóteses com base nesses fatores citados na literatura.

Na Figura 13, apresenta-se um mapeamento da bacia no dia 27/11/2015. Apesar da imagem ter a presença de algumas nuvens, observa-se que existe uma grande diferença de coloração na água. Essas diferenças são classificadas de acordo com o índice de diferença normalizada da água e os locais com o azul mais forte apresentam maior característica de “água pura”, e quanto mais marrom, mais característica de solo. Ou seja, nos locais dentro do reservatório que se aproximam do marrom pode-se induzir que existe uma maior concentração de sedimentos em suspensão. A hipótese torna-se coerente quando se analisa que esses locais com o valor baixo de NDWI são na foz dos afluentes que deságuam no reservatório, próximos às margens e à

barragem. Além disso a alta concentração de sedimentos também está relacionada com a chuva. Nos registros da estação pluviométrica UHE Manso Montante apresentam que no dia 27/11/2015 ocorreu uma chuva de 22,3 mm.

Figura 13- Distribuição dos sedimentos em suspensão - 27/11/2015

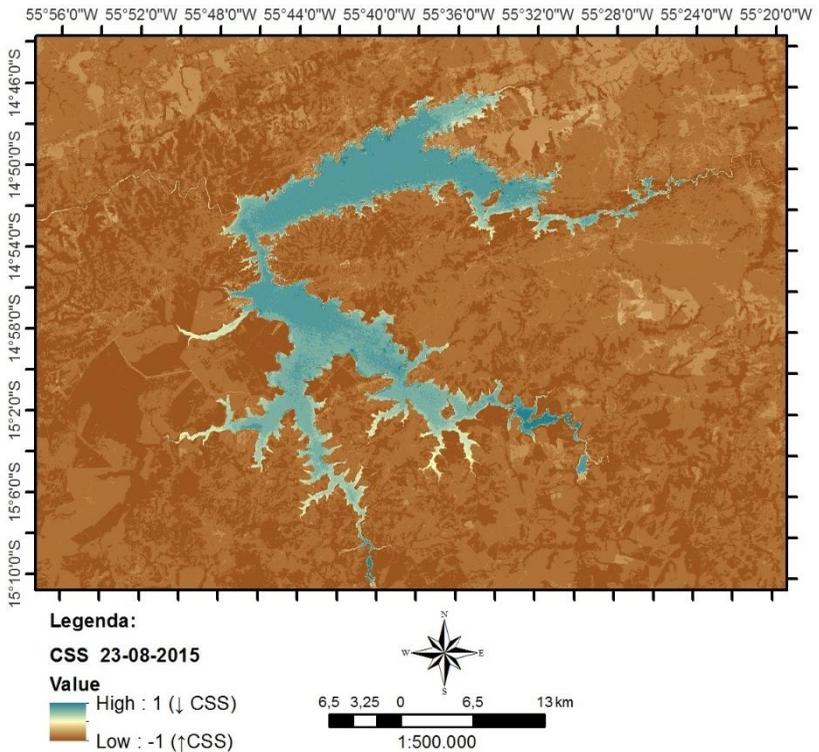


Fonte: Do autor, 2016.

Na Figura 14 apresenta-se uma imagem do dia 23/08/2015, observa-se que as distribuições das cores são bem diferentes da imagem anterior. O reservatório se apresenta mais azul, ou seja, com maiores características de “água pura”. Em alguns braços onde se localizam a foz dos afluentes possuem características de maior concentração de sedimentos, pois nesses locais o volume de água é menor, e somente quando aumenta a seção transversal do reservatório que esses sedimentos se distribuem, de acordo com a dinâmica do fluxo.

A imagem apresentada é da época de seca, em que pode se passar dias sem chover, isso explica o fato da água se apresentar mais pura, pois os processos erosivos nesse período são menos intensificados por não existir o escoamento superficial. Nos registros da estação pluviométrica UHE Manso montante, a última chuva registrada no reservatório foi de 4,1 mm no dia 07/07/2015.

Figura 14- Distribuição dos sedimentos em suspensão - 23/08/2015



Fonte: Do autor, 2016.

Na análise espacial foi difícil fazer a validação do estudo pois não existe um banco de dados com a distribuição dos sedimentos em suspensão no reservatório, com isso não foi possível fazer a correlação dos dados. Também não foram feitas coletas in situ devido ao curto tempo para estudo e dificuldades logísticas.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo, além de contribuir para o entendimento da dinâmica de hidrossedimentos mostrou que o uso da tecnologia de sensoriamento remoto e processamento de imagens de satélites constituem uma ótima ferramenta para análises temporais e espaciais.

