



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA REFLECTÂNCIA E
ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO
RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA**

Por

Victor Nathan Lima da Rocha

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre*

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2018



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL
– MESTRADO –**

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA REFLECTÂNCIA E
ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO
RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Victor Nathan Lima da Rocha

Orientador: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

D111a DA ROCHA, Victor Nathan Lima.

Análise espaço-temporal da reflectância e estimativa de sedimentos em suspensão no reservatório Eptácio Pessoa / Victor Nathan Lima da Rocha. - João Pessoa, 2018.
80 f. : il.

Orientação: Celso Augusto Guimarães Santos.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT/PPGECAM.

1. Sensoriamento remoto. 2. Açude. 3. Semiárido. 4. Sólidos Suspensos Totais (SST). 5. MOD09Q1. I. Santos, Celso Augusto Guimarães. II. Título.

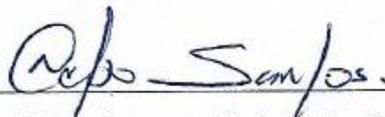
UFPB/BC

VICTOR NATHAN LIMA DA ROCHA

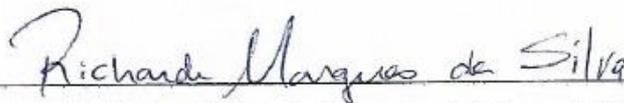
**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA REFLECTÂNCIA E
ESTIMATIVA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO NO
RESERVATÓRIO EPITÁCIO PESSOA**

Dissertação aprovada em 21 / 09 / 2018 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

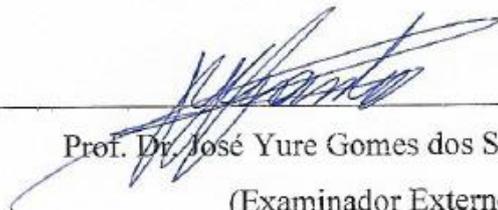
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos – UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Richarde Marques da Silva – UFPB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. José Yure Gomes dos Santos – UFOB
(Examinador Externo)

Sucesso é conseguir o que se quer,
e felicidade é gostar do que conseguiu.
(Dale Carnegie)

Dedico à minha avó
Maria Alves Brive (*in memoriam*) e à minha tia
Lucimar Alves Lima (*in memoriam*), duas
personificações de garra e resiliência.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador.

Aos meus familiares, especialmente minha mãe Luciene Alves Lima e minha irmã Laíssa Lima Miglioranza, por serem exemplos e razão de dedicar-me em almejar ser sempre um ser humano melhor, amo-as. Ainda, às minhas tias Rosa e Vera pelo incentivo nos estudos.

À banca: professor Richarde Marques da Silva, pelo acompanhamento e cooperação incentivadora desde a fase inicial da pesquisa; professor José Yure Gomes dos Santos pela prontidão no aceite e na contribuição; e, particularmente, ao meu orientador Celso Augusto Guimarães Santos, docente e pesquisador admirável, que esteve sempre à disposição, compreendendo minha situação de aluno-profissional, sendo essencial para concretização desta fase profissional.

À UFPB e CAPES, pela oportunidade, subsídio da bolsa de pesquisa e troca de informações, experiências e conhecimento.

À João Pessoa, terra enriquecedora e hospitaleira, tornando-se no meu segundo lar.

Aos meus amigos, de várias tribos e terras (paraibanos, rondonienses, maranhenses, baianos, mineiros, paraense, gaúchos), mas com reservado carinho àqueles que me acompanharam nestes últimos anos: Orcino Jr. (Pandinha), Anninha, Cindy, Samara (Sam), Sarah, Euler, Biazita (Ana Beatriz), Marcus, Fabim, Clara, Débora, Carla, Mohara. Com intercâmbio de alegrias, de angústias e de conforto.

Minha gratidão!

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – Aquisição de imagens por sensoriamento remoto.....	21
Figura 2 – Curvas espectrais de diferentes tipos de alvos.	23
Figura 3 – Comparação da reflectância espectral medidas <i>in situ</i> de águas com claras com águas ricas em sedimentos argilosos e siltsos.	25
Figura 4 – Localização geográfica das bacias de drenagem do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), Paraíba/BRA.....	30
Figura 5 – Localização geográfica do Reservatório Epitácio Pessoa, Boqueirão/PB.	32
Figura 6 – Volume diário monitorado no Reservatório Epitácio Pessoa, Boqueirão/PB (AESA, 2016).	34
Figura 7 – Fluxograma das atividades de pré-processamento dos dados MOD09Q1	37
Figura 8 – Fluxograma das atividades de processamento dos dados para geração das séries históricas de reflectância de superfície da água para as bandas 1 e 2.	38
Figura 9 – Delimitação (vetorização) dos espelhos d’água do açude Epitácio Pessoa (PB) entre 2000 e 2016.	39
Figura 10 – Integração dos dados vetorizados e rede drenagem do SRTM.	40
Figura 11 – Modelo Digital de Elevação do Açude Epitácio Pessoa no ano de 2013	41
Figura 12 – Perfil longitudinal (talvegue) no Açude Epitácio Pessoa (PB), batimetria (em cor) referente ao ano de 2013 (N = 57)	41
Figura 13 – Pontos de amostragem no espelho d’água do Açude Epitácio Pessoa (PB), batimetria (em cor) referente ao ano de 2013 (N = 46).....	42
Figura 14 – Fluxograma das atividades para aplicação dos modelos de estimativa de SST	44
Figura 15 – Quantidade de pixels iguais ou maiores que 1.5 (relação NIR/RED) entre filtragem F-1 (pós remoção nuvens) e filtragem F-2 (pós remoção com as máscaras).	49
Figura 16 – Interferências intencionadas na remoção pela metodologia, (A) vegetação emergente de borda, (B) presença de ilhas e (C) contrações na geometria do açude..	50
Figura 17 – Séries temporais (bruta, pós-filtragem 1 e 2) de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos perfis longitudinais (N = 39), 2000-2016.	52

Figura 18 – Séries temporais (bruta, pós-filtragem 1 e 2) de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos pontos amostrais (N = 37), 2000-2016.	53
Figura 19 – Valores de reflectância das bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias anuais e global (vermelho) para os pixels do perfil longitudinal (N = 39), 2000-2016	53
Figura 20 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos pixels dos perfis longitudinais (N = 39) e global (vermelha), 2000-2016.	54
Figura 21 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos pixels dos pontos amostrais (N = 37) e global (amarelo), 2000-2016.	55
Figura 22 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias anuais dos perfis longitudinais (N = 39) e global (vermelha), 2000-2016.....	55
Figura 23 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias anuais dos pontos amostrais (N = 37) e global (amarela), 2000-2016	56
Figura 24 – Correlação entre as médias anuais (superior) e mensais (inferior) das duas formas de amostragem de dados/pixels (Perfil \cong 39 pixels; Pontos \cong 37 pixels em cada média).....	56
Figura 25 – Médias mensais e anuais dos pixels perfil longitudinal (N = 39) para as séries filtradas de reflectância das bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), precipitação (estações INMET de Campina Grande – CG e Monteiro – MT), 2000-2016.....	57
Figura 26 – Interpolação espacial dos pontos amostrais de reflectância, banda RED, para as máscaras vetorizadas, método de Krigagem Universal – UK, no açude Epitácio Pessoa (2000-2016)	60
Figura 27 – Interpolação espacial dos pontos amostrais de reflectância, banda NIR, para as máscaras vetorizadas, método de Krigagem Universal – UK, no açude Epitácio Pessoa (2000-2016)	61
Figura 28 – Médias mensais das estimativas de Sólidos Suspensos Totais (SST) para os três modelos (M1, M2 e M3), médias mensais de precipitação de Campina Grande (CG) e Monteiro (MT) de 2000-2016 (INMET)	63
Figura 29 – Médias anuais das estimativas de Sólidos Suspensos Totais (SST) para os três modelos (M1, M2 e M3) e SST observado (SUDEMA).....	64
Figura 30 – Interpolação espacial UK de três condições de precipitação no açude (chuvosa, média e seca) no açude Epitácio Pessoa em 2000, 2003 e 2016, respectivamente, aplicando três modelos de estimativa de SST (M1, M2, M3).	66

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Diferentes conceituações para o termo sensoriamento remoto.....	20
Tabela 2 – Modelos matemáticos de Sólidos Suspensos Totais (TSS, em inglês) com base na reflectância espectral de sensoriamento remoto (Rrs), apresentados em sua forma original.....	28
Tabela 3 – Características técnicas e gerais do Açude Epitácio Pessoa, Boqueirão/PB. ...	33
Tabela 4 – Variação área e perímetro do espelho d'água da área de estudo (2000-2016) .	47
Tabela 5 – Descrição estatística dos dados de reflectância de superfície da água (2000-2016) nas bandas em estudo (RED e NIR) para os pontos amostrais.	51

RESUMO

Reservatórios artificiais de água – regionalmente conhecidos por açudes – são mananciais imprescindíveis na garantia de oferta de água, especialmente em regiões de clima de semiárido, suscetível à escassez hídrica, como é o caso da região do Cariri Paraibano. O açude Epitácio Pessoa (conhecido como Boqueirão) é notoriamente relevante em termos socioeconômicos e ambientais, abastecendo cerca de 1 milhão de habitantes de 19 cidades e 3 distritos paraibanos. Conhecer a qualidade de suas águas requer um monitoramento robusto e contínuo, que usualmente é inconsonante com a realidade, apresentando lacunas de representação espacial e temporal. Carências que, crescentemente, vem sendo superadas com uso de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. Face ao exposto, o objetivo da pesquisa foi analisar a dinâmica espaço-temporal da reflectância de superfície da água e estimar a concentração da variável Sólidos Suspensos Totais (SST) no açude Epitácio Pessoa (PB) durante 17 anos (2000-2016), com proposição de uma metodologia moldada às condições do semiárido. Para tanto, foram utilizados produtos MOD09Q1 do sensor MODIS/Terra de resolução espacial de 250 m, composição de 8 dias, para as bandas do vermelho (RED, 645 nm) e do infravermelho próximo (NIR, 859 nm), assim como dados complementares para viabilizar a extração de dados e remoção de nuvens na série histórica por meio de programação. Como principais resultados, a variável reflectância demonstrou sensibilidade às alterações no regime pluviométricas na perspectiva temporal; os valores de reflectância para banda NIR quase sempre superiores à da RED e quando o oposto (2004 e 2008) apontou para mudanças no tipo de sedimento como reflexo do súbito aumento do volume no açude; a interpolação espacial dos dados apontou, sinteticamente, uma redução da reflectância entre a entrada do reservatório até a barragem para a maioria dos anos, notadamente para a banda RED; dentre os três modelos de estimativa de SST – o de Robert al. (2017)/M3, a priori, foi o que apresentou melhor desempenho em relação à análise temporal anual, variando 270 – 961 mg/L, e correlação de 0,57 com dados observados da SUDEMA. No tocante à metodologia proposta, apresentou promissor desempenho na extração de dados na análise temporal e parcialmente satisfatória na análise espacial devido às condições geométricas do açude e considerável remoção de pixels (perfil longitudinal) frente à alta cobertura de nuvens em alguns pixels, o cotejo entre os valores médios de reflectância por pixels amostrados em dois trâmites de extração distintos (perfil longitudinal e pontos amostrais) indicaram forte correlação ($r > 0,93$).

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento remoto, Açude, Semiárido, Sólidos Suspensos Totais (SST), MOD09Q1.

ABSTRACT

Artificial reservoirs of water - regionally known as açudes (dams) - are essential sources for the supply of water, especially in semiarid climate regions, which are susceptible to shortages, as is the case in the Cariri region. The Açude Eptácio Pessoa (or Boqueirão) is notably relevant in socio-economic and environmental context, supplying around a million inhabitants of 19 cities and 3 districts of the Paraíba state. Understanding the quality of water requires robust and continuous monitoring, and usually is inconsonant with reality, creating spatial and temporal information gaps; these are shortages that are increasingly being overcome with the use of remote sensing and GIS technologies. In view of the above, the research objective was to analyse the space-time dynamic of the surface reflectance of water and to estimate the concentration of the variable Total Suspended Solids (TSS) in the Eptácio Pessoa Dam (PB) throughout 17 years (2000-2016), with the proposal of a methodology fitted to the conditions of the semiarid. Therefore, MOD09Q1 products of the MODIS/Terra sensor of 250 m spatial resolution were utilized, composition 8-days, for the red bands (RED, 645 nm) and approximated infrared (NIR, 859 nm), as well as complementary data to make the extraction of data and the removal of cloudiness in the historical series by means of programming. The main results, the reflectance variable demonstrated sensitivity to alterations in the pluviometric regime in the temporal perspective; the values of reflectance for the NIR band were almost always higher than those of the RED and when the opposite (2004 and 2008) indicating a alteration of the type of sediment as a reflex of the abrupt change of volume in the dam; the spatial interpolation of the data points to reduction of the reflectance of the entrance of the reservoir to the barrage for the majority of the years, notably for the RED band; among the three estimation models of SST - that of Robert al. (2017)/M3, a priori, was what demonstrated the highest performance in relation to the annual temporal analysis, varying between 270-961 mg/L, with a correlation of 0,57 with data observed from SUDEMA. Regarding the proposed methodology, it demonstrated promising performance in the extraction of data in the temporal analysis and partially satisfactory performance in the spatial analysis due to the geometric conditions of the dam and considerable removal of pixels (longitudinal profile) in the face of the high coverage of clouds in some pixels, the comparison between the average values of reflectance by pixels shown in two distinct paths of extraction (longitudinal profile and sampling points) indicated strong correlation ($r > 0,93$).

KEYWORDS: Remote sensing, Reservoir, Semi-arid, Total Suspended Solids (TSS), MOD09Q1.

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL	16
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO	19
2.2.1 Conceitos e Fundamentos	19
2.2.2 Reflectância e Comportamento Espectral da Água	24
2.3 SISTEMA MODIS E MODELOS DE ESTIMATIVA PARA SST	26
3. ÁREA DE ESTUDO	30
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS DE DRENAGEM	30
3.2 ASPECTOS HÍDRICOS E SOCIOECONÔMICOS DO AÇUDE	32
4. MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS	35
4.2 TRATAMENTO DE DADOS	37
4.3 SÉRIES TEMPORAIS DE REFLECTÂNCIA	38
4.4 MODELOS DE ESTIMATIVAS DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST)	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 DINÂMICA DA LÂMINA D'ÁGUA	47
5.2 ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA REFLECTÂNCIA DA ÁGUA	50
5.3 ESTIMATIVA DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST)	62
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE	79

1. INTRODUÇÃO

A oferta de água no que tange aos seus aspectos quali-quantitativos está intrinsecamente relacionada à economia, ao lazer e bem-estar, à saúde ambiental e pública, às questões sociais e culturais, e à biodiversidade da localidade. Com a expansão demográfica e melhoria nos índices de qualidade de vida da população, é também crescente a demanda de água para suprir suas necessidades.

Períodos de estiagem prolongada é uma característica intrínseca de regiões com clima de semiárido, afetando a disponibilidade de água, em termos quali e quantitativos. Obstáculo este que historicamente é remediado, ou mitigado, por intermédio de reservatórios de águas superficiais – regionalmente conhecidos como açudes, com fins de assegurar água à população durante estes períodos.

Essa perspectiva focada no contexto do Nordeste brasileiro evidencia a grande importância que os açudes desempenham na qualidade de vida e economia da região. O estado da Paraíba, conforme dados da Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba – AESA (2016), possui 126 açudes públicos, representando uma das principais fontes de abastecimento da população paraibana, suprindo água a milhões de usuários da região.

E isso realça a necessidade de se monitorar essas águas, uma vez que alterações insustentáveis no uso e ocupação da bacia hidrográfica incorrem em diversos danos ambientais, e conseqüentemente afetam, sobretudo, suas águas superficiais. A qualidade da água é definida pela presença e mudança de nutrientes, sedimentos, microrganismos patogênicos, material refratário, entre diversos outros (CARR e NEARY, 2008; STARK et al. 2000).

Mas cabe ponderar que a dinâmica de fluxo de matéria e energia de reservatórios é diferente da que ocorre nas águas correntes (lóticas), uma vez o barramento implica algumas alterações na qualidade da água. No tocante aos impactos ambientais oriundos do represamento de águas, um fenômeno comum é o acúmulo de material sedimentável, pois a velocidade da água reduz subitamente ao entrar no reservatório e isso favorece a precipitação das partículas suspensas maiores (FEARNSIDE, 2013).

Comportamento que pode reduzir o volume útil de reservatório e comprometer a qualidade da água. Denotando assim o interesse em pesquisas com temas hidrossedimentológicos e, dentre estes, estudos com a variável Sólidos Suspensos Totais

(SST) no monitoramento de águas, especialmente às oriundas de mananciais para abastecimento humano.

Entretanto, cabe destacar que técnicas de monitoramento convencionais são dispendiosas, pontuais e com limitada frequência espaço-temporal para determinados estudos hidrológicos (PINTO et al, 2014; PISCOYA et al., 2013a; CARVALHO, 2008). Nesta linha de pensamento, Pinto et al. (2014) destacam que essas técnicas não acompanham a demanda necessária de dados, carecendo de soluções alternativas; neste ponto sobressai o uso de sensoriamento remoto aplicado a recursos hídricos.

Outrossim, Menezes (2013, p. 3) realça que “é na lacuna de limitações do monitoramento espacial e temporal das técnicas convencionais de amostragem que o sensoriamento remoto se insere como uma das tecnologias capaz de ampliar a representatividade das amostras”. Destarte, vem se consolidando pesquisas que fazem uso de sensoriamento remoto e geoprocessamento no monitoramento e gestão de recursos hídricos.

Assim, alguns estudos atestaram o uso dessas ferramentas em análises de clorofila-a (WATANABLE et al., 2015), turbidez (ROBERT et al., 2016; PAHLEVAN e SCHOTT, 2012), cianobactérias (BECKER et al., 2009) e pigmentos de fitoplânctons (CICERELLI e GALO, 2015). Bem como, observa-se o crescente uso na aplicação de imagens MODIS para estimativa de sedimentos em suspensão em águas oceânicas (LIN et al., 2016; CERDEIRA-ESTRADA e LOPEZ-SALDANA, 2011), em águas continentais/grandes lagos (CHEN et al., 2016; SHI et al., 2015; PAHLEVAN e SCHOTT, 2012) e frequentemente em águas estuarinas e costeiras (DORJI et al., 2016; KUMAR et al., 2016; CHEN et al., 2015; LIU e WANG, 2014; ZHANG et al., 2014; MILLER e McKEE, 2004).

Conquanto, há carência de estudos no recorte nacional, sobretudo no semiárido brasileiro, assim como semiáridos no panorama internacional. Pinto et al. (2014) ponderam que “apesar da existência de outros estudos utilizando o sensor MODIS no Brasil, esses se restringiram a uma análise da correlação entre as informações espectrais e os parâmetros *in situ* sem incorporar a variável temporal nos estudos.”

Outro ponto é a carência de estações de monitoramento de sedimentos com fornecimento consistente de dados, citando neste aspecto o projeto em implantação "MEG-HYBAM" (ANA, 2016) que realiza monitoramento temporal junto a dados orbitais do MODIS, sendo que na sua plataforma digital – o HidroSat da ANA – há apenas três estações sedimentométricas (Morpará, Gameleira, Carinhanha) no Nordeste disponíveis no sistema até o momento.

Neste contexto, o uso de sensoriamento remoto, especialmente quanto aos dados do sensor MODIS, demonstra potencial na geração de dados em diferentes escalas no monitoramento da qualidade das águas por meio das suas características ópticas, sendo a variável reflectância – proporção entre o fluxo de energia eletromagnética refletido e o incidente por uma superfície – habitualmente utilizada em modelos desta temática, tais como os citados anteriormente e discutidos adiante.

À vista disso, a presente pesquisa propôs-se a gerar dados espaço-temporais de reflectância e estimar o fluxo de sedimentos suspensos num reservatório do semiárido paraibano por meio de modelos da literatura, dados que poderão contribuir com uma melhor gestão dos seus recursos hídricos, e esses resultados poderão ser fonte de dados para outras pesquisas no campo de modelagem ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a variável reflectância de superfície da água e estimar a concentração de sólidos suspensos totais (SST) a partir de imagens orbitais do sensor MODIS de uma série histórica de 17 anos (2000-2016) em um reservatório localizado no semiárido brasileiro.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a dinâmica espacial da reflectância de superfície da água no reservatório em estudo;
- Analisar temporalmente a variação da reflectância de superfície da água no reservatório em estudo, destacando a variabilidade intra-anual e interanual;
- Estimar a concentração de SST, por meio de diferentes modelos matemáticos da literatura com características similares, mediante dados orbitais;
- Propor uma metodologia de extração de dados de reflectância em açudes inseridos no semiárido e, por consequência, discutir a viabilidade do uso de dados MODIS nessa linha de pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo está compartimentado em três partes, de acordo com o concatenamento dos objetivos e aspectos metodológicos, no intento de alcançar os resultados pretendidos elencados anteriormente. Na primeira etapa será descrito sobre o monitoramento ambiental, enfatizando sua importância na manutenção dos aspectos qualitativos da água, em especial para abastecimento humano. Na segunda parte serão abordados sobre geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicados a recursos hídricos, fundamentalmente com uso de dados série MODIS. Na terceira parte deste item, será abordado sobre alguns modelos na literatura de estimativa da concentração de sólidos suspensos totais, assim como sobre seus resultados obtidos.

2.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL

A água é um recurso inestimável a todos os organismos no planeta Terra. Intrínseca ao meio ambiente natural e artificial, participante em todas as vertentes dos seus processos ecológicos, sociais, culturais e econômicos. Seja como função física, constituinte, transportadora, solvente, térmica, energética e inúmeras outras, esse recurso é um patrimônio de toda biota terrestre.

Conforme preconiza a Política Nacional dos Recursos Hídricos, Lei Federal 9.433 de 1997, a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada, participativa e integrada (BRASIL, 1997). Essa integração somente se manifesta quando se conhece as condições ambientais presentes e passadas do objeto em estudo, e isso é realizado por meio de um monitoramento sistemático e consistente que servirá de escopo na tomada de decisões no gerenciamento dos recursos hídricos.

A melhor maneira para potencializar o uso da água é conhecer suas características, levando em consideração suas alterações sazonais e plurianuais em razão do período do ano e da sua localidade, visto que servirão de indicadores de qualidade, essas informações são substancialmente importantes na interpretação e avaliação dos aspectos qualitativos da água e da compreensão do comportamento de sua dinâmica hidrológica.

A qualidade das águas, segundo Stark et al. (2000), sofre influências naturais e antrópicas, sendo que sem interferências antrópicas, seria definida por influências do intemperismo de minerais da base rochosa, por processos atmosféricos, disposição e

lixiviação de materiais particulares, de matéria orgânica e de nutrientes, por fatores hidrológicos e por processos biológicos, resultando então na sua composição física, química e biológica. Sob o mesmo ponto de vista, Carr e Neary (2008), afirmam que a qualidade das águas é variável no tempo e no espaço e requer monitoramento de rotina para detectar padrões espaciais e mudanças ao longo do tempo.

Sendo que a quantidade de sedimento presente na água pode alterar seus parâmetros físicos, tais como cor, turbidez, sabor e odor, assim como os parâmetros químicos, como concentração de nitrogênio e fósforo (MALUTTA, 2012). Além do que, monitorar suas concentrações fornecem informações não somente de características das águas, mas também da dinâmica de uso e ocupação na bacia hidrográfica ao qual está inserida.

Entretanto, frisa-se que o monitoramento da qualidade das águas, em especial às superficiais, não deve ser analisado somente pela ótica dos corpos hídricos, mas sim no contexto da bacia uma vez que, conforme Vestena (2008 *apud* MALUTTA, 2012), os processos hidrossedimentológicos envolvidos numa bacia hidrográfica estão intimamente vinculados ao ciclo hidrológico e compreendem a desagregação, erosão, deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia hidrográfica.

Para Carvalho (2008), o sedimento num corpo hídrico sofre ações que implicam em sua suspensão ou sedimentação (precipitação no fundo), em função das características físicas da partícula (tamanho, peso e forma) e propriedades do escoamento da água (hidrodinâmica), como regime, velocidade, geometria e outras.

Assim, quando se aborda sólidos suspensos totais (SST), ou sedimentos em suspensão (ou ainda, matéria suspensa total), refere-se então à parcela de sedimentos na água que se encontram em suspensão, em especial, na zona limnética (camada superior da lâmina d'água), que para Vestena (2008) são materiais menores que 2 mm de diâmetro.

Souza (2000) discorre que reservatórios alteram a dinâmica do fluxo de sedimentos no curso d'água, favorecendo a deposição do mesmo em ambiente lótico, modificando também a temperatura em alguns extratos da coluna d'água. Essas alterações nos processos hidrossedimentológicos, em longo prazo, podem comprometer a qualidade da água (POLETTI, 2007), como também, o acúmulo de sedimentos pode reduzir o volume útil do açude.

O monitoramento então de variáveis de sedimentos em suspensão é sumamente importante em estudos de caráter hidrológicos e geomorfológicos. Concatenado a essa perspectiva, Hayakawa (2007) discorre que esses estudos “são necessários uma vez que permitem a análise e compreensão de um grande número de problemas como

abastecimento, navegação, controle de cheias, recreação, etc., além de permitir o entendimento de processos erosivos, de transporte, de evolução, entre outras dinâmicas”.

No tocante ao monitoramento dos açudes públicos do estado da Paraíba, a AESA é a atual encarregada pelo seu monitoramento, outrora essa responsabilidade era da SUDEMA (Superintendência de Administração do Meio Ambiente do Estado da Paraíba), realizado semestralmente pela sua Coordenadoria de Medições Ambientais – CMA (SUDEMA, 2016), entretanto, num interstício temporal insuficiente para determinadas pesquisas de análises multitemporais, usando como exemplo o açude Epitácio Pessoa, com indícios que já vem sofrendo processos de assoreamento por acúmulo de sedimentos (COSTA, 2006; DNOCS, 2005).

Estudos técnicos nesta área apresentaram que a capacidade volumétrica inicial de acumulação do açude Epitácio Pessoa era de 535.680.000 m³ de água, contudo, no ano de 2004 seu volume total era de 411.686.287 m³, essa redução de mais de 23% pode ter como resposta os processos de assoreamento sofrido pelo açude, provocados pelo aumento da erosão dos solos em função do desmatamento da caatinga (DNOCS, 2005; BRITO, 2008). Não obstante, salienta-se que para tal afirmação deve ser levado em consideração as metodologias e aparatos utilizados em cada estudo.

Assim, apesar da importância de se monitorar as águas sob a ótica da concentração e variabilidades espaço-temporais dos sedimentos na água, estudos nesta vertente sofrem de carência de dados, demandando o uso de técnicas complementares para suprir essas lacunas. Nesta perspectiva, o sensoriamento remoto vem ganhando destaque, com estudos que relacionam as características de respostas espectrais obtidas em imagens orbitais a variáveis físico-químicas e biológicas de qualidade da água.

Insta destacar que, apesar do Projeto MEG-HYBAM – Monitoramento Espacial Hidrológico de Grandes Bacias (Quantidade e Qualidade) – realizar monitoramento automatizado com uso de sensoriamento remoto em quatro reservatórios da Paraíba (Epitácio Pessoa, Engenheiros Ávidos, Mãe D’Água e o Coremas), somente a variável clorofila é aferida (ANA, 2016); e no Nordeste, somente três estações de monitoramento hidrossedimentológico realizam registro de matéria em suspensão, todas situadas no sudoeste do Estado da Bahia.

O desenvolvimento do supracitado projeto corrobora para se constatar as vantagens no emprego de técnicas de geoprocessamento, em especial as de sensoriamento remoto, na geração de dados de qualidade ambiental. Igualmente, de acordo com Hayakawa (2007), por meio de ferramentas de geoprocessamento correlacionados com os dados espectrais e

hidrossedimentológicos é possível realizar a análise da variação espaço-temporal da bacia, sendo utilizados como subsídios para a correção de problemas existentes e o estabelecimento de ações para o desenvolvimento com base na racionalização e na otimização do uso dos recursos naturais em uma bacia hidrográfica.

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO

2.2.1 Conceitos e Fundamentos

“Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o Geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente” (CÂMARA e DAVIS, 2001).

Diante disso, é crescente o surgimento de geotecnologias voltadas a suprir essa demanda. Consoante, Bitar et al.(2000, p. 78) destacam que “o panorama mundial de tendências no campo da geotecnologia encontra-se hoje fortemente influenciado pelo debate da sustentabilidade, compreendendo em especial as múltiplas aplicações das geociências para a solução de problemas de engenharia e o aproveitamento de recursos naturais”.

“A partir da década de 70, com a grande evolução da aerofotogrametria, do sensoriamento remoto e da tecnologia da informática, tornou-se possível obter, armazenar e representar informações geoespaciais em ambiente computacional, abrindo espaço para o surgimento do Geoprocessamento” (BOLFE, 2006). Geoprocessamento, segundo definição de Rodrigues (1993), “trata-se de um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltado para um objetivo específico”.

De acordo com Câmara e Medeiros (1998), o termo geoprocessamento denota uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas. Logo, sensoriamento remoto trata-se de uma geotecnologia atrelada a esse conceito, sendo uma ferramenta que coleta e fornece dados, ou seja, um mecanismos de aquisição de dados.

Na literatura é comum encontrar diversos conceitos para Sensoriamento Remoto (TABELA 01), que podem convergir ou divergir a depender do campo a ser utilizado. Conforme Novo (2010, p. 25) uma definição bem ampla e bem conhecida é a de Charles Elachi: “a aquisição de informação sobre um objeto sem que se entre em contato físico com ele”. Porém, na sua contextualização para presente pesquisa, esse conceito apresenta vago.

Assim, a Tabela 1 apresenta alguns dos principais conceitos de Sensoriamento Remoto e seus referidos autores, sintetizados que foram extraídos do trabalho de Meneses e Almeida (2012).

Tabela 1 – Diferentes conceituações para o termo sensoriamento remoto

Autor (es)	Definição do termo Sensoriamento Remoto
Colwell (1966)	“Reconhecimento à distância”.
Lintz e Simonetti (1976)	“Arte ou ciência de dizer algo sobre um objeto sem tocá-lo”.
Crepani (1983)	“É a ciência e a arte de se obterem informações sobre um objeto, área ou fenômeno, por meio da análise de dados coletados por aparelhos denominados sensores, que não entram em contato direto com os alvos em estudo”.
Mather (1987)	“Medida à distância da assinatura espectral da superfície da Terra e da atmosfera”.
Barrett e Curtis (1992)	“Ciência de observação à distância”.
Lillesand e Kieffer (1994)	“É a arte e a ciência de estudar a matéria sem ter contato físico com a mesma baseando-se somente da interação da radiação eletromagnética”.
Curran (1995)	“Uso de sensores de radiação eletromagnética para registrar imagens do meio físico que possam ser interpretadas de modo a gerar informações úteis”.
Weng (2010)	“Sensoriamento remoto refere-se às atividades de registro, observação, percepção e compreensão dos objetos ou eventos em lugares distantes (remotos).”
Florenzano (2011)	“Tecnologia que permite obter imagens – e outros tipos de dados – da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície”.

Fonte: Tabela extraída de Meneses e Almeida (2012)

Diante destes inúmeros conceitos, o que melhor abarca o foco da presente pesquisa é o abordado em Novo (2010, p. 28), como sendo

“a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados a bordo de aeronaves, espaçonaves, ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos na superfície da Terra a partir de registros e da análise das interações entre a radiação eletromagnética (REM) e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações”.

Sendo assim, no momento de aquisição de informação da superfície terrestre, o sensor detecta e mensura a radiação que deixa a superfície dos objetos, realizando uma medição radiométrica da REM (MENESES e ALMEIDA, 2012), conforme a Figura 1.

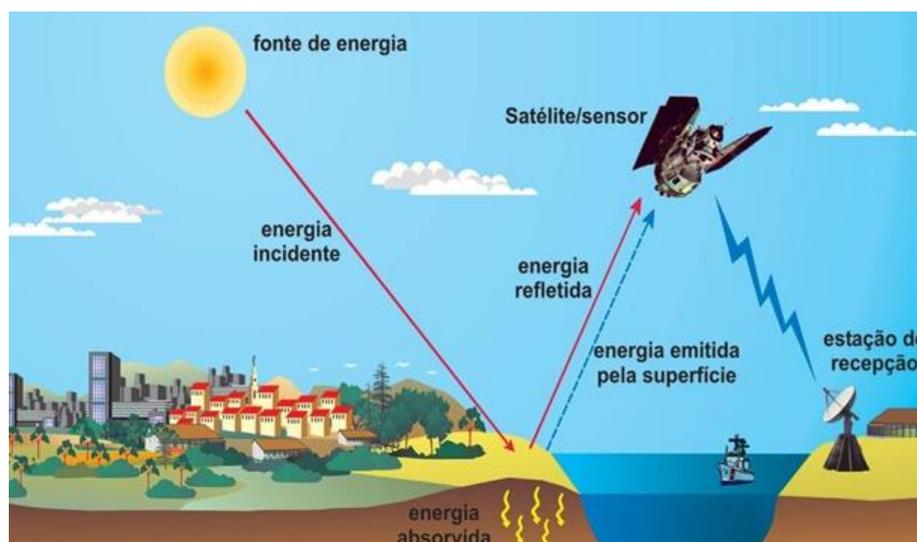


Figura 1 – Aquisição de imagens por sensoriamento remoto.
Fonte: Florenzano (2011, p. 9)

O Sol, fonte de Radiação Eletromagnética (REM), emite constantemente energia sobre o planeta, que ao atingir a superfície terrestre a REM poderá sofrer diferentes trajetórias. Basicamente, ela poderá ser absorvida ou refletida. A figura também apresenta a energia emitida pela superfície (fonte própria ou aquela que anteriormente foi absorvida). Logo, a energia refletida e a emitida são registradas pelo sensor (a bordo de satélite), convertido em um sinal digital e esta informação é transmitida para uma estação de recepção que a processará e armazenará. “Observe que, na sua trajetória, a energia atravessa a atmosfera, que interfere na energia final registrada pelo sensor”

(FLORENZANO, 2011), ou seja, a energia captada sofre perturbações oriundas de gases e aerossóis em suspensão na atmosfera.

A informação então registrada pelo sensor pode ser armazenada em diferentes formas, a mais conhecida é em uma imagem digital (*raster*) – produtos imageadores, que trata de uma representação matricial, “na qual o valor numérico de cada elemento de resolução (célula ou pixel) representa uma intensidade de energia e um nível de pixel (*Digital Number, DN*)” (FLORENZANO, 2011).

A qualidade da informação deste pixel é em função de suas resoluções (espacial, radiométrica, espectral e temporal) (FLORENZANO, 2011; NOVO, 2010; INPE, 2006):

- *Resolução espectral* – conceito para produtos multiespectrais, trata-se da faixa espectral de uma banda, ou seja, os limites de comprimento de cada banda numa cena imageada. Apresenta a sensibilidade do sistema sensor, uma vez que a banda espectral é o intervalo entre dois comprimentos de onda, no espectro eletromagnético;
- *Resolução temporal* – refere-se à frequência na qual o sensor/satélite registra o mesmo local num dado intervalo de tempo, respeitando o ciclo do satélite, unidade geralmente é em dias, mas há sensores que possuem resolução temporal em horas, estes muito utilizados em monitoramento;
- *Resolução espacial* – uma das características que mais se considera na avaliação da qualidade de uma imagem. Diz respeito à capacidade do sensor em distinguir e medir os alvos na superfície, quanto menor o seu número, maior será a resolução espacial e sua capacidade de fornecer informações entre os objetos avistados, usualmente expressa em metros (m);
- *Resolução radiométrica* – é a habilidade do sistema sensor em detectar as variações da radiância espectral recebida, expresso em bits, apresenta o número de níveis de cinza em sistema binário, a saber: 2^n , sendo que “n” representa o número de bits do sensor.

Assim, quando se discute intensidade e nível de energia dos valores armazenados nos pixels cabe então conceituar duas variáveis físicas em sensoriamento remoto envolvidas no processo: radiância e reflectância. Radiância é:

o fluxo radiante que provém de uma fonte, numa determinada direção, por unidade de área. A quantificação da radiância contínua de uma cena é representada pelos níveis de cinza discretos na imagem digital, é dada por um número de bits por "pixel" para produzir um intervalo de radiância. (INPE, 2006).

Enquanto que Reflectância, relação entre essas grandezas radiométricas, traduz o balanço de energia em superfície, ou seja, a razão da radiância (energia emitida) pela irradiância (energia recebida), mensuradas no mesmo instante, sendo uma grandeza adimensional e expressa em porcentagem (%) (MENEZES, 2013).

Diante disso, cabe ponderar que cada objeto imageado na superfície (alvo) terá um comportamento espectral diferente, em função das suas características físicas, químicas e biológicas, traduzindo portanto em sua assinatura espectral (também conhecida como curva espectral) como um aspecto intrínseco do objeto. A Figura 2 elucida facilmente essa afirmação.

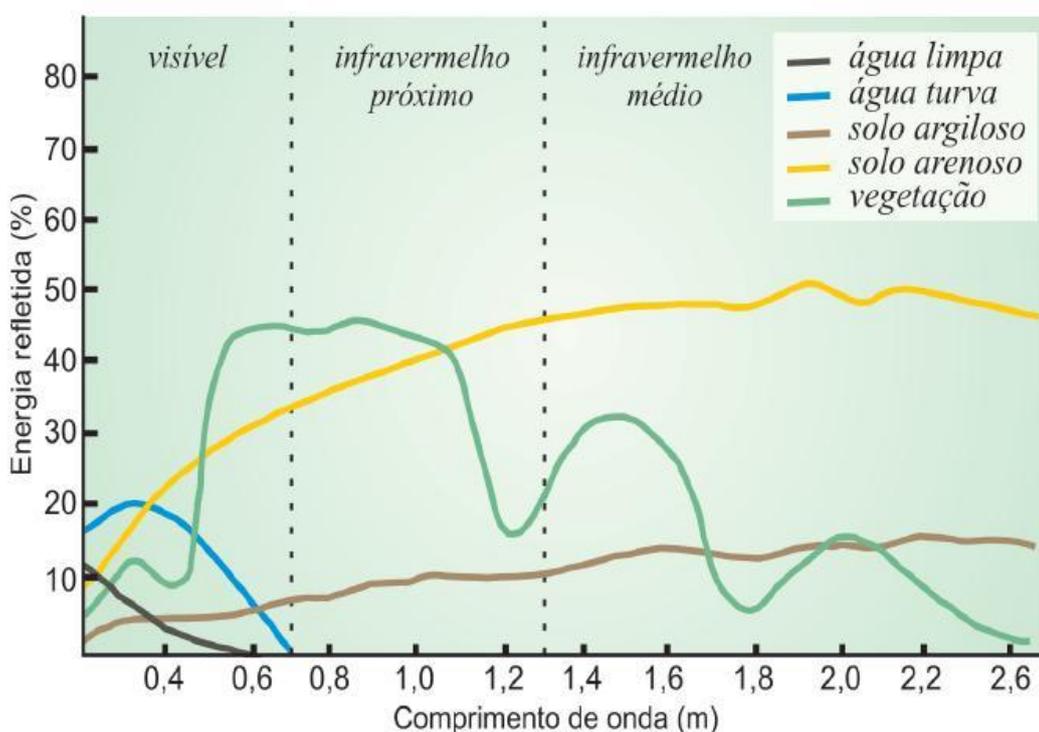


Figura 2 – Curvas espectrais de diferentes tipos de alvos.

Fonte: Florenzano (2011, p. 12)

Portanto, a resposta espectral (valor de reflectância) em um determinado comprimento de onda pode ser igual à de outro alvo (observe a interseção entre a vegetação e solo arenoso próximo a 500 nm). Entretanto, suas assinaturas espectrais possuem comportamentos muito distintos quando se observa todo o espectro, a vegetação possui diferentes níveis de reflectância (oscilando), enquanto o solo arenoso tende em aumentar o nível de energia ao longo das faixas de comprimento de onda.

2.2.2 Reflectância e Comportamento Espectral da Água

A reflectância, como anteriormente abordada, é denotada como a razão entre a radiação refletida sobre a incidente de uma superfície, no mesmo instante. No cálculo da reflectância são necessários alguns procedimentos, como a conversão dos valores de cada pixel de DN (*Digital Number*) em radiância, e esta posteriormente convertida em reflectância.

No momento da varredura eletromagnética pelo sensor, a informação de resposta espectral é armazenada em cada pixel em nível de cinza (DN), parâmetro este que é função da resolução radiométrica do sensor. Esses valores são então convertidos em radiância, conforme Equação 1.

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{máx_{\lambda}} - L_{mín_{\lambda}}}{ND_{máx} - ND_{mín}} \right) * (ND - ND_{mín}) + L_{mín_{\lambda}} \quad (1)$$

Onde:

L_{λ} = radiância espectral aparente (W/(m².sr.μm));

$L_{máx_{\lambda}}$ e $L_{mín_{\lambda}}$ = radiância espectral aparente máxima e mínima do sensor, respectivamente. Função da sensibilidade de cada sensor;

ND = número digital (ou *digital number* - DN, em inglês) do pixel;

$ND_{máx}$ e $ND_{mín}$ = número digital máximo e mínimo de obtenção do sensor.

Posteriormente, o valor de radiância espectral aparente é transformado em reflectância aparente, vide Equação 2.

$$\rho_{\lambda} = \left(\frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos(\theta)} \right) \quad (2)$$

Onde:

ρ_{λ} = reflectância aparente;

$ESUN_{\lambda}$ = irradiação solar exoatmosférica média no topo da atmosfera (W/(m².sr.μm));

d = distância Sol-Terra (unidades astronômicas);

$\cos(\theta)$ = cosseno do ângulo zenital solar (graus), função da latitude, declinação solar, ângulo horário e do dia do ano.

A radiância e reflectância aferidas por meio das Equações 1 e 2, respectivamente, são denominadas aparentes por ter como base o topo da atmosfera. Os efeitos físicos e melhor detalhamento do comportamento das propriedades ópticas são prontamente encontrados nas teses de Villar (2013) e Menezes (2013). Já a Reflectância de Superfície refere-se à Reflectância Aparente com remoção ou mitigação dos efeitos provocados pela atmosfera, o sensor MODIS – discutido no próximo capítulo – a estima por meio de algoritmo com Código 6S (*Second Simulation of a Satellite in the Solar Spectrum*) (VERMOTE et al., 1997), resultando nos produtos M*D09.

Pesquisas que estudam o comportamento espectral dos alvos geralmente são compreendidas entre o intervalo do visível e do infravermelho próximo (de 400 a 2500 nm), intervalo este que denomina a REM como óptica. E, como discutido, cada alvo terá respostas espectrais diferente dos demais em virtude de seus aspectos físicos, químicos e biológicos. Neste tópico, as águas naturais possuem maior peculiaridade, uma vez sua heterogeneidade tem origens na concentração de sólidos e sais suspensos e dissolvidos em seu meio e na sua variabilidade tanto no espaço, como no tempo.

Essa discussão em relação ao tipo e a concentração de matéria na água é sinteticamente ilustrada por meio da Figura 3.

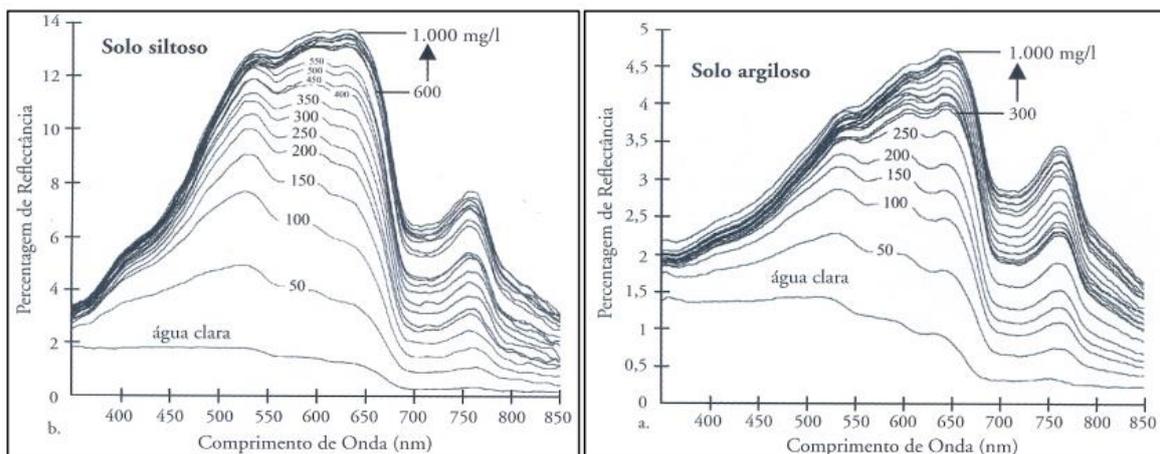


Figura 3 – Comparação da reflectância espectral medidas *in situ* de águas com claras com águas ricas em sedimentos argilosos e siltosos.

Fonte: Jensen (2009, *apud* Menezes 2013, p. 30)

Conforme apresentado na Figura 3, águas claras reduzem sua resposta de reflectância ao longo do espectro óptico, enquanto águas mais turvas, tanto de material siltoso e argilo, tendem a aumentar na faixa do vermelho e depois novamente no

infravermelho próximo. Destaca-se ainda, que mesmo possuindo mesma concentração de sedimentos (mg/L), em virtude do tipo de sedimento (siltoso ou argiloso), suas respostas são diferentes. Águas com sedimentos de origem siltosos de 1000 mg/L atingiram valores de reflectância de 14%, enquanto de argilosos foi pouco mais que 4,5% de reflectância, ambas no espectro do visível-vermelho.

Para Martinez et al. (2009) e ANA (2018) a maioria dos estudos, que relacionam valores de reflectância de sensores remotos com sedimentos em suspensão em água, concorda que a melhor correlação em águas interiores turvas é a do infravermelho (700 e 800 nm).

Nesta perspectiva, ANA (2018) discorre que “o comportamento espectral dos sistemas aquáticos continentais esta relacionado à concentração de componentes opticamente ativos na água. Esses componentes são substâncias em suspensão ou solução na água que provocam alterações na cor da água pura em função de sua concentração e natureza. Existem três grandes grupos de componentes opticamente ativos”:

- Partículas inorgânicas e orgânicas em suspensão na água (sedimentos);
- Componentes orgânicos em solução na água (ácidos húmicos e fúlvicos);
- Pigmentos relacionados à presença de organismos vivos (fitoplâncton) como a clorofila-a.

2.3 SISTEMA MODIS E MODELOS DE ESTIMATIVA PARA SST

Diversos são os produtos de sensoriamento remoto com sensores imageadores, dentre estes se destaca o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) por sua excelente resolução temporal, imageando toda a superfície da Terra num intervalo de 1 a 2 dias. Para Sato et al. (2011), o MODIS se sobressai dentre os sensores de coleta de dados da superfície da Terra.

O MODIS é um sensor a bordo do satélite TERRA (originalmente denominado EOS AM-1) e também do satélite AQUA (originalmente denominado EOS PM-1); a órbita do TERRA tem sentido norte-sul através do equador no período matutino, enquanto o AQUA tem sentido inverso, imageando o Equador à tarde.

O objetivo principal destes sensores é a aquisição de dados, em 36 bandas espectrais, que permitirão melhorar a compreensão da dinâmica global e seus fenômenos

que ocorrem na terra, nos oceanos e na baixa atmosfera, prevendo alterações globais com precisão suficiente para auxiliar na tomada de decisões políticas na proteção do meio ambiente (NASA, 2016).

É notável o uso de produtos MODIS no monitoramento de variáveis de qualidade ambiental de águas, em especial de lagos e reservatórios (BERNARDO et al., 2016; CHEN et al., 2016; KUMAR et al., 2016; ROBERT et al., 2016). O princípio comum de interpretação de dados é o nível de reflectância de cada pixel em distintas bandas espectrais, esse valor é transformado então, por modelos matemáticos, na variável em estudo. O produto, no caso a banda espectral, é determinado em função do foco do estudo, pois cada tipo de objeto possui uma assinatura espectral característica e isso é passível de interpretação por meio de suas propriedades óticas de absorção e reflectância de energia.