Os dados do MODIS utilizados para análise temporal do comportamento dos sedimentos em suspensão no reservatório se mostrou satisfatória, bem como a ferramenta AppEEARS na extração dos valores de reflectância.

Apesar do coeficiente de correlação não ter sido muito alto, foi possível observar que as variações temporais dos dados de reflectância do MODIS possuem uma boa relação com as variáveis medidas in situ, como exemplo a precipitação e a concentração de sedimentos. Além do coeficiente de correlação, esses fatores também podem ser explicados com base em fatores hidrológicos, mas para melhorar a relação estatística, teriam que ser realizadas coletas in situ nos pontos de amostragem para serem calibrados os resultados obtidos pelo satélite.

A análise espacial usando as imagens de reflectância da superfície do Landsat 8 mostrou que é possível mapear o fluxo de sedimentos em suspensão utilizando sensores remotos, mas, assim como na análise temporal, é preciso fazer coletas de campo para validação dos resultados pois o banco de dados de sedimentos disponíveis no sistema nacional de informação sobre recursos hídricos é muito falho, praticamente inexistente.

Portanto, o trabalho abre oportunidade para uma série de estudos e pôde-se concluir que o sensoriamento remoto utilizando dados das faixas espectrais do verde, vermelho e infravermelho próximo, pode se tornar uma ótima ferramenta de apoio em estudos hidrossedimentológicos, principalmente pelo fato de serem complexos e ainda muito pouco estudado.

REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. **HidroWeb: sistemas de informações hidrológicas**. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>> Acesso em: 2 de novembro de 2016.
- ANNEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília: ANEEL. 2008.
- BAUP, F. et al. Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. **Hydrology Earth System Sciences**, Toulouse, 2014, v. 18, p. 2007-2020.
- BINDING, C.E.; BOWERS, D. G.; MICHELSON E. G. **Estimate suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters**. Remote Sensing of Environment, v. 94, p.373-383, 2005.
- BORGES, R.O. et al. Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 17, João Pessoa, 2015. p. 6022-6029.
- BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta, Santa Maria-RS**. Dissertação de mestrado – Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, 1998.
- BUKATA, R.P. et al. **Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Costal Waters**. New York: CRC, 1995. 362p.
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos naturais**. São José dos Campos-SP: ed 1. Parênteses, 2009.
- CANDIDO, A.K.A.A.; SANTOS J.W.M.C. Avaliação de métodos de delimitação automática de sub-bacias da bacia Hidrográfica do rio Manso-MT a partir de MDE, In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 15, Curitiba, 2011. p. 1121-1128

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. CPRM e ELETROBRÁS. Rio de Janeiro, 1994. 384p.

CARVALHO, N.O. et al. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.

CARVALHO, N.O. **Assoreamento de reservatórios – consequências e mitigação dos efeitos**. In: IV Encontro Nacional de engenharia de Sedimentos. Santa Maria-RS, 2000.

CHEPAR. **Avaliação do processo de sedimentação do reservatório - Projeto HL-95**. Ed. Itaipu. Relatório técnico. 1999. 78 p.

CHOI, J.T. et al. **Terra and Aqua MODIS on-orbit spectral characterization for Reflective Solar Bands**. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. v. 8724, 2013.

CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 11 ed. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2012. 474p.

DOXARAN, D. et al. **Spectral signature of highly turbid waters. Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations**. Remote Sensing of Environment, p. 149-161. 2002.

EID, J.N.; CAMPANA, N.A. Avaliação do estágio da integração geoprocessamento-recursos hídricos. **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, 1999. 6p

ESRI, **Environmental Systems Research Institute, INC**. ArcGIS for the desktop, version 10.1. Software. 2012.

FERREIRA, A.B. PEREIRA FILHO, W. **Avaliação da reflectância espectral de corpos d'água em Santa Maria-RS por meio de espectrorradiometria de campo**. Geoambiente On-line, n. 13, p. 1-14, 2009.

FIGUEIREDO, D.M. **Padrões limnológicos e do fitoplâncton nas fases de enchimento e de estabilização dos reservatórios do APM Mansa e AHE Jauru (Estado de Mato Grosso)**. Tese de doutorado – Programa

de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Parque Gerador: usina hidrelétrica de Manso (212 MW)**. Disponível em: <http://furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_manso.asp >. Acesso em: 2 de setembro 2016.