Em sua pesquisa de análise de fluxo de sedimentos no rio Paranapanema (Brasil), Piscoya et al. (2013a) afirmam que os sedimentos apresentam características típicas na parte visível e do infravermelho do espectro. Destarte, conforme os mesmos autores,

“a quantidade de sedimentos modifica as propriedades óticas das águas com um aumento das propriedades de absorção e espalhamento da luz e com um padrão espectral característico: a absorção da luz pelo material particulado é mais forte no azul e decresce de maneira exponencial até o vermelho / infravermelho, enquanto que as propriedades de espalhamento da luz não variam significativamente em função do comprimento de onda. Este conjunto de propriedades espectrais faz com que a reflectância das águas turvas fique menor no azul e aumente no verde e vermelho, dando o aspecto ‘marrom’ característico dessas águas. No infravermelho, a forte absorção da luz pela água pura reduz a sensibilidade da reflectância ao aumento do espalhamento pelo material particulado.”

Em face do comportamento descrito anteriormente, alguns estudos priorizam uso da banda do vermelho (RED, em inglês) e infravermelho próximo (NIR, em inglês); no caso dos produtos MOD09Q1, referentes às bandas B01 e B02, respectivamente.

De fato, os dados de reflectância são os principais dados de entrada em modelos de estimativa de SST, especialmente com uso das bandas MODIS B01 e B02, respectivamente, a vermelha (RED, Rrs 645 nm) e infravermelha próxima (NIR, Rrs 859 nm). Algumas pesquisas que desenvolveram modelos hidrológicos empíricos com estimativa de SST por meio de dados de reflectância do sensor MODIS estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Modelos matemáticos de Sólidos Suspensos Totais (TSS, em inglês) com base na reflectância espectral de sensoriamento remoto (Rrs), apresentados em sua forma original.

Autores / resolução	Bandas (nm)	Modelo	Local	R²	Faixa (mg/L)
Jiang e Liu (2011) MODIS 1000-m	Rrs(470), Rrs(555)	$\text{TSS} = 1365.5 \times (\text{Rrs}(470) + \text{Rrs}(555))^2 - 369.08(\text{Rrs}(470) + \text{Rrs}(555)) + 27.216$	Lago Poyang (China)	0,81	0 – 40
Villar et al. (2013) MODIS 250-m	Rrs(645), Rrs(859)	$\text{TSS} = 1020 \times \text{Ratio}^{2.94}$ $\text{Ratio} = \text{Rrs}(859) / \text{Rrs}(645)$	Rio Madeira (Brasil)	0,62	25 – 622
Ondrusek et al. (2012) MODIS 250-m	Lw(645)	$\text{TSS} = 3.8813 \times \text{Lw}(645)^3 - 13.822\text{Lw}(645)^2 + 19.61\text{Lw}(645)$	Baía de Chesapeake (EUA)	0,79	4,5 – 15
Jiang et al. (2009) MODIS 250-m	Rrs(859)	$\text{Log}10(\text{TSS}) = 0.3568 \times \text{Ln}(\text{Rrs}(859)) + 3.3431$	Lago Taihu (China)	0,81	0 – 170
Liu e Rossiter (2008) MODIS 250-m	Rrs(645)	$\text{TSS} = 7167 \times \text{Rrs}(645) - 42$	Lago Poyang (China)	0,91	15 – 519
Hu et al. (2004) MODIS 250-m	Rrs(645), Rrs(859)	$\text{TSS} = 0.00522 \times \text{Exp}(1002(\text{Rrs}(645) - \text{Rrs}(859)))$	Baía de Tampa (EUA)	0,90	2 – 11
Miller e McKee (2004) MODIS 250-m	Rrs(645)	$\text{TSS} = -1.91 + (1140.25 \times \text{Rrs}(645))$	Lago Pontchartrain (EUA)	0,89	0 – 60
Chen et al. (2009) MODIS 250-m	Rrs(859), Rrs(645)	$\text{Log}10(\text{Rrs}(859)) / \text{Log}10(\text{Rrs}(645)) = -0.1356 \text{Log}10(\text{TSS})^2 + 0.7402 \text{Log}10(\text{TSS}) + 0.6836$	Baía de Apalachicola (EUA)	0,85	1,29 – 208
Kutser et al. (2007) MODIS 250-m	Rrs(645)	$\text{TSS} = 349.83 \times \text{Rrs}(645) + 2.9663$	Porto de Muuga e Sillamäe	0,86	2 – 8
Zhao et al. (2011) MODIS 250-m	Rrs(645)	$\text{TSS} = 2.12 \times \text{Exp}(45.92\text{Rrs}(645))$	Baía de Mobile (Alabama)	0,78	0 – 87,8

Fonte: Adaptado de Chen et al. (2015)

Kumar et al (2016) fizeram uso do modelo de Miller e McKee (2004), calibrando e aplicando na Lagoa Chilika (Índia), obtendo coeficientes de determinação superiores a 0,9; os autores justificaram seu uso devido a simplicidade e similaridade dos locais

(natureza superficial, tipos de sedimentos, dentre outros). Cabe destacar que a pesquisa de Kumar et al. (2016) comparou seu modelo calibrado de Miller e McKee (2004) com outros modelos e outras áreas do mundo, como na Baía Mobile/EUA (ZHAO et al., 2011), Lago Taihu/China (ZHANG et al., 2010), Rio de La Plata/Argentina (DOGLIOTTI, 2011) e Poyang/China (WU et al., 2013); com replicação de dinâmicas espaciais notórias.

No recorte nacional, Villar et al. (2013) aferiu um R^2 de 0,78 em rios amazônicos (estações de Fazenda Vista Alegre e Porto Velho), com amplitudes de concentrações de matéria em suspensão superiores a 600 mg/L; já Piscoya et al (2013a), em estudos no rio Paranapanema (bacia hidrográfica do rio Paraná) registrou um R^2 de 0,54 de sólidos totais com uso da banda RED e 0,76 para variável Turbidez.

Com efeito, o aumento na concentração de sedimento na água ocasiona alteração na reflectância, o que possibilita considerável aumento nos comprimentos de onda, tornando-se possível observar que em corpos d'água com presença de sedimentos em suspensão geralmente se mostram com mais brilho nas imagens comparado aos corpos que apresentam pouca ou nenhuma concentração de sedimentos. Porém, para a correta aplicação dessa correlação é importante que se considerem as seguintes variáveis: resolução espectral, a própria concentração de sedimentos, os tipos de sedimentos, as características da água, entre outros elementos (JENSEN, 2000).

Contudo, é importante destacar, conforme Hayakawa (2007), que “a predição de sedimentos é alvo de inúmeras discussões, principalmente sobre a pertinência da metodologia aplicada. Quantificados de forma direta ou indireta, os sedimentos suspensos possuem dinâmicas que impedem a elaboração de um método ou calibração de um modelo que abranja uma grande área, já que possui grande variabilidade espacial e temporal”.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BACIAS DE DRENAGEM

A área de drenagem do açude Epitácio Pessoa corresponde à união da Bacia Hidrográfica do rio Taperoá (sub-bacia da bacia do rio Paraíba) e da Região do Alto curso do rio Paraíba, totalizando uma área de 12.407 km² (FIGURA 4), ambas dispostas no Estado da Paraíba, representando aproximadamente 22% de sua área superficial.

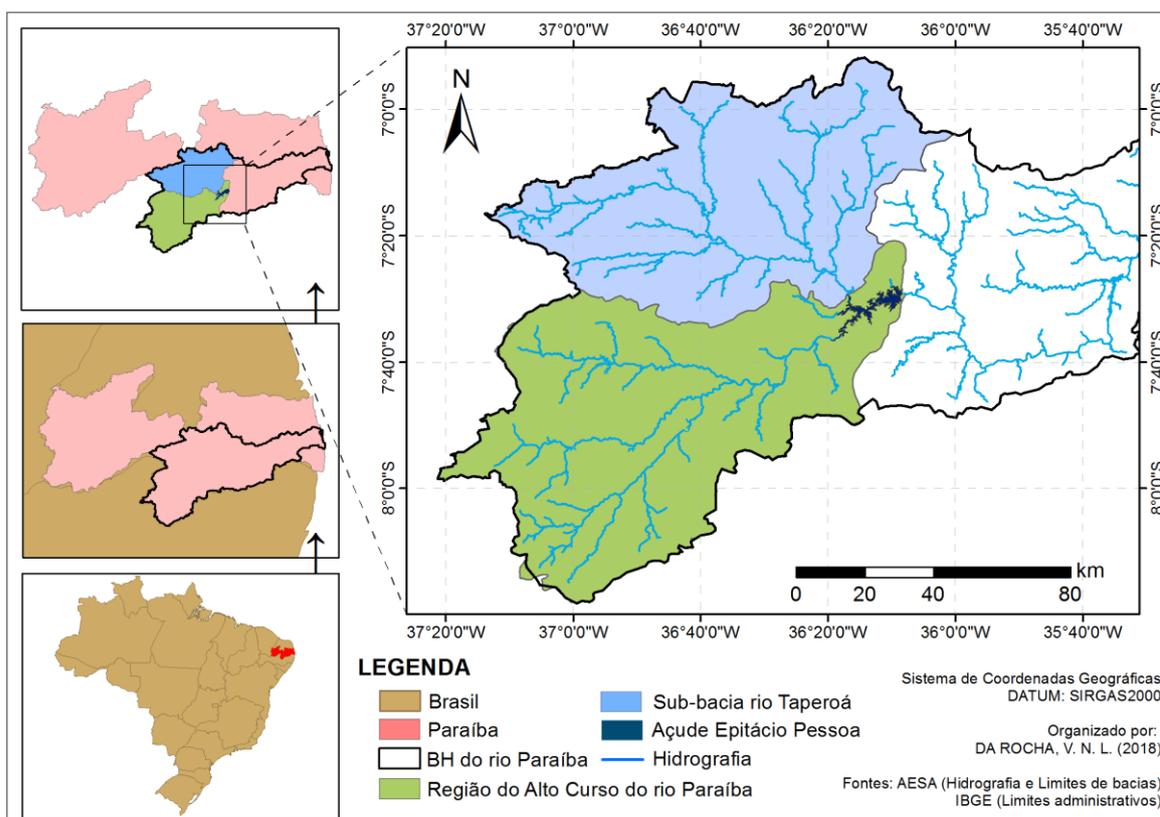


Figura 4 – Localização geográfica das bacias de drenagem do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), Paraíba/BRA.

A vegetação na área de drenagem é de características do Bioma Caatinga, que conforme dados DNOCS (2005) o entorno do reservatório apresenta vegetação arbustiva arbórea aberta, arbustiva arbórea fechada e do tipo arbórea fechada, com determinado grau de antropismo, especialmente em sua Área de Preservação Permanente (APP), oriundo das atividades de manejo do solo (agropecuária).

O Bioma possui, conforme Ministério do Meio Ambiente – MMA (2011), elevada riqueza em termos de biodiversidade e endemismo, de caráter altamente heterogêneo, sendo o único bioma integralmente brasileiro; com registro, até então, de “mais de 1500

espécies de flora e com uma fauna composta de 79 espécies de anfíbios, 177 de répteis, 591 de aves, 178 de mamíferos, 241 de peixes e 221 de abelhas” (p. 3). Entretanto, 45% da Caatinga já foram desmatadas devido ao seu processo de ocupação, quadro de degradação que é associado ao menor conhecimento científico quando comparado aos demais biomas do país (MMA, 2011).

Quanto à pedologia, Brito (2008, p. 37) discorre que os solos encontrados na circunvizinhança do açude Eptácio Pessoa “são, na maioria das vezes, pouco profundos, rasos e organizados em dois ambientes edafológicos: o primeiro se refere a uma superfície semi-evoluída, formada pelos solos Bruno Não Cálcicos (sic, hodiernamente denominados Luvissolos), o segundo, por uma superfície não evoluída, formada pelos Litossolos e Afloramentos de Rocha”.

Conforme a classificação de Köppen-Geiger, a região é predominantemente definida como clima do tipo BSh, ou seja, semi-árido quente; com estação seca atingindo um período que compreende de nove a dez meses. Entre janeiro e dezembro de 2007, as chuvas ocorreram entre os meses de fevereiro e julho, o que é característica desta zona limítrofe da atuação das massas de ar tanto oriundas do sertão quanto do litoral (INMET, 2007; AESA, 2014; BRITO, 2008).

Segundo dados da AESA (2014), as bacias de drenagem possuem uma precipitação média acumulada anual entre 500-750 mm, sendo inferior a 50 mm/ mensal acumuladas entre agosto e setembro, com máximas correntes em março e abril entre 100 a 150 mm acumuladas mensais. Sendo que em Cabaceiras, município integrante do açude, ocorrem chuvas de verão com máximas em junho-julho oriundas da massa Tropical Atlântica, que diminuem em sentido oeste (NASCIMENTO, 2013, p. 38; NASCIMENTO e ALVES, 2008).

Cabe destacar que as áreas de drenagem estão inseridas na região do Cariri Paraibano – Cariri Ocidental e Cariri Oriental (IBGE, 2006), local com menores registros pluviométricos do país e de alta incidência solar, favorecendo a uma alta evapotranspiração. Segundo Nascimento e Alves (2008), as temperaturas médias anuais são relativamente elevadas (25°C a 27°C), com taxas médias de evaporação são em torno de 2.000 mm/ano, denotando o considerável déficit no balanço hídrico. Ainda, conforme supracitados autores (p. 34), os Cariris apresentam um

[...] regime das chuvas conjugado a outros fatores físicos, por exemplo, à baixa permeabilidade dos solos derivados das rochas cristalinas, causa profundas repercussões no regime hidrológico: o regime

dos rios dos Cariris é do tipo torrencial e temporário, com cheias violentas, recessão acelerada, descarga nula durante a maior parte da estação seca, e mesmo, escoamento ausente durante alguns anos. Contudo, enquanto a estação seca se caracteriza por um abaixamento gradativo das águas dos rios, até secarem, as cheias ocorrem abruptamente.

3.2 ASPECTOS HÍDRICOS E SOCIOECONÔMICOS DO AÇUDE

O açude Epitácio Pessoa (FIGURA 5), também conhecido como açude Boqueirão – em razão do município homônimo –, foi construído em pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS, durante os anos de 1953 a 1956, com inauguração em 1957. Possui seu espelho d'água, com área variável em função do volume do reservatório e período hidrológico, entre dois municípios paraibanos, Boqueirão e Cabaceiras, com seu barramento localizado no primeiro.

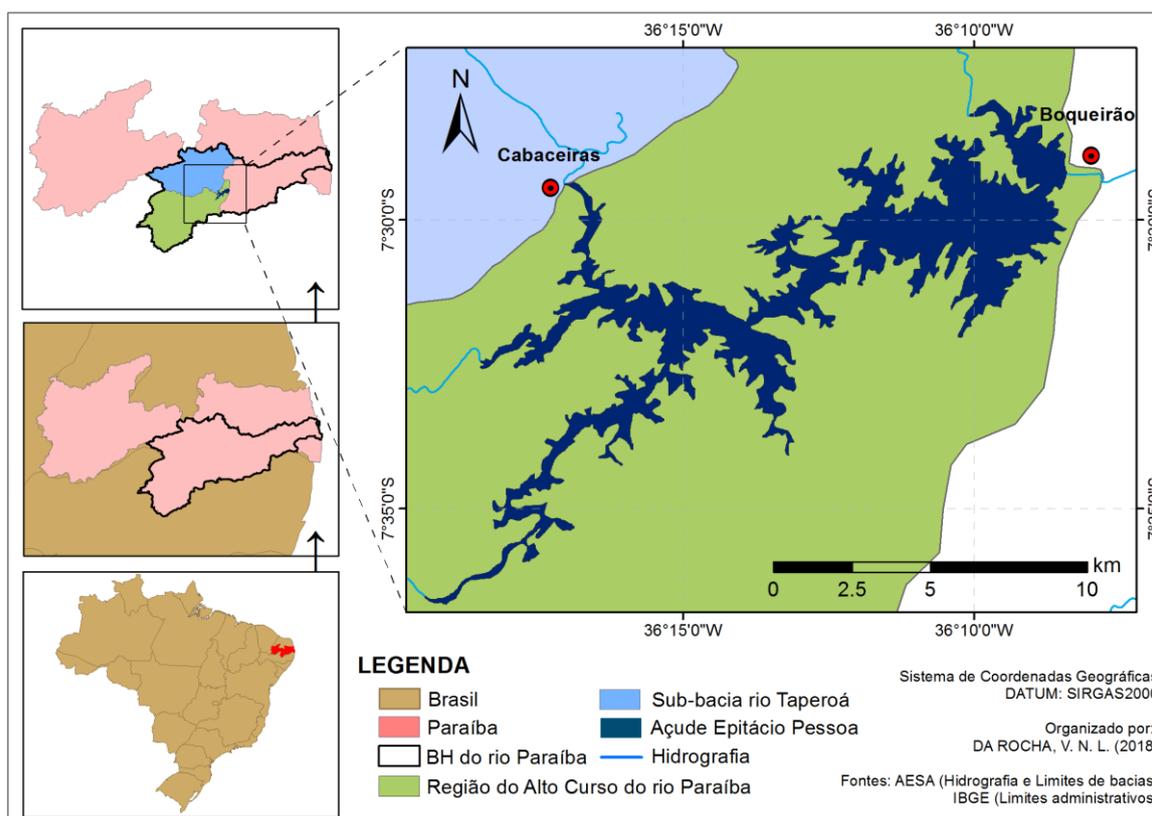


Figura 5 – Localização geográfica do Reservatório Epitácio Pessoa, Boqueirão/PB.

Possui uma capacidade máxima de 411.686.287 m³ de água, responsável pelo abastecimento de 19 cidades e de 3 distritos paraibanos, fornecendo água para mais de 1 milhão de habitantes (AESAs, 2016) por meio do Sistema Integrado de Campina Grande (Campina Grande, Barra de Santana, Caturité, Queimadas, Pocinhos, Lagoa Seca,

Matinhas, São Sebastião de Lagoa de Roça, Alagoa Nova, distrito São José da Mata, Distrito de Galante) e do Sistema Adutor do Cariri (Boqueirão, Juazeirinho, São Vicente de Seridó, Pedra Lavrada, Cubati, Olivedos, Boa Vista, Soledade, Cabaceiras, Sossego e distrito de Seridó) (CAGEPA, 2014). Possui como finalidade fornecer água para os seguintes usos: abastecimento, irrigação, piscicultura, perenização e turismo.

Alguns aspectos técnicos e gerais do Açude, tais como características construtivas e hidráulicas, são apresentados a seguir na Tabela 03.

Tabela 3 – Características técnicas e gerais do Açude Epitácio Pessoa, Boqueirão/PB.

Aspecto	Valor	Aspecto	Valor
Capacidade ¹	411.686.287 m ³	Altura máxima de fundação	55,70 m
Sistema/Subsistema	Paraíba	Descarga máxima	2.610 m ³ /s
Rio barrado	Paraíba	Ordem do rio	7
Área de bacia hidráulica	6.680 ha	Acesso	PB-148
Precipitação média anual	661 mm	Vazão regularizada bruta	4,2 m ³ /s
Volume morto	35.000.000 m ³	Vazão regularizada líquida	2,24 m ³ /s
Nível de água máximo	381,36 m	Vazão de referência	Q90

¹ Dados iniciais apontavam capacidade máxima de 535.680.000 m³

Fonte: DNOCS (1963; 1967) *apud* DNOCS (s/d); AESA (2016).

Como já mencionado, a região está inserida na região do Cariri Paraibano, denotando ao açude Epitácio Pessoa grande influência no cenário socioeconômico da Paraíba, sendo incontestável seu impacto na sustentabilidade da região. Contudo, não são recentes os casos de conflitos de usos e também quanto ao contexto dos impactos ambientais sobre sua bacia hidrográfica, com alterações de uso e cobertura do solo que refletem diretamente sobre os aspectos quali-quantitativos de suas águas.

Com fins de mitigação dos conflitos nos usos das águas e de uma maior garantia de gestão estratégica dos recursos hídricos, a rede hídrica do açude Epitácio Pessoa foi interligada ao sistema de transposição do Rio São Francisco, com receptação de água em abril de 2017, que após forte estiagem – inclusive com racionamento de água em Campina Grande –, com crescimento do volume no reservatório, registrando em fevereiro de 2018 um armazenamento de 10,28% da sua capacidade máxima (AESA, 2018a).

Em dezembro de 2017, o presidente da AESA afirmou que as águas transpostas do Rio São Francisco evitou um colapso de abastecimento de água para mais de 1 milhão de

habitantes de Campina Grande e cidades do Cariri (GERMANO, 2017) referente à crise hídrica de 2016, sendo a pior seca registrada após 60 anos de barramento (G1 PB, 2017a).

A crise hídrica teve origens numa estiagem prolongada, com início em meados do ano de 2012, com característica fortemente refletida no armazenamento de águas do açude (FIGURA 6). Ainda, dentro do período de 2000 a 2016 foram registrados seis ocorrências de extravasamento de água no açude (MELO, 2011; WSCOM, 2009; BRITO e VIANNA, 2008).

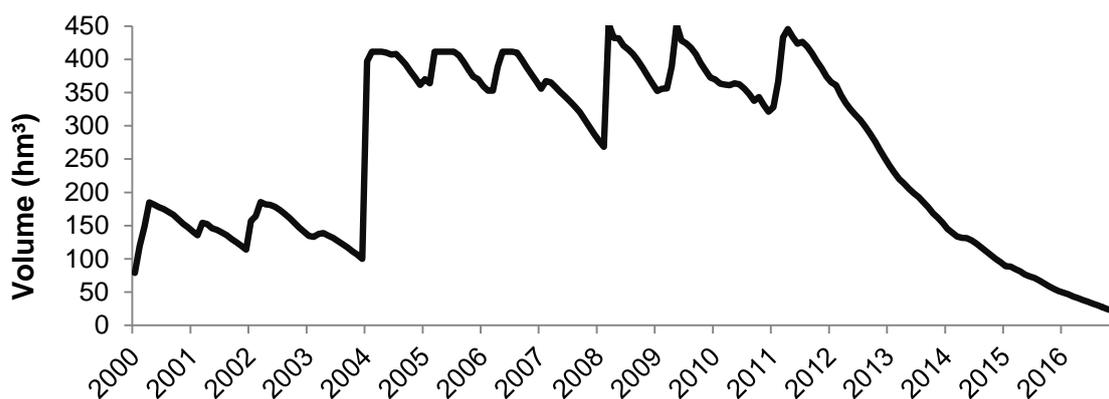


Figura 6 – Volume diário monitorado no Reservatório Eptácio Pessoa, Boqueirão/PB (AESAs, 2016).

Como já relatado, após a chegada das águas da transposição em 2017, o volume do açude aumentou e, conforme informações do Ministério da Integração Nacional (G1 PB, 2017b), estima-se que a vazão de 4 m³/s terá um potencial de abastecer até 2 milhões de habitantes da região, o dobro da demanda atual. Entretanto, mesmo após início da transposição das águas, o sistema vem apresentando alguns problemas técnicos (G1 PB, 2017c; PARAIBAONLINE, 2018).

Conforme Nota Técnica nº 06/2018/CGAOH/DPE/SIH e Processo 59602.000214/201615 TED 02/2016 do Ministério da Integração Nacional (MI) alguns dos referidos problemas técnicos são de ordem de intervenção nos açudes Poções e Camalaú (MI, 2018) na paralização de operação do Eixo Leste em Monteiro/PB (a montante do reservatório Eptácio Pessoa). Enquanto em 2017 o Ministério Público Federal (MPF) em Monteiro apontou precariedade na gestão do sistema Poções-Camalaú (MPF PB, 2017).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção do trabalho serão descritos: as etapas de aquisição de dados, a metodologia utilizada como pré-processamento, os critérios de definição do perfil longitudinal e pontos amostrais e a metodologia de processamento de dados.

4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Em síntese, foram adquiridos diferentes dados orbitais e de campo. O principal produto utilizado foi o MOD09Q1 para extração das informações de reflectância de superfície da água. Entretanto, foram utilizados imagens de outros satélites (LANDSAT, CBERS, RapidEye) para vetorização dos espelhos d'água do açude, SRTM e batimetria na determinação do talvegue (cota mínima do leito d'água dentro do reservatório), e arquivos vetoriais com limites político-administrativos (país, estados, bacias hidrográficas e outros).

As imagens adquiridas do sensor MODIS são do satélite TERRA, produto denominado MOD09Q1, numa janela de estudo de 17 anos (mar-2000 a dez-2016), disponíveis gratuitamente no acervo digital da *Land Processes Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) do USGS/NASA – *U.S. Geological Survey*, totalizando 775 cenas.