GAO, B.C. **NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space**. Remote Sensing of Environment, Beijing, v. 58, p.257-266, 1996.

GLYMPH, L.M. **Sedimentation of Reservoirs**. In: ACKERMANN.W.C et al, Ed. Man –made lakes: their problems and environmental. Washington, 1973. 342-348p.

ICOLD, International Commission on Large Dams Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues. **Committee on Sedimentation of Reservoirs**. Paris, 1989.

JENSEN, S. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Hídricos**. São José dos Campos: Parêntese, 2011.

JUSTICE, C.O. **The MODIS fire products**. Remote Sensing of Environment, v.83, p.244-262, 2002.

LOPES, F.B. et al. **Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remote hiperespectral**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, p.13-19, 2014.

MAHMOOD, K. Reservoir sedimentation: impact, extent and mitigation. **World Bank Tech Paper**. Washington, 1987. n. 71, 1987. 850p.

MARKHAM, B.L. et al. **Landsat sensor performance: history and current status**. Geoscience and Remote Sensing. v. 42, n. 12, p.2691-2693, 2004.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MENESES, R.M.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.

MIRANDA, R.B. **A Influência do assoreamento na geração de energia hidrelétrica: estudo de caso na usina hidrelétrica de Três Irmãos – SP**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MILLER, R.L.; McKee, B.A. **Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters**. Remote Sensing of Environment, New Orleans, v.93, p.259-266, 2004.

MULLER, A.C. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995

NASA. National Aeronautics and Space Administration. **Operational Land Imager (OLI)**. Washington, 2016. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/operational-land-imager-oli/>>. Acesso em: 5 de outubro de 2016.

NETO. M.S.S., et al. Caracterização hidrogeoquímica da Bacia do Rio Manso- Cuiabá, Mato Grosso. **Acta Limnol**, São Paulo, 1993, n.4, p. 230-244.

NOVO, E. M. L.M. **Sensoriamento remoto – princípios e aplicações**. 2.^a ed., Ed.Edgard Blucher, São Paulo, 1998.

NOVO, E.M.L.M.; PONZONI, F. J. **Comportamento espectral da água**. In: MENESES, P.R.; NETTO, J.S.M. (Org.) Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UNB, 2001. p.203-222.

PAHLEVAN, N. et al. **On-orbit radiometric characterization of OLI (Landsat-8) for applications in aquatic remote sensing**. Remote Sensing of Environment. Boston. n. 154, p.272-284, 2014.

SALOMÃO, F.X.T., et al. **Rio Cuiabá da Nascente ao Pantanal: uma abordagem sócio-ambiental da bacia hidrográfica**. Cuiabá: Entrelinhas, 2009.

SHI, Z.H. et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. **Journal of Hydrology**, Yangling, 2012. n. 454-455, 123-130p.

SIMA, S.; TAJRISHY, M. Using satellite data to extract volume–area–elevation relationships for Urmia Lake, Iran. **Journal Great Lakes Research**, Tehran, 2013, v. 39, p. 90–99.

SMITH, L.C. Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. **Hydrological Process**, Los Angeles, 1997, v. 11, p.1427–1439.

USGS. The United States Geological Survey. **Landsat Missions: Imaging the Earth Since 1972**. Department of the Interior. Sioux Falls, 2015a. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov>>. Acesso em: 5 de outubro de 2016.

USGS. The United States Geological Survey. **Landsat 8 Instruments**. Department of the Interior. Sioux Falls, 2015b. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/landsat8.php>>. Acesso em: 5 de outubro de 2016.

USGS. The United States Geological Survey. **Shuttle Radar Topography Mission**. 2015c. Disponível em: <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>> Acesso em: 20 de setembro de 2016.

USGS. The United States Geological Survey. **Earth Explorer**. Department of the Interior. Sioux Falls, 2016a. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 15 de setembro de 2016.

USGS. The United States Geological Survey. **Land processes distributed active archive center**. 2016b. Disponível em: <<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>> Acesso em: 2 de novembro de 2016.

VANONI, V.A. **Sedimentation Engineering**. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, 1977. 743p.

XIONG, X. et al. **Status of MODIS on-orbit calibration and characterization**. Remote Sensing, n. 46, p. 1790-1803, 2005

XU, J. Implication of relationship among suspend sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: The Yellow river basin, China. **Catena**, 2002. n. 49, 289-307p.