Cenas do produto MOD09Q1 – *Surface Reflectance L3 Global V006* (VERMONT, 2015), com resolução espacial de 250 metros, de uma coleção de quatro camadas por cena (banda do vermelho – RED, 620–670 nm; banda do infravermelho próximo – NIR, 841–876 nm; *State e Quality Control*), com composição de 8 dias consecutivos (8-days) de imagens pixel a pixel que apresentaram melhor qualidade em relação a ausência de ruídos (nuvens, sombras, correção geométrica, entre outros). O referido produto já apresenta correção dos efeitos atmosféricos e são georreferenciados em projeção sinusoidal.

Demais imagens orbitais espectrais foram adquiridas gratuitamente no acervo digital do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, USGS e do GeoCatálogo do MMA (Ministério do Meio Ambiente), como os produtos dos satélites LANDSAT 5, 7 e 8, CBERS 2 e RapidEye, com características apresentadas na Tabela 4. Possuem de alta a média resolução espacial, sobretudo de 20 e 30 metros.

Foram selecionadas as cenas livres de nuvens, sombras ou demais ruídos sobre o objeto de estudo, entre os anos de 2000 e 2016; ou aquelas que apresentavam maior cobertura da lâmina d'água do açude, haja vista a alta cobertura de nuvens em regiões tropicais restringe a disponibilidade de cenas.

Tabela 4 – Informações técnicas das imagens orbitais complementares utilizadas na metodologia.

Ano	Satélite/Sensor	Data de imageamento	Resolução espacial (metros)	Órbita e Ponto	Bandas utilizadas
2000	LANDSAT 5/ TM	16/08/2000	30	215 / 065	7/5/3
		06/12/2000			
2001	LANDSAT 5/ TM	15/05/2001	30	215 / 065	7/5/3
2002	LANDSAT 7/ ETM+	13/07/2002	30	215 / 065	3/2/1
2003	LANDSAT 5/ TM	22/06/2003	30	215 / 065	7/5/3
2004	LANDSAT 5/ TM	17/12/2004	30	215 / 065	7/5/3
2005	LANDSAT 5/ TM	29/07/2005	30	215 / 065	7/5/3
2006	CBERS 2 / CCD	20/07/2006	20	147 / 108	3/2/1
2007	CBERS 2 / CCD	06/04/2007	20	147 / 108	3/2/1
2008	LANDSAT 5/ TM	02/05/2008	30	215 / 065	7/5/3
2009	LANDSAT 5/ TM	28/10/2009	30	215 / 065	7/5/3
2010	LANDSAT 5/ TM	22/04/2010	30	215 / 065	7/5/3
2011	LANDSAT 5/ TM	08/03/2011	30	215 / 065	7/5/3
2012	RAPIDEYE 3A	04/02/2012	5	2435627	3/2/1
		17/03/2012		2435628	
2013	LANDSAT 8/ OLI	04/08/2013	30	215 / 065	6/5/4
2014	LANDSAT 8/ OLI	20/06/2014	30	215 / 065	6/5/4
2015	LANDSAT 8/ OLI	18/03/2015	30	215 / 065	6/5/4
2016	LANDSAT 8/ OLI	12/08/2016	30	215 / 065	6/5/4

Destaca-se que mesmo selecionando uma cena para representação do ano, aquela que apresentou menor cobertura de nuvens e sombras, alguns anos não encontrou nenhum registro de cenas totalmente livres de nuvens sobre o açude, como o caso dos anos 2000 e 2012. Diante disso, para o ano de 2000 foram adquiridas duas cenas, com posterior aplicação da técnica de sobreposição com efeito de transparência parcial.

Neste tocante, foi constatada alta limitação, necessitando uso de diferentes sensores e em diferentes datas, não sendo possível definir um único período entre os anos (TABELA 4). Assim, foram realizados testes em alguns anos que forneceram mais de uma cena livre de nuvens (2004 e 2009) em diferentes períodos (chuvoso e seco), que indicaram menor variação do espelho d'água dentro do mesmo ano (intra-anual) do que entre os anos (interanual), resultando, portanto na melhor representação de cenas por cada ano analisado.

Os dados de relevo são oriundos da Missão Topográfica Radar Shuttle (*Shuttle Radar Topography Mission*, SRTM), com resolução de 30 metros, da USGS. Já os arquivos vetoriais dos limites político-administrativos utilizados têm como fontes a AESA (2016), ANA (2016) e IBGE (2010). E em 2013, a ANA realizou um trabalho de campo no açude Epitácio Pessoa para o cálculo de “Curvas Cotas × Área × Volume”, por meio de batimetria, incorporado na Nota Técnica n°. 068/2013/SGI-ANA (ANA, 2013).

4.2 TRATAMENTO DE DADOS

Posterior e concomitante a aquisição de dados, foram realizadas as etapas de pré-processamento dos dados MOD09Q1, com o objetivo de filtragem de pixels de nuvens das cenas antes do seu processamento e extração de informações, procedimentos estes que são ordenados na Figura 7.

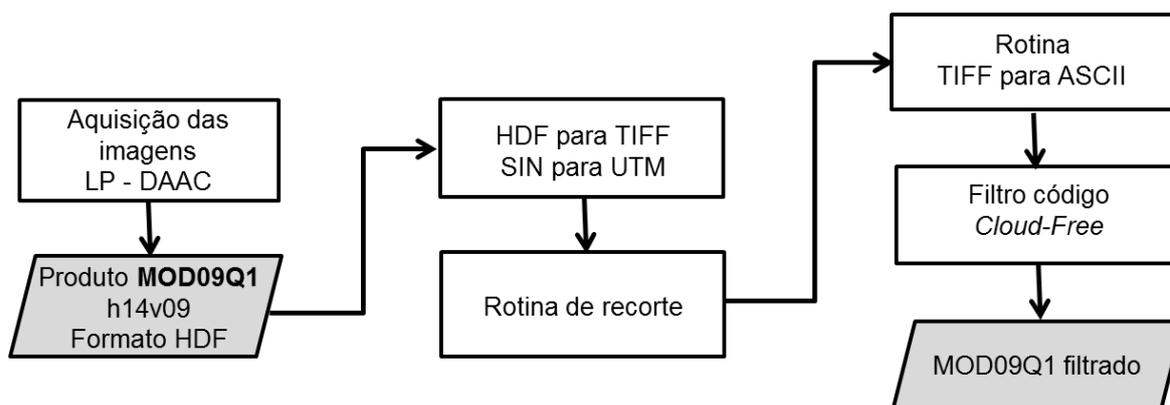


Figura 7 – Fluxograma das atividades de pré-processamento dos dados MOD09Q1

Os produtos dos satélites MODIS são disponibilizados por *tiles*, no caso da presente área de estudo, sendo o h14v09, em extensão HDF (formato padrão destes dados) e projeção sinusoidal; foi necessário então sua conversão para projeção coordenadas planas UTM – Universal Transversa de Mercator – e formato de imagem GeoTIFF (*.tif).

A filtragem de pixels de nuvens se deu por meio de programação, em ambiente do *software* Matlab®, com o código aqui denominado *Cloud-Free*. Em suma, o *Cloud-Free* comparou cada pixel das bandas de reflectância (B1 e B2) com o referente pixel da banda *State* (*Science DataSet/SDS State Flag*) da respectiva cena, sendo extraídos apenas os pixels livres de nuvens.

O algoritmo deste processamento parte da premissa de que os valores decimais de cada pixel da banda *State* (necessitando que sejam convertidos em valores binários, conforme manual da NASA/USGS (NASA LP DAAC, 2016b)), especificadamente quanto aos bit-string 2 e 3 (ou bit-word 13 e 14, respectivamente) fornecem informações de controle de cobertura de nuvens, sendo 00 (*clear*, sem nuvem), 01 (*cloudy*, nuvem), 10 (*mixed*, mistura) e 11 (*not set, assumed clear*; não definido, assume livre de nuvens).

Assumindo a condição mais rigorosa, admitidos apenas pixels com valores 00 (sem nuvens) nas máscaras de filtragem – não incluindo nem mesmo 11 ou 10, o código gera então um produto filtrado, sendo que os pixels com valores “00” permanecem com os valores de reflectância originais, enquanto os demais com valores de -9999, removidos

posteriormente. O processamento foi verificado por meio de 20 cenas selecionadas aleatoriamente, com extração dos valores da nuvem de pixels em outro *software* de ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), o ArcMap®.

Frisa-se que foi preferível não fazer uso da banda de qualidade dos produtos MOD09A1, como alguns autores reproduzem (inclusive o *software* MOD3R do IRD/ANA), apesar da banda deste produto possuir mais informações de qualidade que a *State*, possui menor resolução espacial que os presente dados, restringindo ainda mais os objetivos da pesquisa (reduzindo 4 pixels de 250 m a 1 de 500 m), que é realizar a discussão sob a ótica espacial e viabilidade de extração de dados MODIS.

4.3 SÉRIES TEMPORAIS DE REFLECTÂNCIA

Anterior à extração das séries temporais, foi necessário definir os pixels dos pontos de amostragem e o perfil longitudinal na área de estudo, conforme Figura 8.

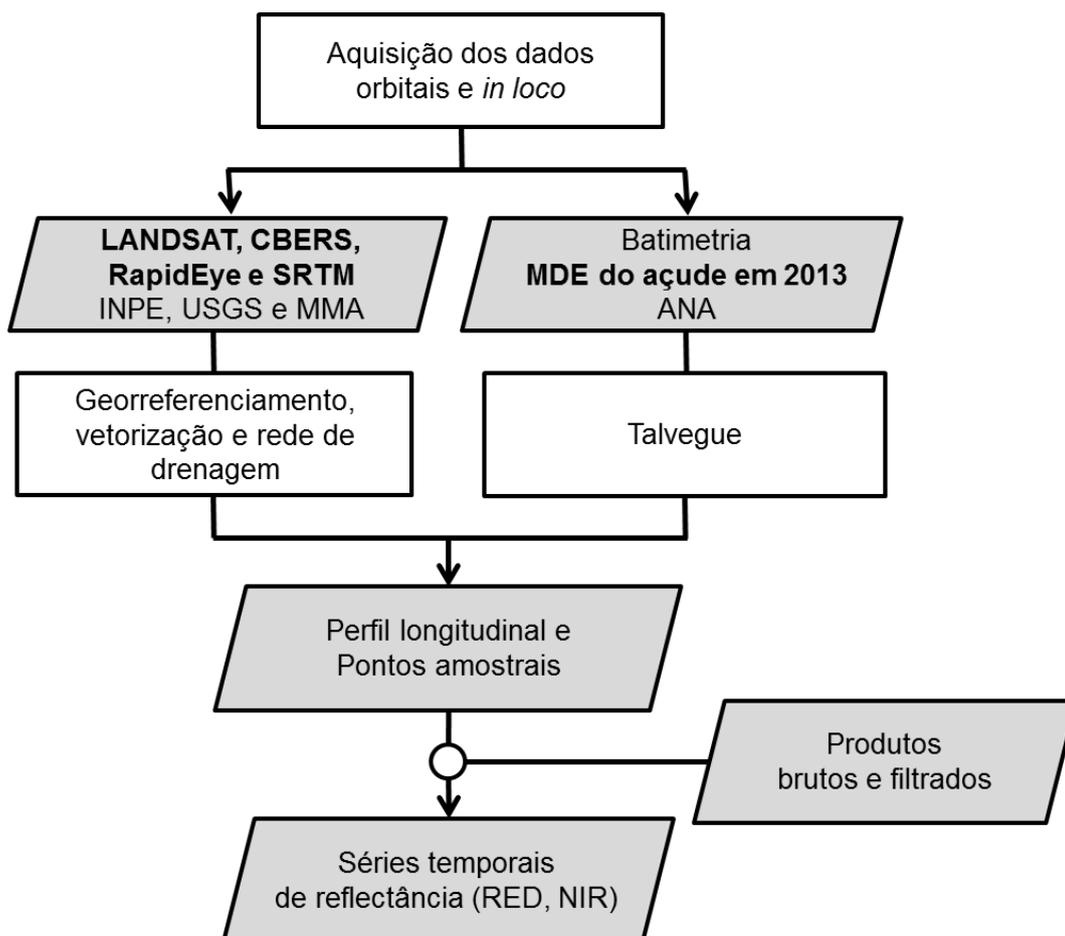


Figura 8 – Fluxograma das atividades de processamento dos dados para geração das séries históricas de reflectância de superfície da água para as bandas 1 e 2.

Como observado, os valores de reflectância dos produtos brutos e filtrados são extraídos, por meio de programação específica para o caso em MATLAB (criação de perfil temporal com base numa nuvem de pontos), com a seleção dos perfis longitudinais e pontos amostrais, estes delimitados conforme descrito adiante.

As imagens orbitais complementares (vide TABELA 4, p. 35 e 36) foram georreferenciadas com fins de integração com as demais camadas do banco de dados em ambiente SIG, com posterior vetorização de seus espelhos d'água, permitindo a geração de 17 máscaras da área de estudo (FIGURA 9), uma referente a cada ano de estudo.

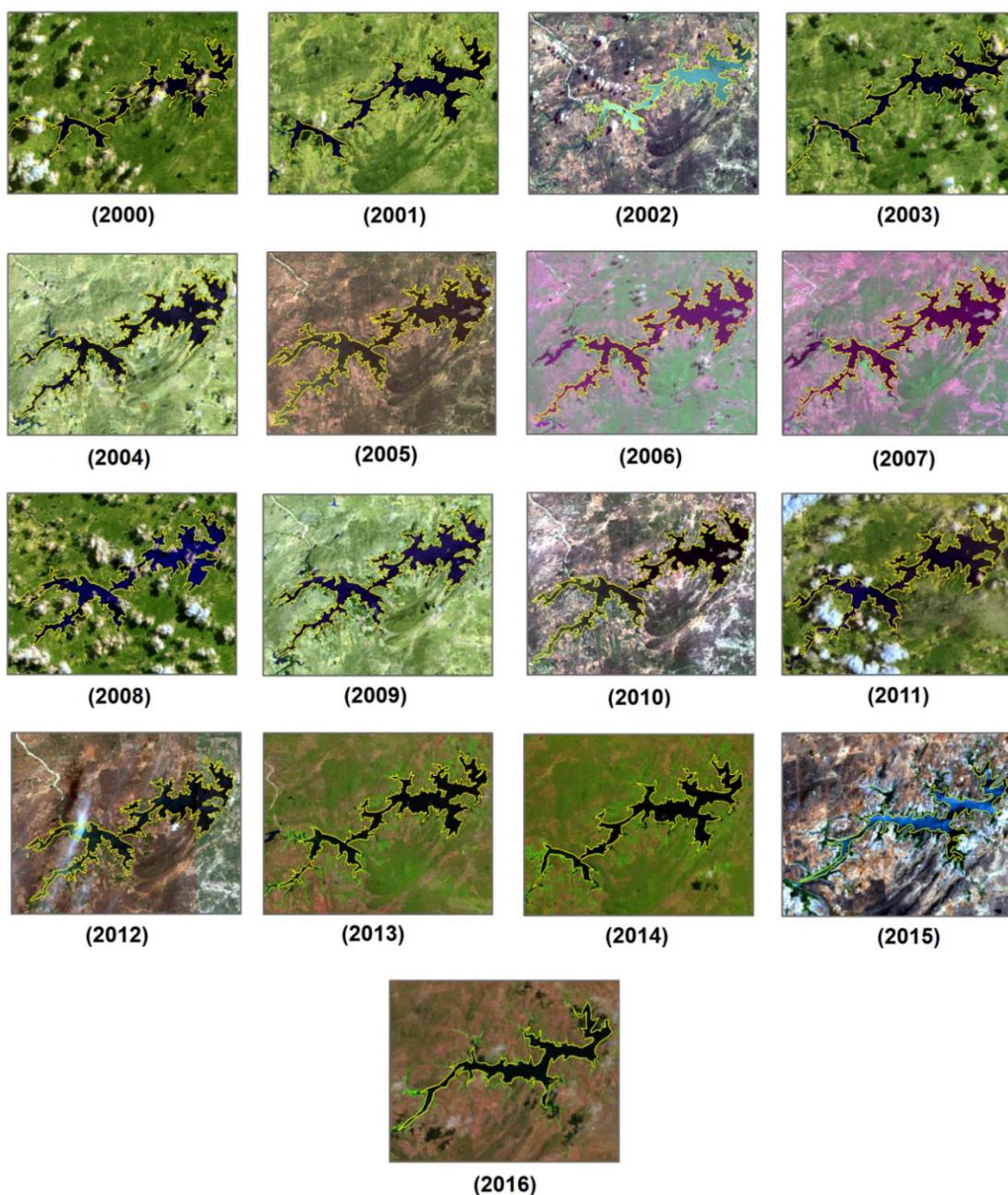


Figura 9 – Delimitação (vetorização) dos espelhos d'água do açude Epitácio Pessoa (PB) entre 2000 e 2016.

Diante desta etapa, foi constatado que a área superficial do reservatório possuía maior oscilação interanual do que o esperado. Outro empecilho elencado foi o surgimento de ilhas dentro do açude, principalmente quando apresenta baixo nível de água; necessitando assim integrar outros dados para que pudessem contribuir na definição de zonas de monitoramento com maior permanência temporal de área inundada na série histórica, para fins de cotejo entre os dados.

Destarte, foi utilizada a imagem de radar SRTM para extrair a rede de drenagem da região (FIGURA 10), objetivando definir o curso d'água natural (ante represamento), uma vez que a probabilidade de presença de água nessa área é maior, por questões topográficas.

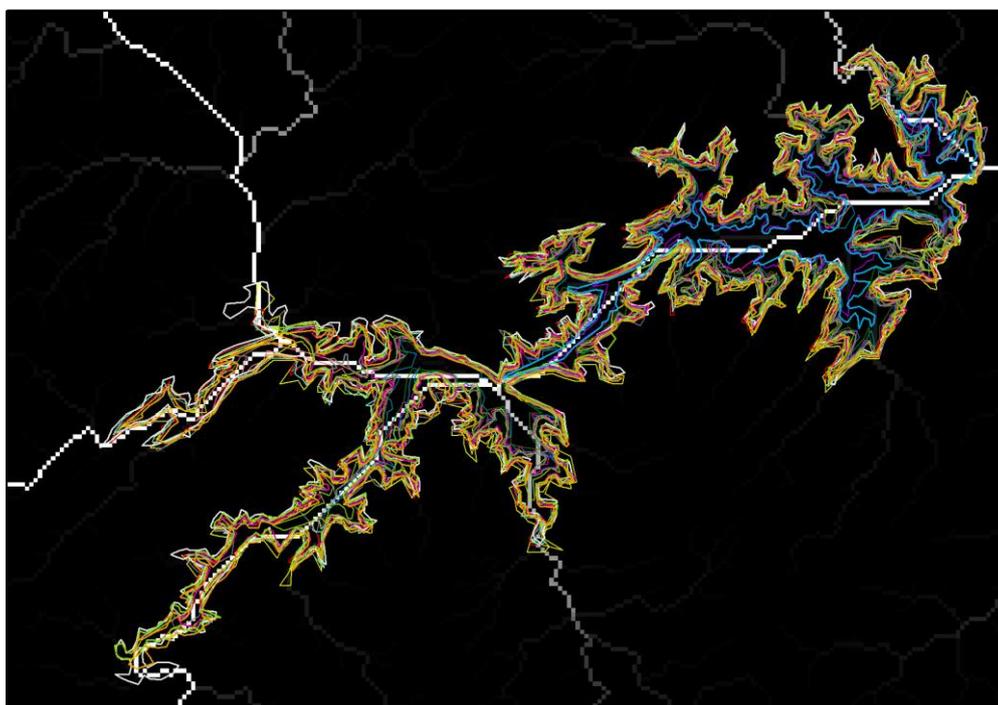


Figura 10 – Integração dos dados vetorizados e rede drenagem do SRTM.

Entretanto, foi observado que a drenagem gerada com dados SRTM poderia mascarar a definição do talvegue do reservatório, pois, como a varredura do radar se deu posterior ao período de barramento do curso d'água (1951 – 1956), o valor de resposta da altimetria, com fortes indícios, deve ser referente ao do nível d'água no momento da coleta (2000) ou próximo a isso, não sendo resposta da topografia.

Por fim, com o intento de balizar essas interferências, foram adquiridos os arquivos vetoriais da batimetria no açude realizada pela Agência Nacional de Águas (ANA) no ano de 2013 – com apoio do CPRM, DNOCS e AESA – materializado na Nota Técnica nº. 068/2013/ SGI-ANA (ANA, 2013), como na Figura 11 apresentada a seguir.

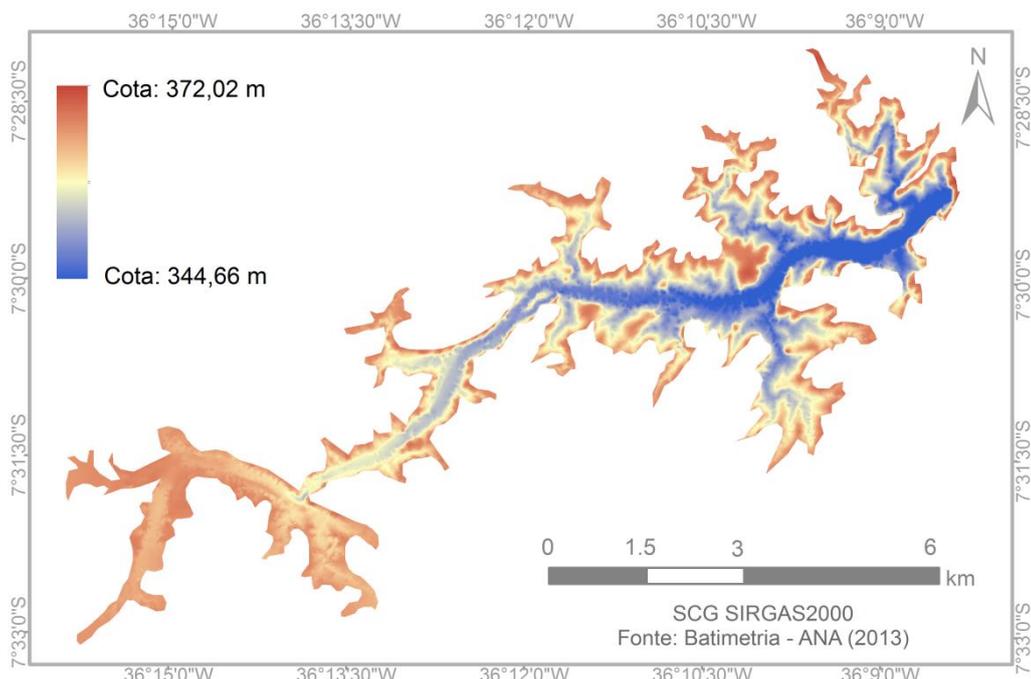


Figura 11 – Modelo Digital de Elevação do Açude Epitácio Pessoa no ano de 2013
Fonte: ANA (2013)

Esses dados permitiram definir o talvegue do açude, e em integração com os demais dados (rede de drenagem, vetorização dos espelhos d'águas anuais e bandas MODIS) definir o perfil longitudinal de monitoramento. (FIGURA 12), permitindo selecionar os pixels com maior presença de áreas correspondente à água, do barramento à entrada do reservatório (rio Paraíba).

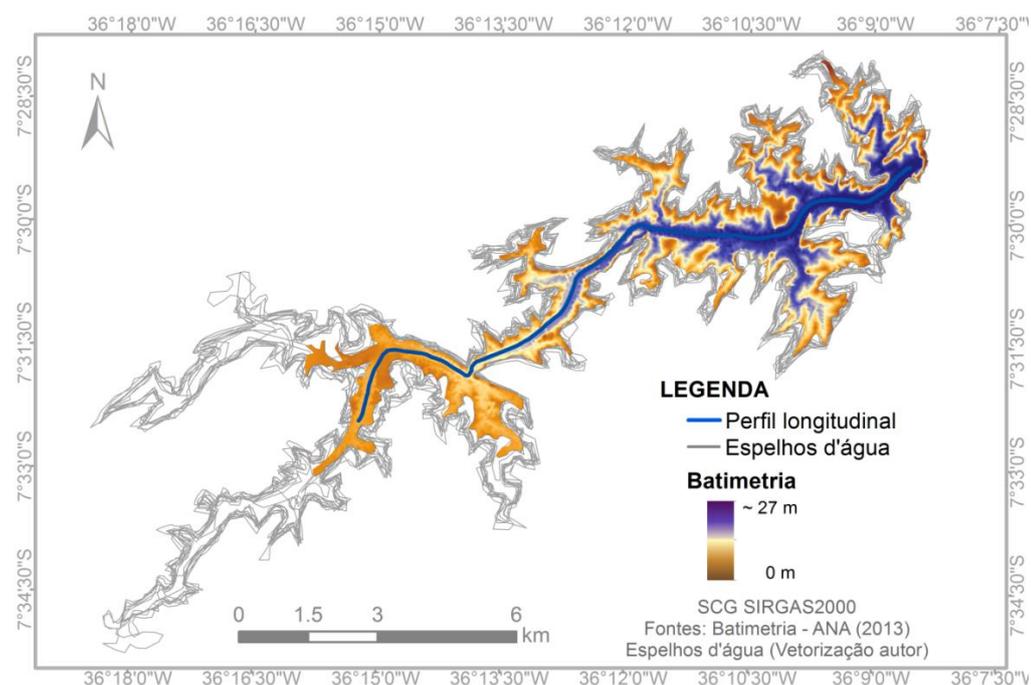


Figura 12 – Perfil longitudinal (talvegue) no Açude Epitácio Pessoa (PB), batimetria (em cor) referente ao ano de 2013 (N = 57)

Os pontos de amostragem estão apresentados na Figura 13, este critério foi preferível ao uso de todos os pixels dentro de cada máscara em razão da limitação de pixels puros e contíguos de água, sem efeito de borda devido à geometria do açude e relativa baixa resolução espacial do sensor MODIS (250 metros).

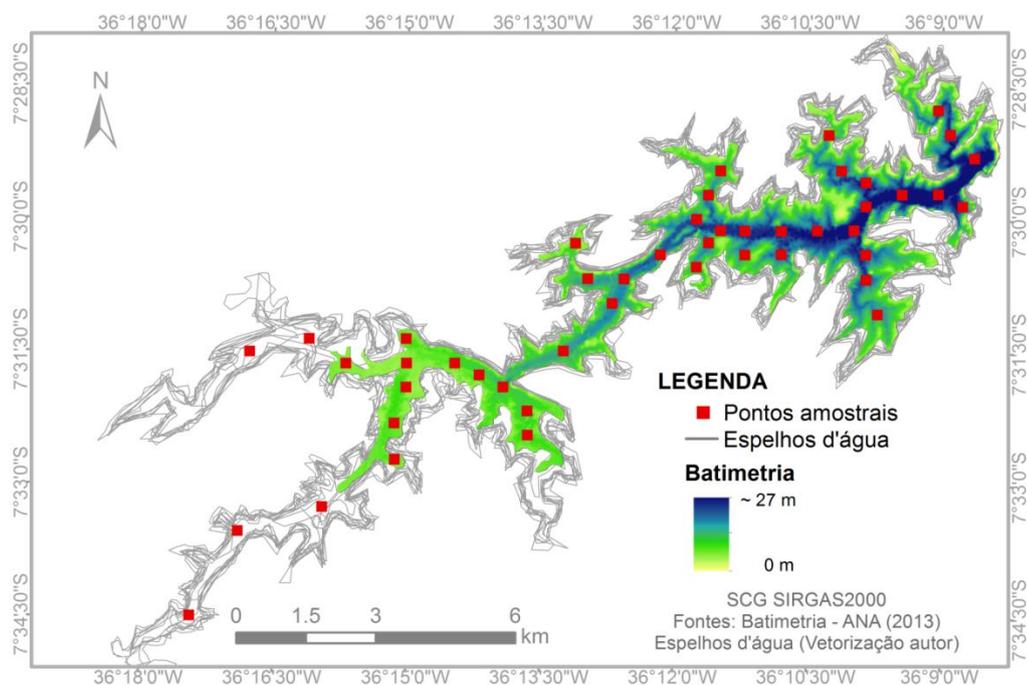


Figura 13 – Pontos de amostragem no espelho d’água do Açude Epitácio Pessoa (PB), batimetria (em cor) referente ao ano de 2013 (N = 46)

Os valores extraídos de cada pixel (perfil longitudinal e pontos amostrais), fornecendo as séries temporais por banda (RED e NIR) – vide Figura 8 –, foram exportadas para planilhas eletrônicas para discussão dos dados por estatística descritiva, com geração de gráficos e tabelas. Nesse momento foi constatado que alguns pixels monitorados não apresentaram nenhum ou pouco dado. Assim, foram desprezados aqueles que não possuíram nem 10% de aproveitamento líquido (número de dados pós-dupla filtragem – de nuvens e das máscaras – em relação aos brutos).

Já para análise espacial de toda superfície do açude, foi realizada interpolação espacial entre os pontos de análise (pontos amostrais). Segundo Alves et al. (2012) a interpolação espacial é uma forma de apresentar o comportamento de determinado atributo (variável), estimando valores de locais não amostrados a partir de dados de locais conhecidos.

Para tanto, existem diferentes métodos de interpolação espacial de dados, tais como *Kriging* (ou *Krigagem*), *IDW* (*Inverse Distance Weighting*, Ponderação do Inverso da

Distância), *Spline*, *Natural Neighbor*, *Trend*, dentre diversos outros. Entretanto, Childs (2004, p. 32) pondera que diferentes métodos de interpolação produzirão quase sempre resultados diferentes, evidenciando com isso que a seleção do(s) método(s) deve ser respaldada na variável/fenômeno em análise, conjunto de dados, dentre outros fatores.

Diante disso, os métodos selecionados para a presente pesquisa foram o *Kriging* e o IDW, com base em estudos com a variável SST e outras de qualidade de águas que já fizeram o uso destes métodos (KIMLEANG et al., 2017; CHEN et al., 2012; HA e KOIKE, 2011, MURPHY et al., 2010), assim como seus cotejos e validações, apresentaram resultados satisfatórios sobre as demais técnicas.

O método de IDW realiza interpolação entre os dados de forma determinística, ou seja, fundamentado na Lei de Tobler, pois estima as medidas desconhecidas por meio da média ponderada das medidas conhecidas, atribuindo maior peso a pontos mais próximos (FARIAS et al., 2017). Trata-se, portanto, de um modelo isotrópico, haja vista que o peso considerado nas distâncias é o mesmo para todas as direções.

Já o método de Krigagem (*Kriging*) a interpolação é realizada por meio de um algoritmo com parâmetros geoestatísticos com base na geração de um variograma, infere o comportamento dos dados (esférico, exponencial, gaussiano, ou outro) (CAMARGO, 1998). Diferencia-se ainda do IDW porque leva em consideração a autocorrelação espacial das variáveis regionalizadas calculada pelo semivariograma (SOUZA et al., 2011 *apud* FARIAS et al., 2017), consistindo, assim, em um modelo anisotrópico. Foram utilizados duas técnicas na Krigagem: Ordinário – OK (*Ordinary Kriging*, com modelo semivariograma esférico) e Universal – UK (*Universal Kriging*, com modelo semivariograma linear).

4.4 MODELOS DE ESTIMATIVAS DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST)

Preliminarmente, a proposta de pesquisa consistia em fazer uso de dados de campo de Sólidos Suspensos Totais (SST), obtidos diretamente no órgão oficial SUDEMA, para calibrar um modelo matemático para os demais pixels referentes ao açude em estudo. Entretanto, a análise estatística entre os valores de reflectância do pixel de coleta (coordenadas de coleta *in loco*) com os dados de SST de campo se apresentou inconsistente, inclusive com índices de correlação com valores negativos (para ambos comprimentos, RED e NIR), contraponto a literatura, que apresentam índices positivos; o que inviabilizou o uso destes dados para geração ou calibração de um modelo.

Uma possível explicação para o caso é que o ponto de coleta era muito próximo à barragem, apresentando um pixel como não homogêneo, fortemente influenciado pelo efeito de mistura espectral; ou próximo à tomada d'água (ponto de captação no manancial para tratamento), gerando ressuspensão de sedimentos ou outro fenômeno que favoreceu a mistura de diferentes camadas d'água e de sólidos. Estima-se que seja o segundo, haja vista que análises estatísticas foram refeitas para pixels vizinhos, apresentando o mesmo comportamento nos índices. Entretanto, por se tratar de dados oriundos de órgão oficial de gestão de qualidade das águas, serão utilizados no cotejo dos resultados dos dados.

Portanto, nessa última etapa da metodologia realizada na pesquisa são aplicados três modelos de estimativa de SST: M1 – Miller e McKee (2004); M2 – Villar et al. (2013); e M3 – Robert et al. (2017). Sendo suas etapas apresentadas no fluxograma a seguir (FIGURA 14).

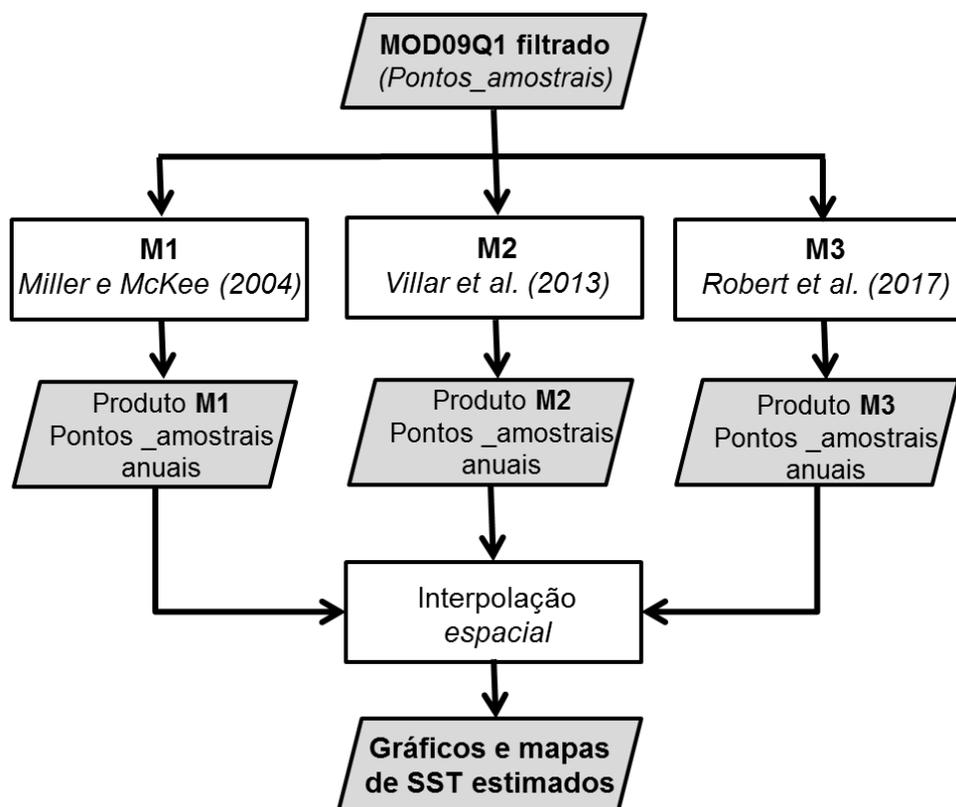


Figura 14 – Fluxograma das atividades para aplicação dos modelos de estimativa de SST

Apesar de facilmente encontrar na literatura uma gama de modelos que fazem uso de produtos MODIS na estimativa de SST, há carência de trabalhos aplicados em águas continentais, sobretudo em regiões climáticas de semiárido; diante disso, os critérios de seleção dos modelos para estimativa foram (1) área de estudo em massas de águas continentais ou estuarinas, (2) mesmos produtos de entrada (bandas espectrais, satélite e

resolução espacial), (3) modelos matematicamente simples e reaplicados sobre diferentes condições, (4) condições climáticas semelhantes, e (5) modelos com faixas de SST (TSS) estimados menos restritivas e, quando possível, similares aos observados no açude Epitácio Pessoa.

As áreas de pesquisa de Miller e McKee (2004) foram em diferentes tipos de ambientes, como o Lago Pontchartrain (EUA), o Delta do Rio Mississippi e Seno de Mississippi (*Mississippi Sound*), o modelo dos autores (EQUAÇÃO 3) apresentou uma forte relação linear entre os dados de reflectância da Banda 01 (RED, Rrs 645 nm) e dados de campo de concentração de SST ($R^2 = 0,89$; $N = 52$; $EQM = 4.74$; $Range = 0 - 60$ mg/L), mesmo para águas claras e turvas, segundo os autores.

$$SST (mg/L) = -1,91 + (1140,25 \times RED) \quad (3)$$

O modelo dos autores fora replicado em outros estudos (KUMAR et al., 2016; CHEN et al., 2015; MISHRA e MISHRA, 2010), com calibração de dados regionais, apresentando resultados satisfatórios, de acordo com os autores.

Villar et al. (2013) estimaram valores de sólidos suspensos em águas brasileiras (Rio Madeira), em diferentes estações na bacia Amazônica. Seu modelo (EQUAÇÃO 4) faz uso da relação entre os pares de reflectância das bandas RED e NIR. Para a estação de Porto Velho, os autores encontraram uma correlação de 0,78 ($N = 282$; 10 campanhas; $Range = 25 - 622$ mg/L) entre o balanço das bandas com dados *in situ* de sedimentos suspensos, enquanto para dados de reflectância em campo a correlação foi de 0,95.

$$SST (mg/L) = 1020 \times \left(\frac{RED}{NIR} \right)^{2,94} \quad (4)$$

Já o terceiro modelo de estimativa, Robert et al (2017), fora determinado em lagos dispostos numa região do semiárido africano, Sahel. Diferente do primeiro modelo (M1) e da maioria dos modelos menos complexos da literatura (TABELA 2, p. 28), os autores fizeram uso da banda NIR (EQUAÇÃO 5).

$$SST (mg/L) = \left(NIR/485,89 \right)^{1/0,2725} \quad (5)$$

O M3 apresentou uma regressão de quase 70% dos dados orbitais utilizados com análise de SST observados em campo. Entretanto, cabe ponderar que tanto dados orbitais do MODIS (N = 60) e do sensor LANDSAT (N = 37) foram utilizados na modelagem. Um aspecto relevante é a faixa dos valores de sedimentos obtidos em campo, variando de 106 a 4.178 mg/L, indicando a considerável amplitude que ambientes de semiárido apresentam para a variável SST.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção os resultados e sua discussão se darão em três etapas, conforme os objetivos específicos da pesquisa. As três etapas são (1) dinâmica da lâmina d'água do açude Epitácio Pessoa, (2) sua análise espaço-temporal e (3) a estimativa de sólidos suspensos totais (SST).

5.1 DINÂMICA DA LÂMINA D'ÁGUA

A Tabela 5 expõe os valores de área e perímetro do espelho d'água do açude durante a série histórica de 17 anos analisada.

Tabela 4 – Variação área e perímetro do espelho d'água da área de estudo (2000-2016)

Ano	Área (km ²) – A	ΔA (km ²)	Perímetro (km) – P	Relação P/A
2000	19.538	-	108.921	5.575
2001	17.747	-1.791	102.924	5.800
2002	21.824	4.077	115.746	5.304
2003	16.690	-5.134	102.817	6.160
2004	39.444	22.754	164.727	4.176
2005	42.245	2.801	184.606	4.370
2006	35.108	-7.137	149.140	4.248
2007	32.395	-2.713	146.210	4.513
2008	40.831	8.436	147.299	3.608
2009	39.628	-1.204	170.142	4.293
2010	35.774	-3.854	157.603	4.406
2011	38.251	2.477	159.894	4.180
2012	38.432	181	171.739	4.469
2013	22.296	-16.136	118.052	5.295
2014	16.162	-6.134	88.772	5.493
2015	7.240	-8.922	53.189	7.347
2016	6.348	-892	47.995	7.561

Observa-se que as maiores áreas de espelho d'água foram registradas em 2004, 2005, 2008 e 2009. Em contraste, as menores em 2015 e 2016. Isso é naturalmente motivado pelo período de chuva e estiagem na região. Dentre os 18 eventos de sangrias já ocorridos no reservatório (G1/PB, 2017), seis foram registrados dentro da janela temporal analisada: 2004, 2005, 2006, 2008, 2009 e 2011 (vide FIGURA 6, p. 34).

Já nos últimos anos, em destaque para o ano de 2016 e 2017, foi assentada uma das piores estiagens ocorridas no açude nos seus 60 anos, refletindo na baixa lâmina d'água no ano de 2016 (TABELA 5), iniciada em meados de 2012, com redução de áreas nos demais anos (valores negativos no ΔA) com volume na marca de 4,8% de sua capacidade de armazenamento em dezembro de 2016 (G1 PB, 2016).

A discussão quanto à geometria dos açudes no nordeste brasileiro e suas implicações não são recentes, Molle (1994, p. 8) afirma que por geometria “entende-se a forma geral da aguada e do vale barrado pela represa” e que para uma mesma profundidade, a superfície do espelho d'água e seu volume pode variar numa razão de 1 a 100. Analisando geometricamente o espelho d'água do açude, relação Perímetro/Área, os maiores índices para os anos de 2015 e 2016, com menores nos anos de 2004, 2008 e 2011, condizendo à argumentação realizada anteriormente quanto à sangria e estiagem.

É importante destacar a sua relação Perímetro/Área, haja vista que quanto maior for esse índice, maior poderá ser a influência do efeito de borda do reservatório, por mistura espectral, e isso reflete numa menor frequência de pixels puros e maior de pixels que sofrem efeito na zona litorânea, revelando a necessidade de maior atenção nestes anos durante os processos de filtragem e seleção de pixels.

Bem como, uma característica marcante na área de estudo, açude Epitácio Pessoa, foi a intensa variabilidade interanual do espelho d'água, de até 665% quando se compara sua área mínima e máxima (ano de 2016 e 2005), dificultando com isso a definição de uma superfície fixa, aspecto que deve ser pontuado em reservatórios dispostos no semiárido.

Essa variabilidade possui diferentes fatores que influenciam, desde características climatológicas da região (elevada evapotranspiração, baixos índices de precipitação) a questões do regime de uso de suas águas (adução, político-gerenciais); afetando por consequente no balanço hídrico de massas, relação entrada e saída de água.

Não somente a informação de área absoluta (TABELA 5) teve impacto na metodologia da pesquisa, cabe discutir ainda a distribuição espacial da área do espelho d'água. Durante o processamento dos dados, como descrito na metodologia, foi constatado que devido ao comportamento geométrico do espelho d'água – com contrações, afunilamentos, ramificações dendríticas e formações de ilhas – em virtude da natureza topográfica da área ocorrem algumas interferências na composição do pixel, resultando em pixels “não-puros”, ou de composição heterogênea.

E como também descrito na etapa metodológica, almeja-se que essas interferências foram superadas, ou consideravelmente mitigadas, durante a vetorização do polígono da

área da lâmina d'água (espelho d'água), na segunda etapa de filtragem (F-2), haja vista que esta etapa foi sumamente importante em razão da baixa resolução espacial dos dados de reflectância (250 m) do MODIS, quando comparada com resolução espacial de outros satélites/sensores imageadores (LANDSAT, CBERS e RapidEye).

Assim, um possível indicador para avaliar a influência da vetorização das máscaras por ano é a relação entre as bandas espectrais $[(Rrs\ 859\ nm)/(Rrs\ 645) > 1.5]$ no qual, segundo Kumar et al. (2016), valores acima de 1.5 na razão (NIR/RED) apresentam indícios de terra e vegetação emergente em águas. Diante disso, foi gerado um gráfico (FIGURA 15) da frequência do número de pixels com valores maiores ou iguais a 1,5 da citada relação, entre as duas etapas de filtragem de pixel (F-1, de nuvens; e F-2, das mascaras vetorizadas).

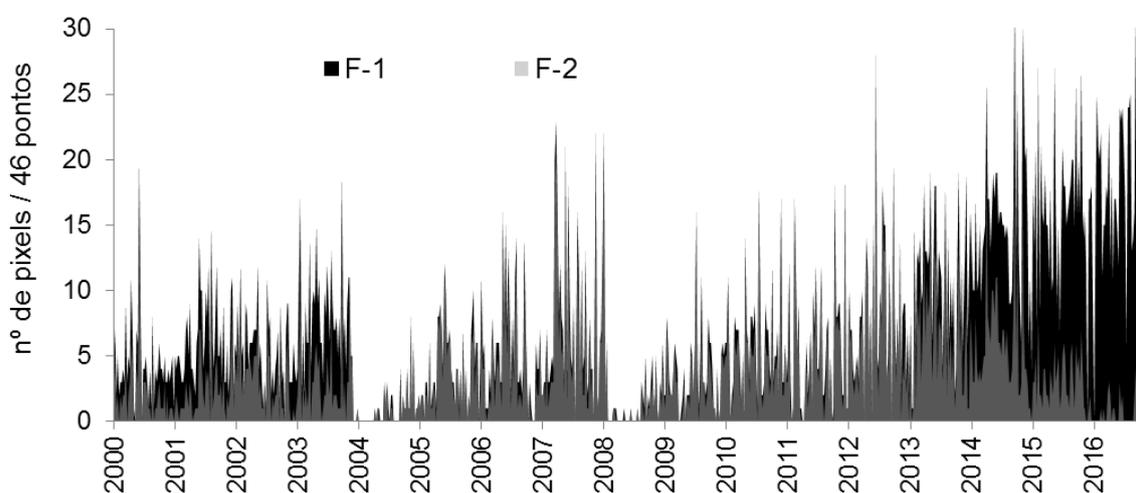


Figura 15 – Quantidade de pixels iguais ou maiores que 1.5 (relação NIR/RED) entre filtragem F-1 (pós remoção nuvens) e filtragem F-2 (pós remoção com as máscaras).

Nota-se uma acentuada remoção de pixels em alguns anos, sobretudo nos últimos anos do intervalo estudado (2013 a 2016), enquanto que para outros anos, os pixels permaneceram (coloração cinza) mesmo após os dois processos de remoção, representando menos de 8% dos valores. Entretanto, apesar de ser um bom indicador, não se pode determinar substancialmente, com base em apenas dois comprimentos de onda, que o remanescente ainda se trata de vegetação emergente, uma vez que para tanto, outros comprimentos devem ser integrados na discussão, como o caso da faixa do verde (GREEN), banda não disponível para o produto MOD09Q1.

Face ao que foi dissertado neste capítulo, a Figura 16 apresenta algumas das interferências mencionadas que são melhores distinguidas em produtos de melhor resolução espacial (vide TABELA 4, p. 36).

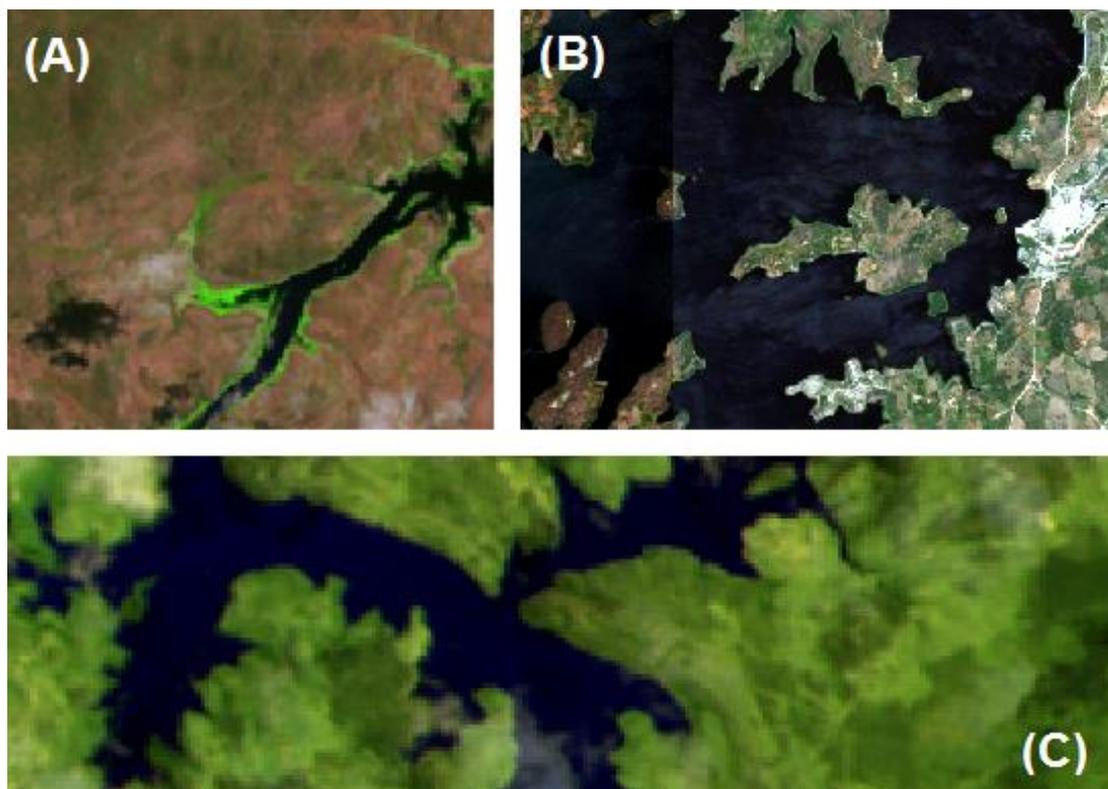


Figura 16 – Interferências intencionadas na remoção pela metodologia, (A) vegetação emergente de borda, (B) presença de ilhas e (C) contrações na geometria do açude.

Cita-se as principais perturbações como (A) presença de vegetação litorânea – vegetação emergente, possivelmente macrófitas aquáticas; (B) presença de ilhas de superfície no açude; e (C) estrangulamentos no canal e presença de nuvens, que neste caso foi utilizada a técnica de sobreposição de cartas com uso de transparência para auxiliar na delimitação do polígono.

Destarte, infere-se que a metodologia de extração de pixels proposta permitiu derivar pixels no açude de maior confiança na representação da classe de água; todavia, os pixels declarados como filtrados podem sofrer interposição de outras origens, limitando a metodologia ao que foi proposto e às condições inerentes dos dados utilizados durante o processo.

5.2 ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DA REFLECTÂNCIA DA ÁGUA

A síntese estatística dos dados das séries históricas (banda RED e NIR), dos pontos amostrais, para os produtos filtrados por ano está apresentada na Tabela 6. Foram selecionados os pixels dos pontos amostrais em virtude da melhor distribuição espacial dos dados (vide FIGURA 13, p. 42), no intento de representar melhor as nuances do açude.

Tabela 5 – Descrição estatística dos dados de reflectância de superfície da água (2000-2016) nas bandas em estudo (RED e NIR) para os pontos amostrais.

Banda	Estatística	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
B01 (RED) (%)	Min.	2,34	2,01	1,93	0,87	1,46	0,16	0,25	0,17	0,84
	Máx.	77,17	85,03	79,36	69,31	61,53	84,48	89,32	83,88	73,30
	Média	15,76	13,60	13,02	12,63	16,55	11,20	7,61	9,52	12,16
	Mediana	11,03	9,37	9,39	9,00	14,89	5,82	3,76	4,35	8,86
	DP	12,09	11,43	10,43	9,92	9,74	12,70	10,13	12,77	10,39
	N.	616	559	741	677	774	834	755	791	865
B02 (NIR) (%)	Min.	0,96	0,96	0,85	0,55	0,99	0,37	0,19	0,23	0,33
	Máx.	80,41	89,16	83,47	73,90	67,18	86,33	66,70	88,61	79,14
	Média	17,61	15,50	15,23	14,64	13,72	13,25	9,14	11,99	11,39
	Mediana	12,77	10,80	11,56	11,40	9,71	7,63	5,25	6,41	7,16
	DP	14,62	13,77	12,69	12,01	12,27	14,40	11,13	14,11	11,84
	N.	616	559	741	677	774	834	755	791	865
n° de cenas		39	45	46	46	46	46	46	46	46
Banda	Estatística	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	-
B01 (RED) (%)	Min.	1,01	0,27	0,19	0,12	0,44	0,39	0,24	1,26	-
	Máx.	70,92	77,23	69,46	79,34	85,89	72,86	82,18	55,68	-
	Média	10,43	9,49	10,12	8,87	11,77	10,52	10,76	10,69	-
	Mediana	6,33	5,30	6,55	4,31	6,56	5,84	7,60	6,71	-
	DP	10,97	11,68	10,03	10,00	13,00	12,64	11,51	12,05	-
	N	797	848	870	877	683	475	234	51	-
B02 (NIR) (%)	Min.	0,34	0,34	0,46	0,29	0,52	0,83	0,62	2,05	-
	Máx.	75,68	83,27	74,84	83,27	89,74	79,20	93,02	61,42	-
	Média	11,86	11,23	11,77	10,65	16,12	16,87	17,26	14,84	-
	Mediana	6,99	6,12	7,59	6,75	11,86	12,41	13,74	11,84	-
	DP	12,96	13,29	11,90	11,67	14,23	14,15	13,23	12,84	-
	N	797	848	870	877	683	475	234	51	-
n° de cenas		46	46	46	46	46	46	46	46	

Legenda: Mín. (valor mínimo), Máx. (valor máximo), DP (Desvio padrão), N (número de pixels pós-filtragens).

Observa-se que para ambas as bandas em todos os anos a mediana sempre foi inferior ao valor da média, retratando que o conjunto de dados amostrais tende uma distribuição enviesada para a direita, ou seja, com curva de assimetria positiva, com maior frequência de dados de valores de baixa reflectância; todavia, como os dados estão sendo discutido na perspectiva temporal, valores de pixels de variação espacial interferem nesta discussão.

Em termos gerais, o conjunto de dados da banda 1 (RED) apresentaram menores valores que da banda 2 (NIR). Para a primeira, aproximadamente 70% dos dados anuais (Média±DP) variaram entre 1 e 26% de reflectância, com uma média de 11%. Enquanto

que para a segunda, 70% dos valores se concentraram entre 3 a 32%, em uma média global de 13%. Apesar de aparentar altos valores de reflectância para água, faixas similares foram encontradas por outros autores: 0-25% na banda RED de açudes no semiárido cearense e potiguar (VENTURA, 2013), 1-15% na RED em reservatórios paulistas (PISCOYA, 2013a); 1-20% para banda NIR e 3-25% na RED em reservatório mineiro (PINTO et al., 2014); 15-45% para NIR em lagos do semiárido africano (ROBERT et al., 2017).

Com fins de análise de todo o contexto do açude e para comparar os dados brutos, filtragem de nuvens (F-1) e filtragem com as máscaras (F-2), foram aferidas as médias dos pontos monitorados em cada uma das 775 cenas utilizadas, apresentados na Figura 17 (para os pixels do perfil longitudinal) e Figura 18 (para os pixels dos pontos amostrais).

Conforme Figura 17, observa-se nas séries históricas de ambas as bandas que, em determinados períodos da janela temporal analisada, as médias dos dados brutos em relação aos filtrados (F-2) tanto subestimaram como superestimaram os valores de reflectância. A banda que apresentou maior sensibilidade neste ponto foi a do infravermelho (NIR), especialmente a partir de 2013, nos quais os valores filtrados finais (F-2) foram menores que os brutos e que os de remoção das nuvens (F-1).

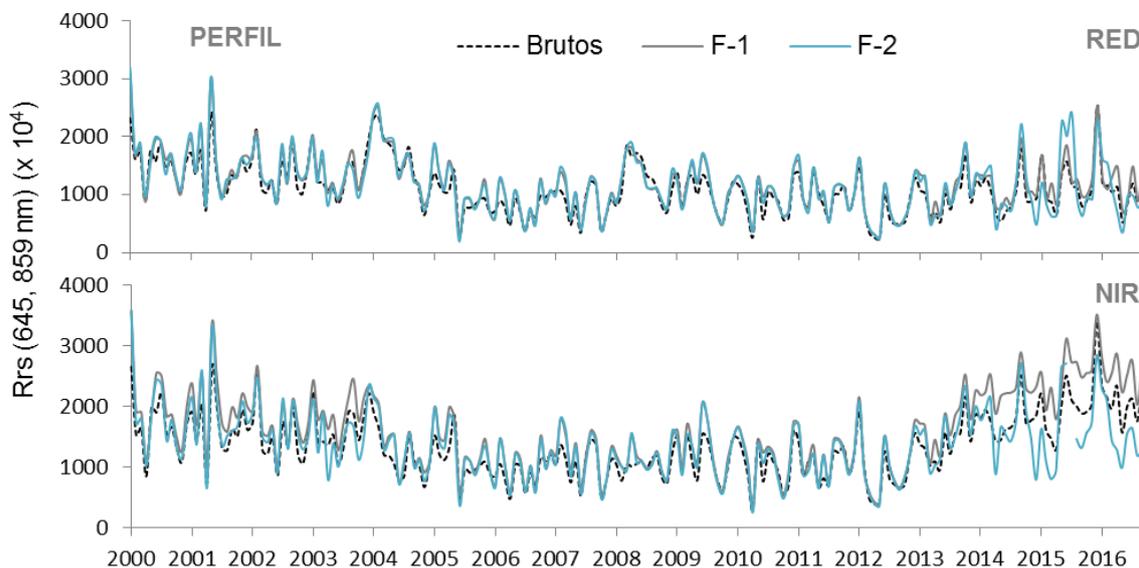


Figura 17 – Séries temporais (bruta, pós-filtragem 1 e 2) de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos perfis longitudinais (N = 39), 2000-2016.

As Figuras 17 e 18 apresentam uma variabilidade dos dados similar, podendo estar diretamente interligadas às condições ambientais do semiárido, circunstanciadamente pela alta variabilidade espaço-temporal da precipitação da região, com possibilidade de constantes períodos de estiagem (AESÁ, 2018; HARZALLAH et al., 1996).

Também, a Figura 18 ilustra o comportamento dos dados médios e da concentração dos dados para a banda RED e NIR referente às faixas discutidas anteriormente da Tabela 6 (vide p. 51), variabilidade assim como constata os dados da Figura 17.

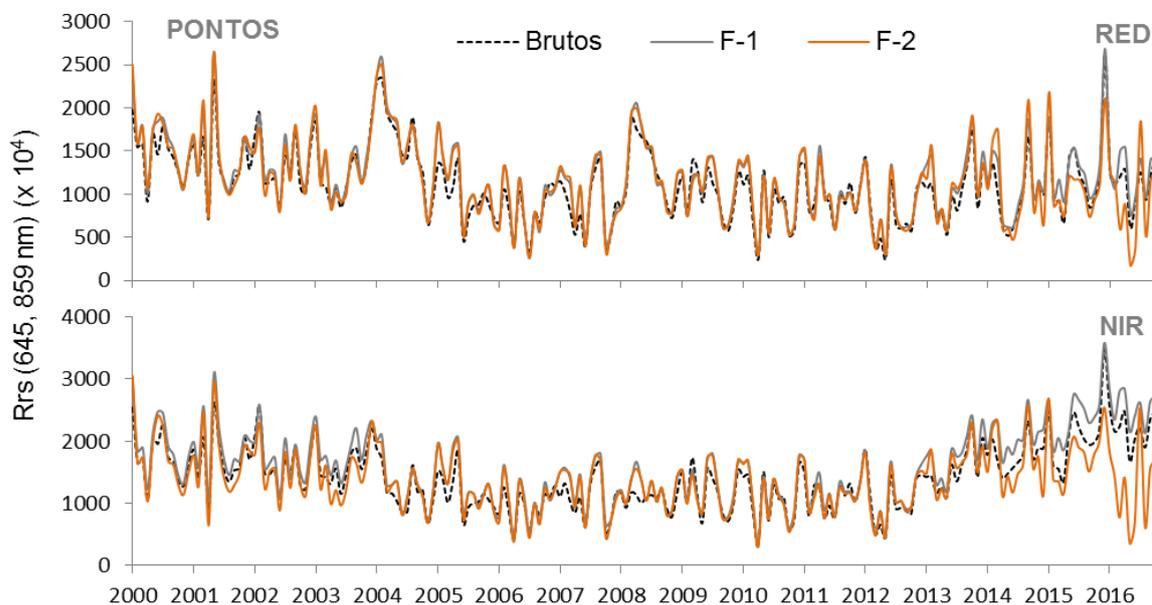


Figura 18 – Séries temporais (bruta, pós-filtragem 1 e 2) de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos pontos amostrais ($N = 37$), 2000-2016.

Na perspectiva espacial dos dados, são apresentados a seguir os valores médios para o perfil longitudinal (FIGURA 19).

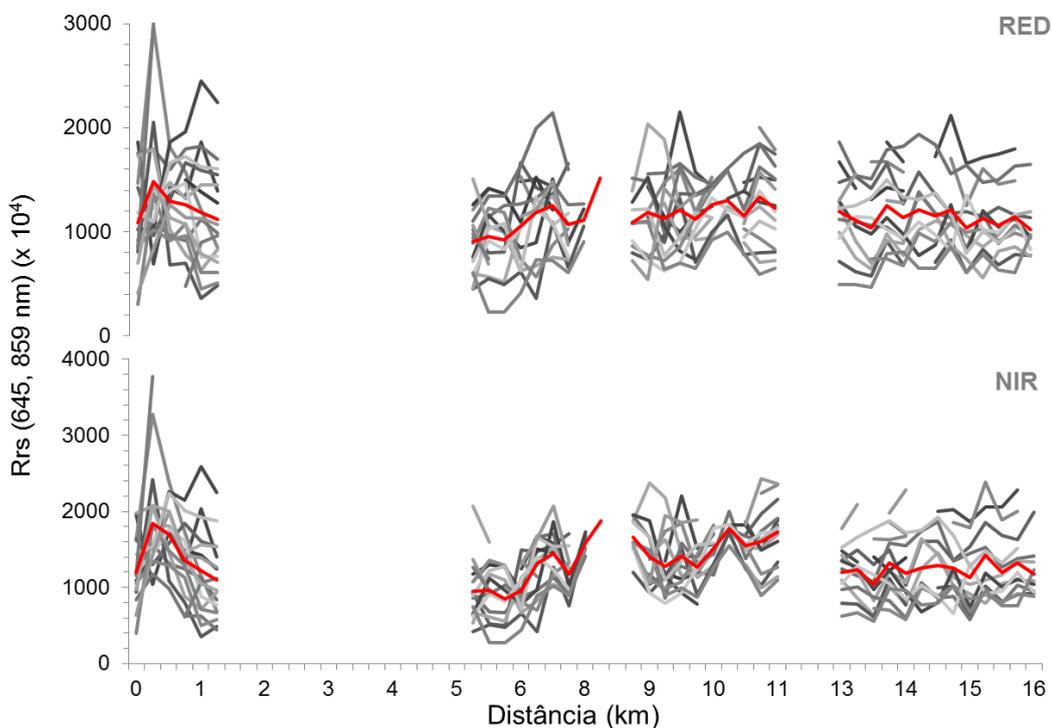


Figura 19 – Valores de reflectância das bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias anuais e global (vermelho) para os pixels do perfil longitudinal ($N = 39$), 2000-2016

Tratando-se do perfil longitudinal do açude, foram projetados os dados desde a sua entrada no açude pelo rio Paraíba até o barramento, com uma distância de aproximadamente 16 quilômetros no comprimento do talvegue (FIGURA 19). A análise espacial das séries para o perfil longitudinal não foi profícua, apresentando acentuadas lacunas de pixels que foram removidos. A primeira, e maior – de 4 km (entre 1,2 e 5,2 km de distância) –, lacuna foi proveniente da alta presença de nuvens nos pixels desta faixa (removidos na F-1) em toda série histórica, com pixels sem nenhum dado pós F-1 ou com baixo aproveitamento.

Enquanto as duas outras lacunas de dados (em 8 e 11-13 km) foi em razão da segunda etapa de filtragem (F-2) com uso das máscaras. Esse tópico remete à questão das dificuldades derivadas pela geometria do açude, sendo zonas nas quais os pixels coincidiram com contrações do espelho d'água, haja vista que a resolução espacial de 250 m extrapolava os limites da área da área alagada. Conquanto, esses entraves são em virtude das condições meteorológicas da área e do açude e não imposta pela metodologia.

Neste caso, não foi factível na área de estudo, por meio do perfil longitudinal, analisar o comportamento da reflectância sob esta ótica espacial (entrada e saída do açude), como em Pinto et al (2014) e Piscoya (2013b) e de outros que relatam um maior aporte de sedimentos (ou de reflectância) na entrada de reservatórios quando comparados a área próxima a barragem, efeito decorrente da mudança da hidrodinâmica.

Quanto à observação temporal dos dados, especialmente em relação à mensal, a Figura 20 e 21 apresentam os valores médios de cada série (pixel) de janeiro a dezembro para os dados de perfil longitudinal (FIGURA 20) e dos pontos amostrais (FIGURA 21).

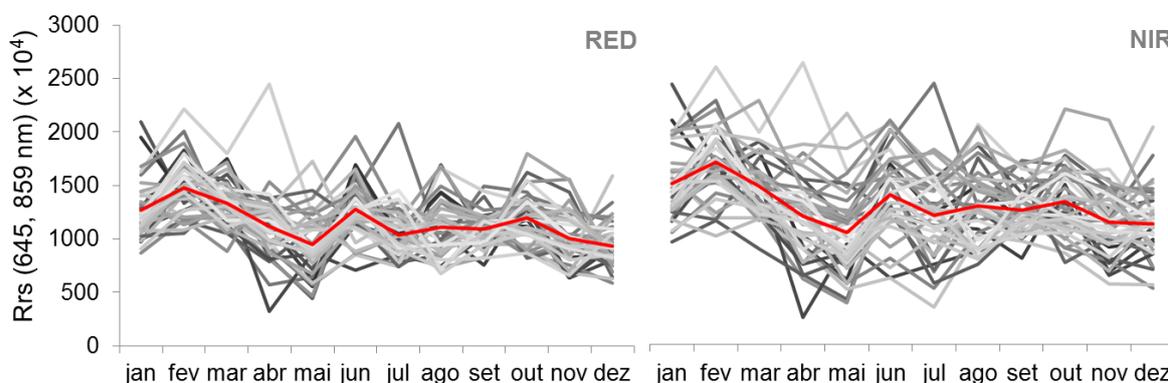


Figura 20 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos pixels dos perfis longitudinais (N = 39) e global (vermelha), 2000-2016.

Valores para a banda NIR foram mais flutuantes em relação às médias globais (vermelha e amarela) do que para a banda RED (FIGURAS 20 e 21). Os valores médios globais se concentraram entre 9 a 18% de reflectância, consoantes com alguns trabalhos da literatura, com máximas em fevereiro e mínimas em maio, apontando um reflexo do regime pluviométrico nas áreas de drenagem do açude, que será discutido posteriormente.

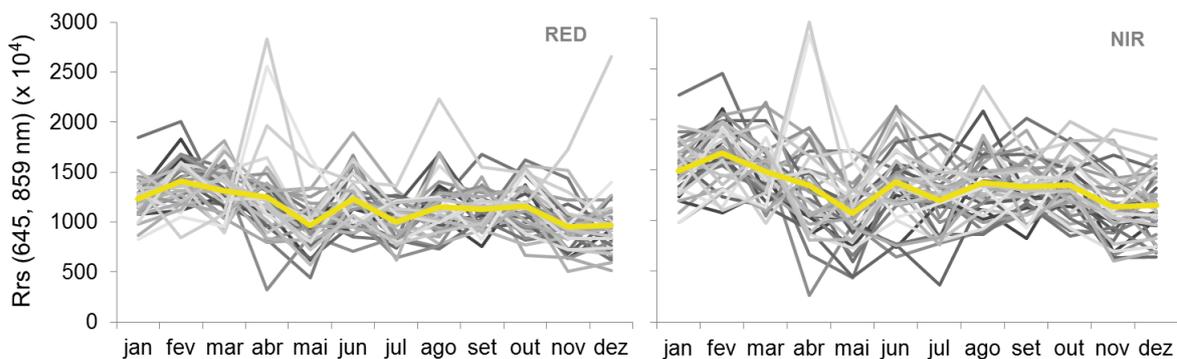


Figura 21 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias mensais dos pixels dos pontos amostrais (N = 37) e global (amarelo), 2000-2016.

Na análise interanual (FIGURA 22 e 23), a banda RED apresentou maior oscilação entre os valores dos pixels e, sobre a média, com valores máximos nos anos de 2000, 2004, 2008 e a partir de 2013.

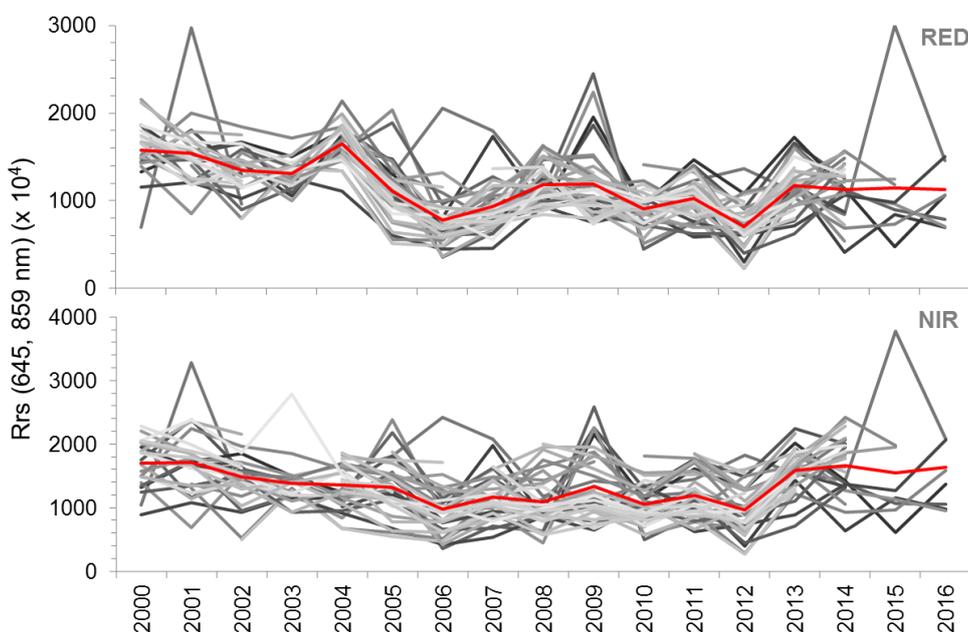


Figura 22 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias anuais dos perfis longitudinais (N = 39) e global (vermelha), 2000-2016

A Figura 23, cotejando a banda NIR com à da Figura 22, apresentou maior flutuação entre os pixels, especificadamente entre as médias no ano de 2006. As quatro

exposições interanuais apresentaram em comum o aumento (de 2012 a 2013) e manutenção dos valores médios até 2016, inferindo a influência da estiagem prolongada (2012-2016) na resposta espectral de reflectância.

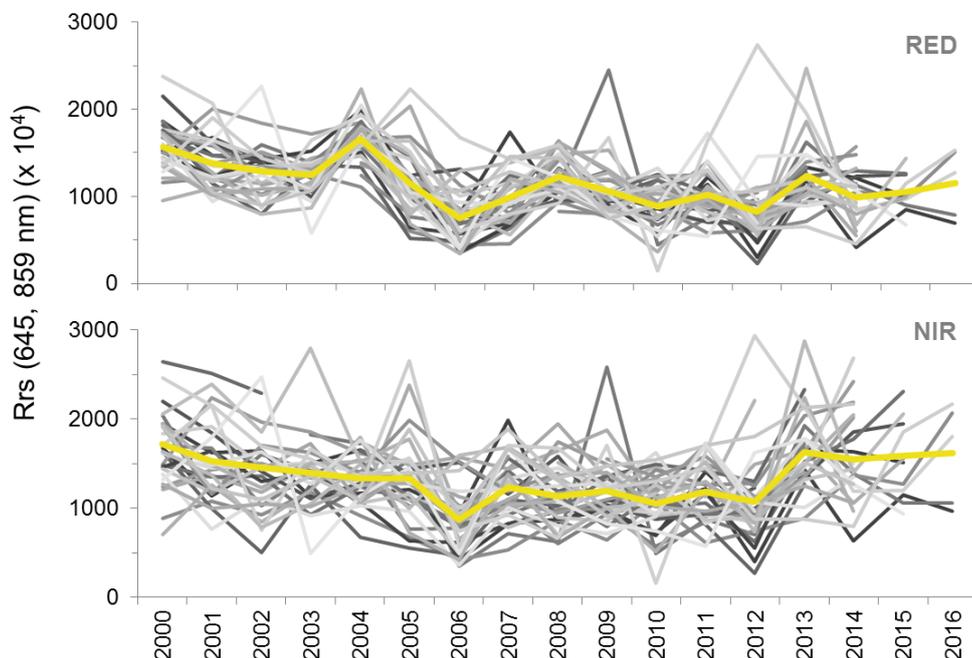


Figura 23 – Séries temporais filtradas de reflectância para bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), médias anuais dos pontos amostrais (N = 37) e global (amarela), 2000-2016

Diante da similaridade no comportamento médio dos dados, tanto na perspectiva temporal mensal (vide FIGURAS 20 e 21), como temporal anual (vide FIGURA 22 e 23), explorou-se o comportamento estatístico de correlação das médias (FIGURA 24).

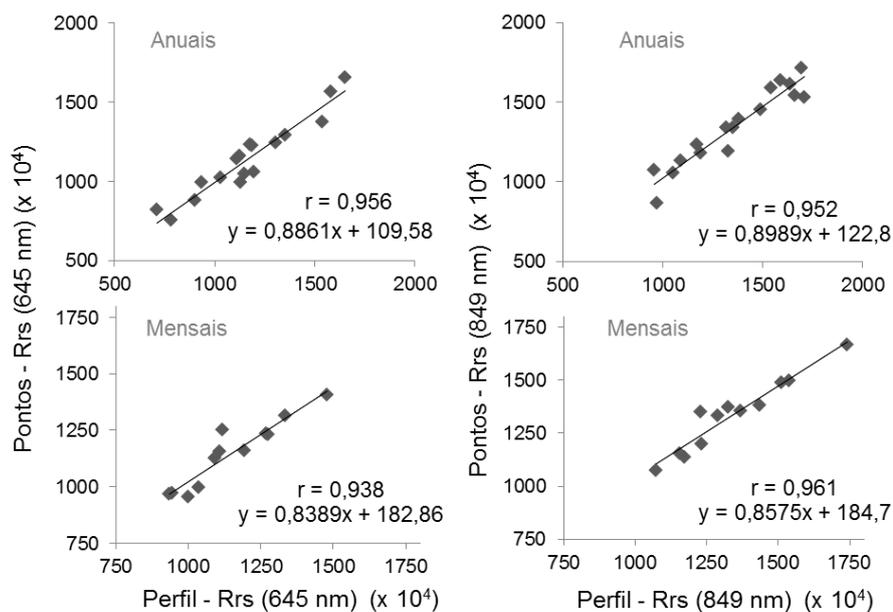


Figura 24 – Correlação entre as médias anuais (superior) e mensais (inferior) das duas formas de amostragem de dados/pixels (Perfil \cong 39 pixels; Pontos \cong 37 pixels em cada média)

Aferindo correlação muito forte entre os conjuntos pares de dados das médias (sendo a menor $r = 0,938$). Frisa-se, portanto, este ponto como um fator de consistência na metodologia de extração de dados, uma vez que a perfilagem temporal foram por duas formas de amostragem diferentes (perfil longitudinal e pontos amostrais), com pixels amostrados diferentes, e resultaram em valores médios semelhantes.

Como anteriormente citado, no comportamento temporal, os dados (inter e intranual) apresentaram indícios de refletirem o comportamento pluviométrico de suas bacias de drenagem. Diante disso, os resultados foram cotejados com duas estações pluviométricas com influência na bacia (FIGURA 25).

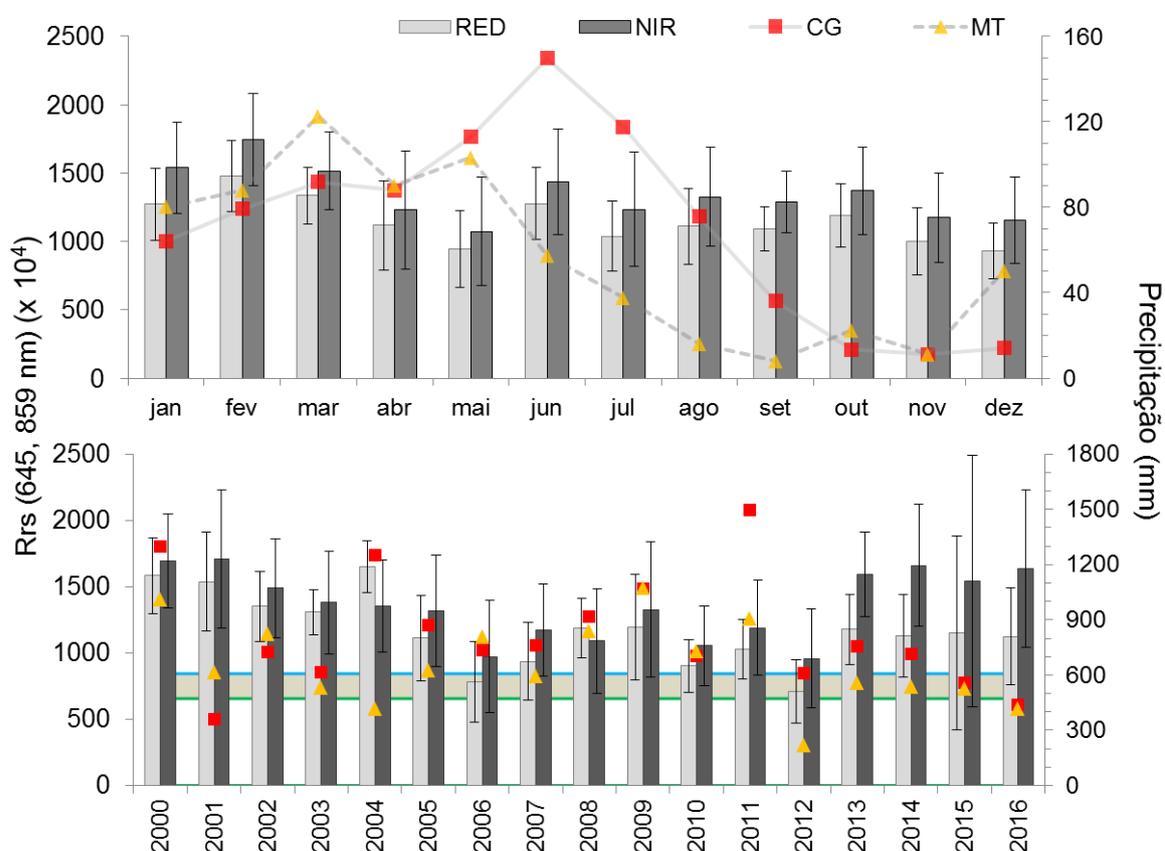


Figura 25 – Médias mensais e anuais dos pixels perfil longitudinal ($N = 39$) para as séries filtradas de reflectância das bandas RED (645 nm) e NIR (859 nm), precipitação (estações INMET de Campina Grande – CG e Monteiro – MT), 2000-2016.

Observa que as maiores médias mensais de reflectância ocorrem nos meses de janeiro a março, sobretudo em fevereiro, com redução progressiva até o mês de maio, ascendendo os valores na média de reflectância em junho, com poucas diferenças nos demais meses para a banda NIR e sutil redução para banda RED (com menores valores em dezembro).

É notório, com isso, que o açude apresenta uma resposta quanto aos regimes pluviométricos que ocorrem no Estado na Paraíba. Conforme AESA (2014), a bacia do açude sofre influência de dois fenômenos climáticos, com período chuvoso nos quatro primeiros meses do ano (jan-abr) e recorrência de precipitação em junho em parcela da região. Gonçalves et al. (2017), analisando dados TRMM para o Cariri Paraibano de 1998 a 2015, corroboraram neste aspecto, especialmente quanto as médias mensais máximas em março e mínimas nos últimos meses.

A Estação Pluviométrica de Monteiro (MT), localizada na porção sudoeste da bacia, apresenta índices pluviométricos como descritos no primeiro fenômeno; enquanto a estação de Campina Grande (CG), disposta a centro-leste da bacia (vizinha a bacia), denota precipitação máxima corrente nos meses de junho. As médias dos totais acumulados anuais para a região do Alto Curso do Rio Paraíba é de 608,1 mm/ano (linha azul) e da sub-bacia do Taperoá sendo 472 mm/ano (linha verde).

Ainda sobre a Figura 25, outra característica significativa é quanto às médias anuais de reflectância, em quase todos os anos os valores de reflectância da banda NIR são superiores aos da banda RED, exceto nos anos de 2004 e 2008, com maior dissemelhança na primeira. Provável explicação para isso é a brusca mudança do volume do açude (vide FIGURA 6, p. 34), que de 2003 para 2004 aumentou mais de 300 hm³, e de 2007 para 2008 com aumento superior a 150 hm³. Ambos (2004 e 2008) com registro de sangria e precedentes de baixas num histórico com provável estiagem.

Villar et al. (2013) na determinação da melhor banda para geração do modelo de SST ponderam que seu uso isolado acarretou em uma dependência sazonal, provavelmente oriunda de alterações na distribuição granulométrica do sedimento ao longo do ciclo anual, mais intensa no período de enchente do que no de cheia (inundação). Sugerindo, para isso, o uso de um modelo que fizesse uso da relação entre as duas bandas (RED e NIR), desvencilhando desta dependência.

Nesse sentido, Robert et al (2017) também relatam mudança da concentração de sedimentos na região de Gourma (África) ao longo do tempo, sugerindo ocorrência do fenômeno de ressuspensão por ações eólicas no período de estiagem. Destarte, é translúcida a necessidade de pesquisas futuras na área de estudo, indicando análise das frações dos sedimentos (voláteis, fixos, dissolvidos, granulométricas, dentre outras) no intento de avaliar alterações na composição do sedimento das águas que afetam, por consequência, a resposta espectral de sua reflectância se superfície.

Ainda mais em virtude do regime fluvial nos Cariris, que conforme Nascimento e Alves (2008, p. 34) “é do tipo torrencial e temporário, com cheias violentas, recessão acelerada, descarga nula durante a maior parte da estação seca, e mesmo, escoamento ausente durante alguns anos. Contudo, enquanto a estação seca se caracteriza por um abaixamento gradativo das águas dos rios, até secarem, as cheias ocorrem abruptamente”.

Os quatros últimos anos apresentaram os maiores valores de reflectância da banda NIR (FIGURA 25), assim como as maiores amplitudes em relação às respectivas reflectâncias da banda RED e dos valores médios dos pixels, com maior variância em 2015. Indicativos que reafirmam a influência de estiagens prolongadas, com redução do volume de água e possível ressuspensão de sedimentos, refletindo no aumento da reflectância da água. Análises limnológicas no Epitácio Pessoa (VIANA, 2016) no período de seca (2014-2015) sugere tendência no aumento da concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), com forte correlação negativa entre SDT e volume ($r = -0,72$).

Outro ponto possível que justifique a maior resposta de reflectância na banda NIR é possível presença de algas suspensas, haja vista que no ano de 2016 registrou afloramento de cianobactérias no açude (FIGUEIREDO, 2016). Apesar de esta última poder ter menor impacto, pois Viana (2016) apresenta valores de clorofila-a de 2005 a 2015 com concentrações de 0 a 16 $\mu\text{g/L}$, com baixos valores no período de seca; enquanto Dogliotti et al. (2015) destacam que a clorofila-a só apresenta interferências significativas na resposta espectral quando sua concentração for superior a 30 $\mu\text{g/L}$. Porém, é importante frisar que a amostragem de Viana (2016) não era distribuída na área alagada, com coleta próxima a barragem.

Para análise espacial da superfície do açude foram realizadas diferentes interpolações nos anos em estudo, sendo que a técnica de Kriging Universal – UK apresentou pressupostamente a melhor resposta do comportamento espacial da variável em um reservatório (FIGURAS 26 e 27).

As Figuras 26 e 27 exibem os valores de reflectâncias interpoladas com diferentes intervalos (por ano) para favorecer a discussão dos dados sob a ótica de variação espacial intranual, enquanto na perspectiva de variação espacial interanual foi definido o mesmo intervalo de reflectância que se encontra no final do trabalho (APÊNDICE, A e B).

As interpolações para a banda RED (FIGURA 26) indicaram comportamento similar para 12 dos 17 anos estudados (2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2015 e 2016), de maiores valores de reflectância na entrada do reservatório, especialmente a entrada referente ao Rio Paraíba. Não obstante, alguns dos citados anos

também reaperentarem aumento de reflectância próximos à barragem ou das bordas e ilhas, como no caso dos anos de 2000, 2002, 2005 e 2006.

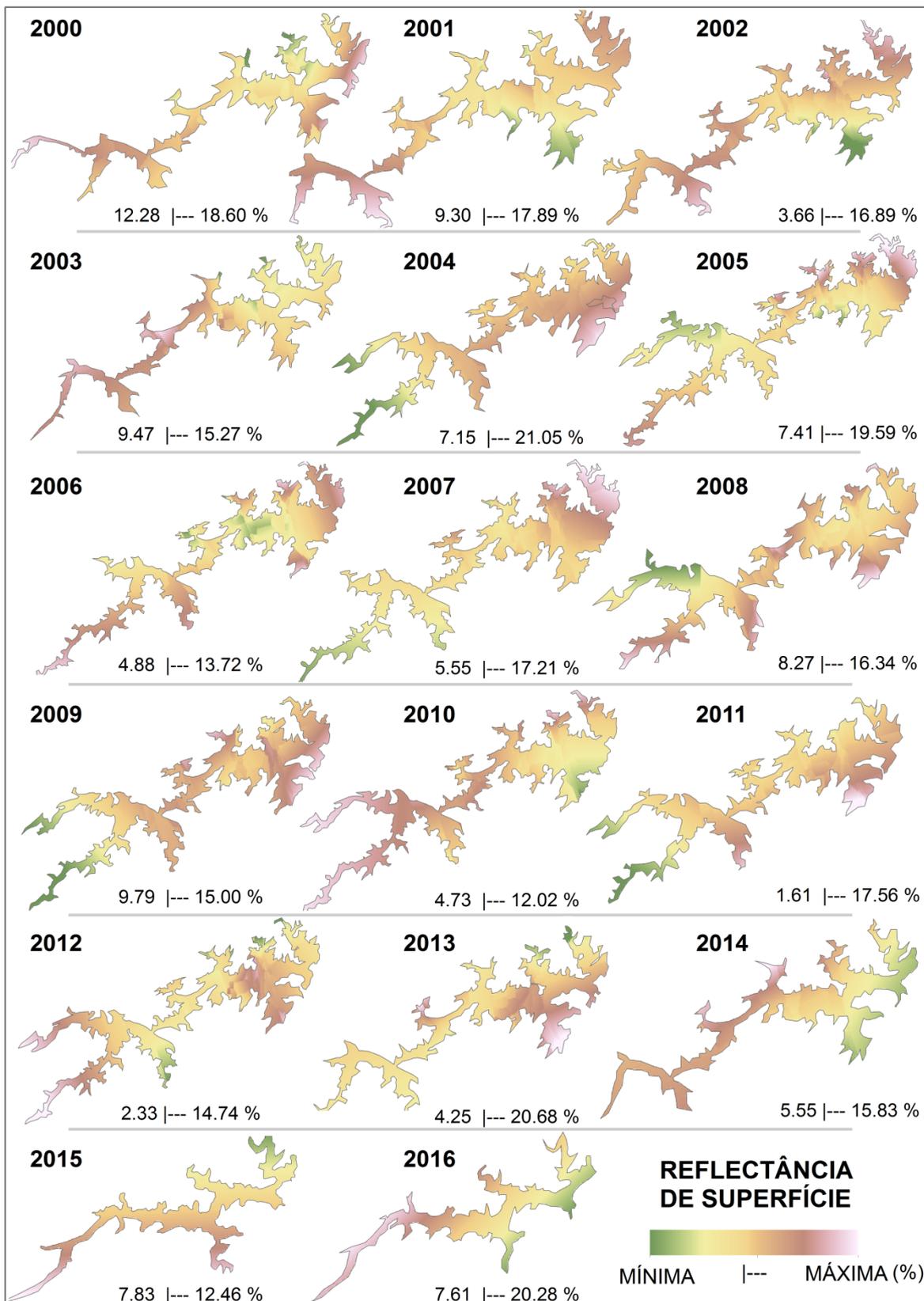


Figura 26 – Interpolação espacial dos pontos amostrais de reflectância, banda RED, para as máscaras vetorizadas, método de Krigagem Universal – UK, no açude Epitácio Pessoa (2000-2016)

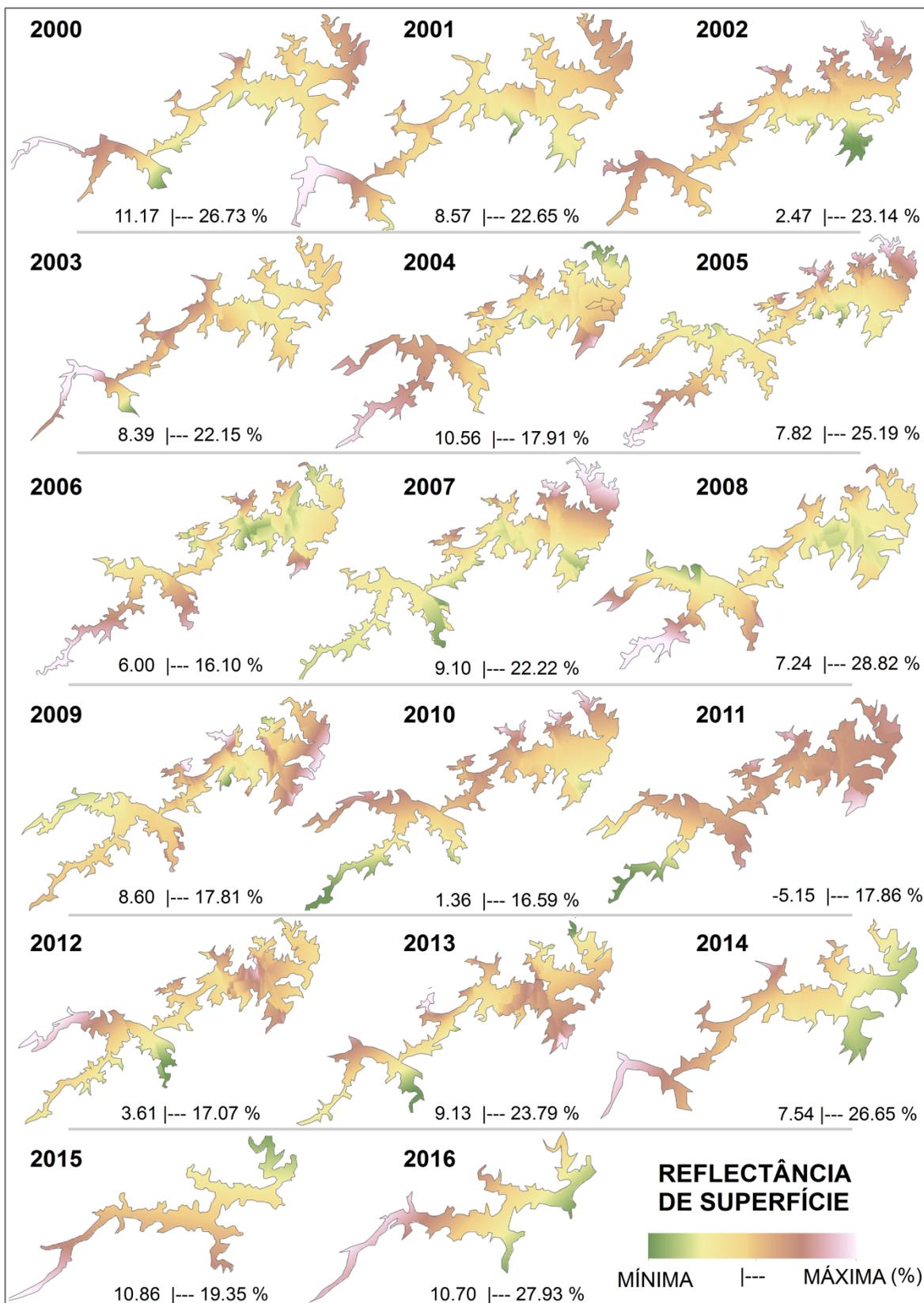


Figura 27 – Interpolação espacial dos pontos amostrais de reflectância, banda NIR, para as máscaras vetorizadas, método de Krigagem Universal – UK, no açude Epitácio Pessoa (2000-2016)

Em contraste, os anos de 2004, 2007 e 2009 apresentaram menores valores de reflectância na entrada do reservatório para a banda do vermelho, sendo que os três referidos anos com registros de sangria (vide FIGURA 6, p. 34). Enquanto 2014, 2015 e 2016 foram as superfícies que afiguraram gradiente de reflectância de resposta mais sutil, possivelmente em razão da menor área de espelho d'água (TABELA 5, p. 47).

Analisando os dados de reflectância da banda RED entre os anos (APÊNDICE – A), constata-se que maiores valores distribuídos são para o ano de 2000, 2001, 2004, 2008, 2013 e 2016. Sendo que, como na Figura 25 (vide p. 57), os anos de 2000, 2004, 2008 e 2013 possuem precipitação total anual superiores às médias das bacias, configurando em anos chuvosos.

Já a interpolação para reflectância da banda do infravermelho próximo/NIR (FIGURA 27) apresentou comportamento similar da banda RED, 11 anos em estudos apresentaram alta reflectância na entrada do açude (2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008, 2014, 2015 e 2016), enquanto os anos que apresentaram menores valores na região de entrada foram 2007, 2009, 2010 e 2011.

Na análise interanual para a banda NIR (APÊNDICE – B), maiores reflectâncias correspondem aos anos de 2000, 2001, 2008, 2013, 2014 e 2016. Sendo que quase todos estes, exceto o ano de 2016, correspondem a anos chuvosos ou de precipitação dentro da faixa média para as bacias de drenagem.

No cotejo entre as faixas de amplitude de reflectância (FIGURA 26 e 27) observa-se que, assim como nos pontos analisados, na interpolação os valores de NIR são superiores aos da banda RED, exceto para o ano de 2004, como já discutido em função da rápida mudança de volume no açude.

5.3 ESTIMATIVA DE SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS (SST)

Analisar a concentração e dinâmica da variável SST é importante tanto sob a ótica qualitativa, como quantitativa. Na primeira, a alta concentração de SST pode ser associada a uma má qualidade da água, favorecendo o crescimento de microrganismos e dificultando a eficiência de desinfecção da água, seja por cloração ou por radiação ultravioleta (UV). E, embora o Açude Epitácio Pessoa seja manancial de abastecimento público – com gestão da CAGEPA objetivando fornecer uma água potável e segura à população, é sabido que parcela da população faz captação da água bruta no açude para armazená-la em cisternas (FARTO, 2018), ou distribuir em povoados mais afastados, sem garantias de potabilidade.

Assim, na última etapa dos resultados, foram estimados os valores de SST por meio de três modelos na literatura (M1, M2 e M3), suas médias mensais de estimativas constam na Figura 28.

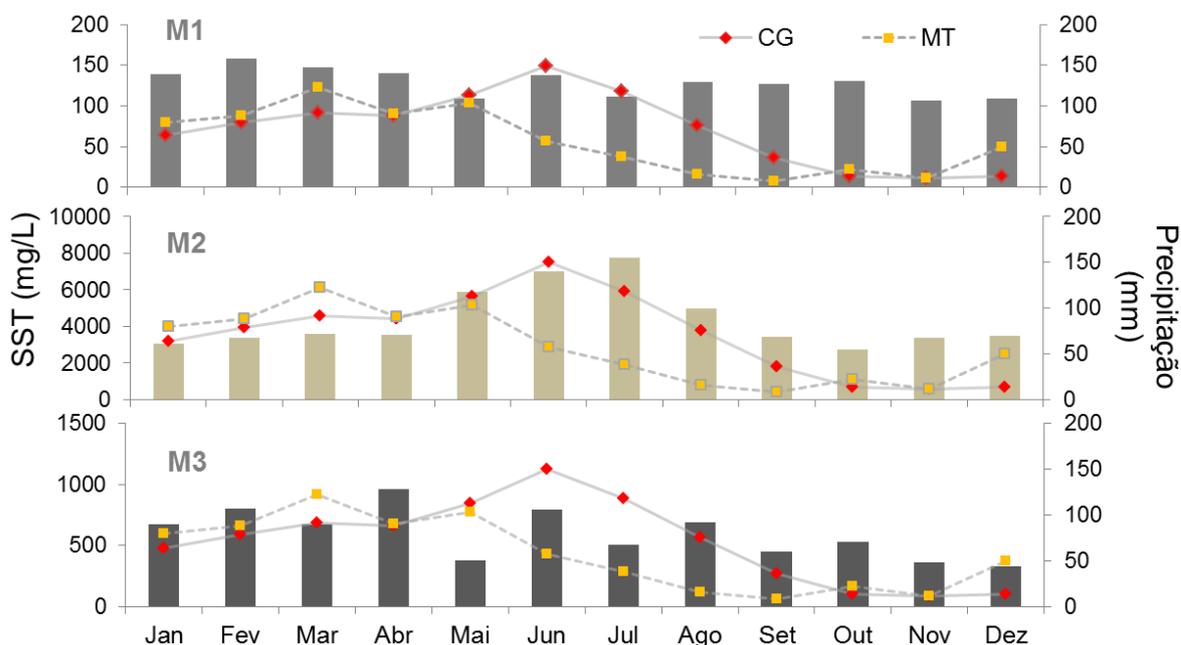


Figura 28 – Médias mensais das estimativas de Sólidos Suspensos Totais (SST) para os três modelos (M1, M2 e M3), médias mensais de precipitação de Campina Grande (CG) e Monteiro (MT) de 2000-2016 (INMET)

Em virtude da indisponibilidade de valores mensais observados no reservatório Epitácio Pessoa, sua discussão também foi baseada no comportamento do regime pluviométrico das bacias. O M1 (MILLER e McKEE, 2004) apresentou valores de SST médios de $128,8 \pm 16,96$ mg/L. Seu comportamento mensal foi similar aos dados médios discutidos para valores de reflectância, possivelmente em razão do modelo ser de regressão linear.

Coelho et al. (2017) durante monitoramento em açudes no Ceará, encontraram valores de SST entre 2.3-129 mg/L no período chuvoso no açude Paus Brancos, já Ventura (2013) foi de 0,5 a 39 mg/L também em açudes cearenses. Enquanto dados semestrais da SUDEMA no Epitácio Pessoa variaram entre 288-1094 mg/L. Configurando, isto posto, que mesmo sendo açudes do semiárido, podem apresentar valores bem diferentes.

Já o M2 (VILLAR et al., 2013) apresentou valores discrepantes e volúveis de sólidos nas águas do Epitácio Pessoa, atingindo valores próximos a 8000 mg/L em julho, e média de $4.346,06 \pm 1.665,53$ mg/L, sendo o modelo com maior amplitude nas médias

mensais de SST. Apesar dos altos valores para SST, o M2 demonstrou um comportamento graficamente relacionado aos valores de precipitação da estação de Campina Grande, com máximas nos meses de junho, julho e agosto. Destarte, numa análise da média mensal de SST, o M2 apresentou o comportamento gráfico que mais se ajusta a uma das condições meteorológicas da bacia, entretanto, deve-se reforçar que dados de campo far-se-ão necessários para ratificá-lo se seria o melhor modelo, inclusive com calibração, uma vez que apresentou resultados elevados de concentração de SST.

Enquanto o M3 (ROBERT et al., 2017) estimou valores máximos médios de SST nos quatro primeiros meses, reduzindo em maio e ascendendo em junho novamente, corroborando com o que foi discutido até então para os valores médios de reflectância e, diferente do M1, sua função é de potência. Com uma média global de $595,85 \pm 201$ mg/L, com SST máximo em abril (962,06 mg/L).

Dados estimados de SST para análise anual estão elencados na Figura 29. Na discussão deste tópico foram utilizadas as médias de sólidos totais realizadas pela SUDEMA de 2007 a 2015 (semestral), todavia, deve-se atentar a não se basear somente neste parâmetro em virtude de suas incertezas, como já mencionadas na metodologia.

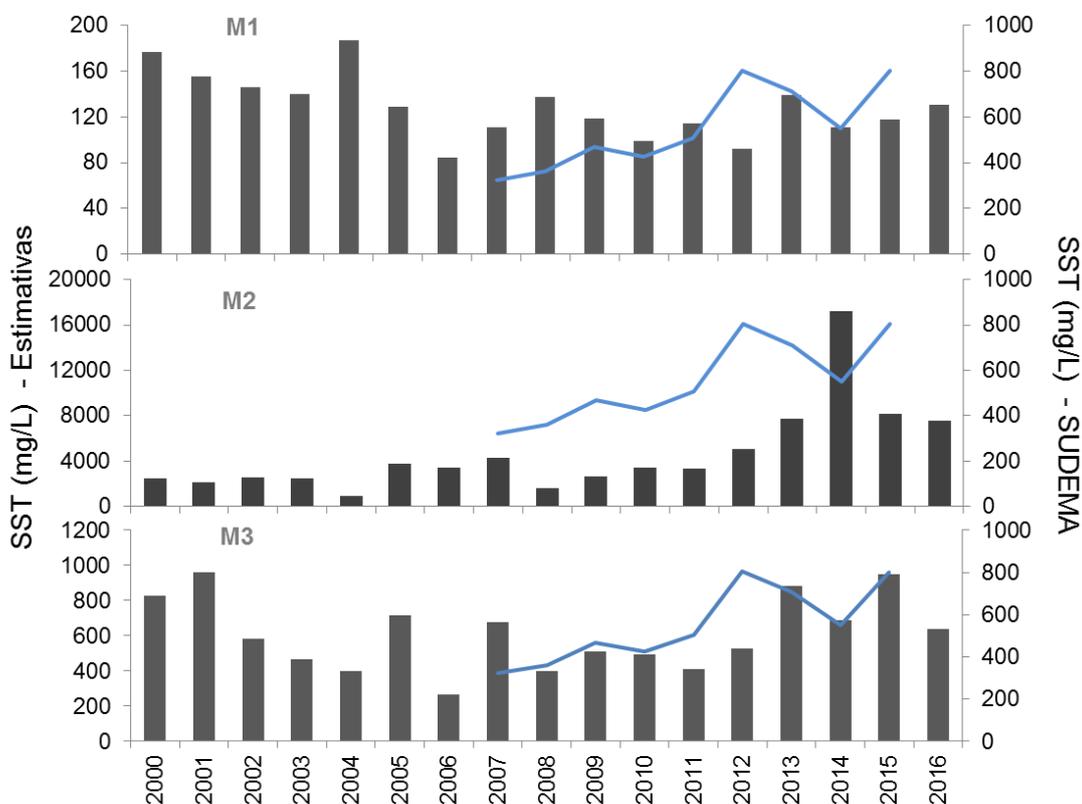


Figura 29 – Médias anuais das estimativas de Sólidos Suspensos Totais (SST) para os três modelos (M1, M2 e M3) e SST observado (SUDEMA)

O modelo que, a priori, apresentou maior relação com os dados de campo da SUDEMA foi o M3, retratando inclusive faixa similar nos valores médios de SST, de 270 – 961 mg/L para o estimado e de médias entre 320 – 803 mg/L para os dados de campo, e correlação linear de 0,570. O M1, assim como as médias mensais, apresentou o menor intervalo de SST para as médias anuais, entre 84 a 187 mg/L.

Enquanto o M2 apresentou novamente altos valores de SST (acima de 20.000 mg/L em 2014), uma possível explicação para o comportamento de SST das médias mensais e anuais do M2 pode ser a relação entre as bandas NIR/RED, enquanto Villar et al. (2013) relataram graficamente os valores da banda RED sempre superiores aos da banda NIR, na presente pesquisa esse comportamento foi dessemelhante, quase sempre as maiores médias são da banda NIR. Esse desempenho espectral, novamente, reafirma as possíveis diferenças físicas, químicas e biológicas do sedimento da região de semiárido comparado ao sedimento produzido na bacia Amazônia, com clima e bioma diverso da Caatinga.

No tocante à estimativa anual de SST, estudos futuros complementares sobre o manejo do solo na bacia de drenagem poderão descrever as mudanças da concentração anual de SST não somente em função da sua precipitação, bem como alterações no uso e cobertura do solo que podem ter favorecido o processo de fluxo (erosão, transporte e deposição) de sedimento no açude, como sugere Robert et al. (2016) quanto ao aumento significativo de 19% na turbidez entre 2000-2015 no reservatório Bagre (Burkina Faso). Sendo que estudos hidrossedimentológicos na bacia do Eptácio Pessoa modelaram uma taxa produção de 30 kg/ha/ano, estimando uma produção de sedimentos em 434 toneladas entre 2001 e 2014 (SILVA et al., 2017).

Por fim, foram selecionados três anos da série histórica estimada de SST para representar diferentes condições meteorológicas nas duas bacias (chuvosa, ano com precipitação acima da média; média, ano com precipitação próxima a média; e seca, ano com precipitação abaixo da média), selecionados com base na Figura 25 (p. 57), sendo estes 2000, 2003 e 2016, respectivamente (FIGURA 30), aos quais tiveram seus valores de SST estimados interpolados.

Para o M1 a distribuição espacial dos SST estimados e interpolados foi similar nas três condições, sendo que para o ano seco o contraste foi mais observado, enquanto o chuvoso apresentou maior concentração de SST próximo à barragem também. O M2 interpolou menores valores de SST em quase toda superfície do açude para condição

chuvosa/2000 e de precipitação média/2003 (~2350 mg/L) em relação a amplitude máxima, enquanto os valores máximos foram encontradas na condição de seca.

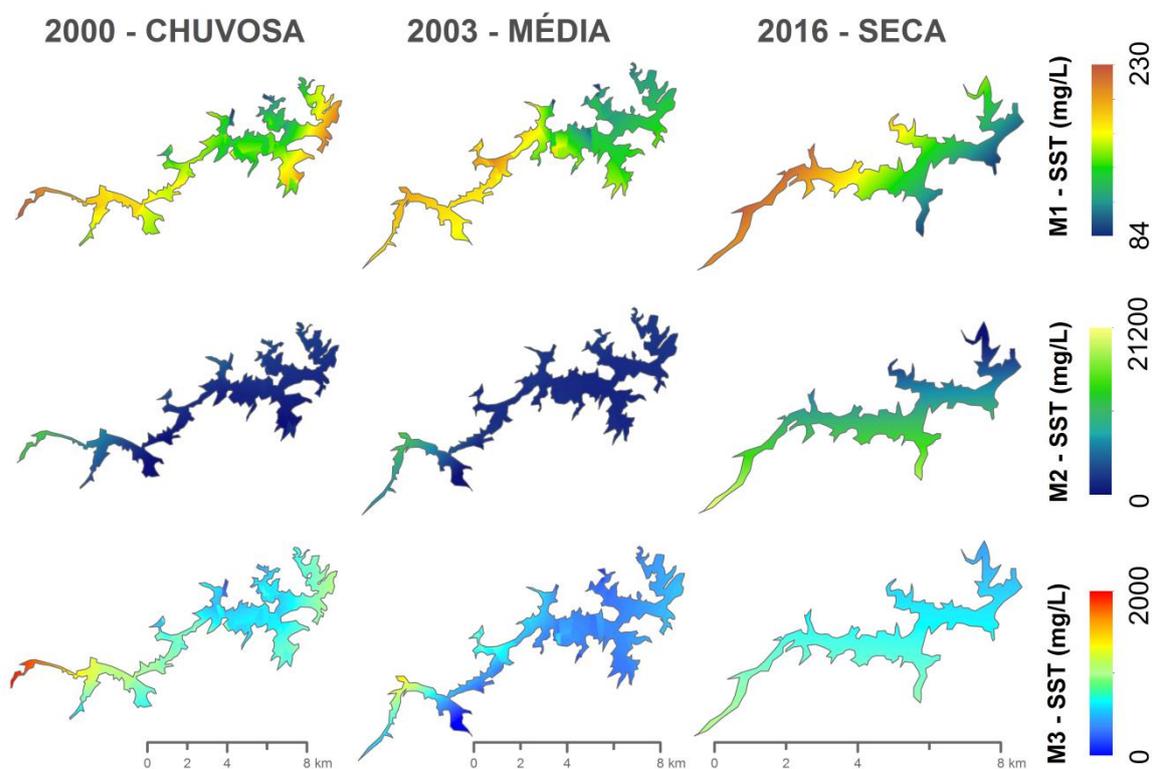


Figura 30 – Interpolação espacial UK de três condições de precipitação no açude (chuvosa, média e seca) no açude Epitácio Pessoa em 2000, 2003 e 2016, respectivamente, aplicando três modelos de estimativa de SST (M1, M2, M3).

Destaca-se que a interpolação para o M2 não foi satisfatória, uma vez que estimou elevados valores negativos de SST, não condizente com a variável estimada, sendo portanto definido o intervalo na Figura a partir de 0 mg/L. E a interpolação do M3 apresentou menores concentrações de SST em quase todo o espelho d'água, exceto na entrada do reservatório.

Na análise das variáveis de reflectância de superfície da água e SST é permitido inferir, portanto, que tanto a condição em um ano chuvoso, como a condição de seca (estiagem prolongada) podem influenciar no aumento de SST; no primeiro caso, presumivelmente em relação ao processo de lixiviação e aporte de sedimentos, enquanto no segundo, possivelmente por redução da lâmina d'água e volume, favorecendo a ressuspensão e maior concentração de sedimentos que são contidos por obra do barramento, afetando o fluxo de sedimentos.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise temporal mensal dos dados apontou sensibilidade, nas duas bandas espectrais, às alterações pluviométricas na região quando cotejado os valores médios a dados observados médios de precipitação do INMET para a mesma janela temporal estudada, com máximas em janeiro, fevereiro e março, reduzindo em maio e ascendendo em junho. E menores índices de reflectância nos últimos meses do ano, período de estiagem nas bacias. Almeja-se, todavia, que pesquisas futuras possam aprofundar essa discussão no semiárido.

Na tocante à análise temporal anual, os valores médios de reflectância para a banda do infravermelho próximo (NIR, 859 nm) quase sempre foram superiores às da banda do espectro vermelho (RED, 645 nm), a exceção de dois anos (2004 e 2008), sugerindo alteração do tipo de sedimentos (características físico-químicas) em reflexo ao brusco aumento volumétrico do açude que, após tendências de baixas, sofreram sangrias. Recomenda-se, em estudos futuros que objetivarem analisar essa associação, que os dados de campo de sedimentos totais sejam decompostos em suas frações (orgânica/voláteis, inorgânica/fixos, granulométrica e outras).

As características geométricas (topográficas) do objeto em estudo e a alta frequência na presença de nuvens em alguns pixels inviabilizaram a análise espacial do perfil longitudinal. Entretanto, a análise espacial foi balizada pela interpolação pela técnica de Krigagem Universal (UK), que apresentou – sinteticamente – maiores valores de reflectância na entrada do açude (pelo rio Paraíba) com tendência de redução na superfície interpolada e alta novamente próxima a barragem e de ilhas, para maioria dos anos (sobretudo para banda RED). Sugere-se, nesta perspectiva, que a metodologia proposta seja reaplicada em outros açudes do semiárido, àqueles sem grandes impactos de cobertura de nuvens e com geometria de aspecto circular do volume alagado.

Na estimativa de Sólidos Suspensos Totais (SST), o M2 (Villar et al., 2013) apresentou dados que reproduzem o comportamento mensal de precipitação na região centro leste da bacia, apesar de dados exorbitantes de concentração de SST, necessitando calibração para ratificá-lo. Já o M3 (Robert et al., 2017) foi o modelo, a priori, que melhor respondeu ao padrão anual dos dados de SST de campo ($r = 0,57$) e aparentemente também respondeu ao comportamento mensal da bacia em relação ao regime de precipitação, neste caso com inclusão dos dois fenômenos pluviométricos característicos da região.

Frisa-se, contudo, que o parâmetro (SST de campo citado) deve ser usado com determinada cautela, haja vista que apresentou inconsistência no cotejo direto com a variável reflectância, como descrito na metodologia. Entretanto, por se tratar de um dado oficial e não haver ratificação na origem de sua incerteza foi utilizado como parâmetro.

A metodologia proposta apresentou desempenho satisfatório, com remoção de pixels com presença total ou parcial de nuvens e remoção de pixels com fortes indícios de mistura espectral, por meio de diferentes máscaras vetorizadas, com destaque àqueles com efeito de borda. Destaca-se a forte correlação ($r > 0,93$) entre as médias anuais e mensais extraídas por diferentes pixels amostrados (perfil longitudinal e pontos amostrais), corroborando para consistência dos dados.

Sugere-se, portanto, o uso de dados MODIS na região do semiárido, principalmente pela sua alta frequência temporal dos dados, apesar da sua baixa resolução espacial. Entretanto, far-se-á necessária atenção, compreendendo que o referido produto apresenta diversas limitações para a região, pontos que devem ser perquiridamente analisados para cada objeto em estudo e objetivo da pesquisa, como o caso do Epitácio Pessoa, que mesmo sendo um dos maiores açudes (em termos volumétricos e de lâmina d'água) do Estado da Paraíba, possui uma variabilidade interanual de seu espelho d'água muito ampla, sendo que dentro do período estudado variou quase 7 (sete) vezes seu tamanho (relação área máxima e mínima).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Açude de Boqueirão continua subindo; ganho em janeiro foi superior a 2 milhões de m³.** 6 de fev. de 2018a. Disponível em: < <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/2018/02/06/acude-de-boqueirao-continua-subindo-ganho-em-janeiro-foi-superior-a-2-milhoes-de-m%C2%B3/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Aesa anuncia previsão climática para o primeiro trimestre de 2018 na região semiárida.** 3 de jan. de 2018b. Disponível em: < <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/2018/01/03/aesa-anuncia-previsao-climatica-para-o-primeiro-trimestre-de-2018-na-regiao-semiarida//>>. Acesso em: 07 set. 2018.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Monitoramento: Açudes.** João Pessoa (PB). Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa/volumesAcudes.do?metodo=listarAcudesUltimaCota/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Monitoramento: Climatologia.** João Pessoa (PB). 2014. Disponível em: < <http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/jsp/monitoramento/chuvas/climatologiasGraficos.jsp/>>. Acesso em: 15 fev. 2018

ALVES, E. D. L., BIUDES, M. S., VECCHIA, F. A. S. Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. **Revista Geonorte**, Manaus, Edição Especial 2, v.1, n.5, p. 606-618, 2012.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Documentação Técnica – Medidas Espectrorradiométricas.** In: Hidrosat: Brasília (2018). Disponível em: <<http://hidrosat.ana.gov.br/DocTecnica.aspx#introducao/>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Hidrosat:** Brasília (2016). Disponível em: <<http://hidrosat.ana.gov.br/DocTecnica.aspx#introducao/>>. Acesso em: 20 out. 2016.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Nota Técnica nº. 068/2013/ SGI-ANA.** Curvas Cota x Área x Volume do Açude Epitácio Pessoa-Boqueirão- PB. Documento nº. 34059/2013, Brasília/DF, 2013.

BECKER, R. H.; SULTAN, M. I.; BOYER, G. L.; TWISS, M. R.; KONOPKO, E.. Mapping cyanobacterial blooms in the great lakes using MODIS. **Journal of Great Lakes Research**, Duluth, v. 35, n.3, p. 447-453, 2009.

BERNARDO, N.; WATANABE, F., RODRIGUES, T.; ALCÂNTARA, E.. Evaluation of the suitability of MODIS, OLCI and OLI for mapping the distribution of total suspended matter in the Barra Bonita Reservoir (Tietê River, Brazil). **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, Hong Kong, v. 4, p. 68-82, 2016.

BITAR, O. Y.; IYOMASA, W. S.; CABRAL JR., M.. Geotecnologia: tendências e desafios. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 14, n. 3, p. 78-90, 2000. ISSN 0102-8839.

BOLFE, E. L. Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 2006, Aracaju. **Anais...** Aracaju: GEONORDESTE, 25 a 27 out. 2006.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, n. 29, 09 jan. 1997, Seção 1.

BRITO, Franklyn Barbosa de. **O conflito pelo uso da água do açude Epitácio Pessoa (Boqueirão) – PB**. 208 f. João Pessoa/PB: UFPB. Dissertação (Mestrado Em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia – Universidade Federal da Paraíba, 2008.

BRITO, F. B.; VIANNA, P. C. G.. Açude do Boqueirão, dez anos de desacertos (1998/2008), da crise de abastecimento ao afogamento de conflitos. IN: II SEMILUSO - Seminário Luso-Brasileiro Agricultura Familiar e Desertificação. João Pessoa (PB): 2008. Disponível em: <<http://www.geociencias.ufpb.br/leppan/gepat/files/gepat024.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. **Ofício nº. 605/2014/PRE** (Resposta ao ofício nº 419/2014/MPPB/PDDC). João Pessoa, 04 de novembro de 2014.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica**. Introdução à ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001. 345p.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **GIS Ambiente**. In INPE, São José dos Campos, 1996. In: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/1introd.pdf>. Acesso em: 30 out. 2016.

CAMARGO, E.C.G. **Geoestatística: fundamentos e aplicações**. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. eds. Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

CARR, Geneviève M.; NEARY, James P. **Water Quality for Ecosystem and Human Health**. 2. ed. Burlington: UNEP GEMS, 2009. ISBN 92-95039-51-7.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentometria prática**. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Interciências Ltda. 2008. 599p.

CERDEIRA-ESTRADA, S.; LOPEZ-SALDANA, G.. Nuevo Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico para México. **Ciencias Marinas**, Ensenada , v. 37, n. 2, p. 237-247, 2011.

CHEN, F.Y.; WU, G.F.; WANG, J.J.; HE, J.J.; WANG, Y.H.. A MODIS-Based Retrieval Model of Suspended Particulate Matter Concentration for the Two Largest Freshwater Lakes in China. **Sustainability**, v. 8, n. 832, 2016.

CHEN, S.; HAN, L.; CHEN, X.; LI, D.; SUN, L.; LI, Y.. Estimating wide range Total Suspended Solids concentrations from MODIS 250-m imageries: An improved method.ISPRS. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Alberta, v. 99, p. 58-69, 2015.

CHEN, Y. C.; YEH, H. C.; WEI, C.. Estimation of river pollution index in a tidal stream using kriging analysis. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 9, n. 9, p. 3085–3100, 2012.

CHEN, S.S.; FANG, L.G.; ZHANG, L.X.; HUANG, W.R.. Remote sensing of turbidity in seawater intrusion reaches of Pearl River estuary – A case study in Modaomen waterway, China. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 82, n. 1, p. 119–127, 2009.

CHILDS, Colin. **Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst**. ESRI: 32-35 p., 2004. Disponível em: <<https://www.esri.com/news/arcuser/0704/files/interpolating.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

CICERELLI, R. E.; GALO, M. L. B. T.. Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 259-265, 2015.

COELHO, C.; HEIM, B.; FOERSTER, S.; BROSINSKY, A.; DE ARAÚJO, J. C.. In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the brazilian semiarid region. **Water (Switzerland)**, Basileia, v. 9, n. 12, 2017.

COSTA, Isnaldo Candido. **Análise da evolução volumétrica do aporte de sedimentos ao reservatório Epitácio Pessoa – PB**. Florianópolis: UFSC. Monografia (Especialização em Gestão dos Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Relatório Nº 2: Diagnóstico Ambiental do Açude Público Epitácio Pessoa**. João Pessoa, 2005.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Distrito de Obras. Açude Público Epitácio Pessoa (PB); aspectos pertinentes ao túnel**. João Pessoa, 1967. 5 p.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Relatório açude Boqueirão**. Campina Grande, 1963. 8 p.

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Boqueirão de Cabaceiras, Barragem Epitácio Pessoa.** [s/d]. Disponível em <<http://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>>. Acesso em 10 out. de 2017.

DOGLIOTTI, A.I.; RUDDICK, K.G.; NECHAD, B.; DOXARAN, D., KNAEPS, E.. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. **Remote Sensing Environmental.** v.156, p.157-168, 2015.

DOGLIOTTI, A.I. Satellite Mapping of La Plata River Plume, **BELSPO Post-doc Fellowship Final Report.** Data do relatório: 23 nov. 2011.

DORJI, P.; FEARNES, P. ; BROOMHALL, M. A Semi-Analytic Model for Estimating Total Suspended Sediment Concentration in Turbid Coastal Waters of Northern Western Australia Using MODIS-Aqua 250 m. data. **Remote Sensing,** v. 8, n. 556, 2016.

FARIAS, O. G.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. A. Avaliação de Métodos de Interpolação Espacial aplicados à Pluviosidade em região montanhosa no litoral sul do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia,** Curitiba, v. 21, n. 13, jul/dez de 2017.

FARTO, Cindy Deina. **Análise comparativa da qualidade da água de chuva e de açudes armazenada em cisternas na região do Cariri Oriental no Estado da Paraíba.** 103 f. João Pessoa/PB: UFPB. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – Universidade Federal da Paraíba, 2018.

FEARNESIDE, P.M. Decision-making on Amazon dams: Politics trumps uncertainty in the Madeira River sediments controversy. **Water Alternatives,** v. 6, n. 2, p. 313-325, 2013. ISSN 1965-0175

FIGUEIREDO, F. Toxinas podem inviabilizar distribuição de água do açude Boqueirão. **Correio da Paraíba,** João Pessoa, 16 de maio de 2016. Disponível em <<https://correiodaparaiba.com.br/cidades/toxinas-podem-inviabilizar-distribuicao-de-agua-do-acude-boqueirao/>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2011. 128p.

G1 PB. Após 18 sangrias em 60 anos de história, Boqueirão vive pior seca. **G1 Paraíba,** Campina Grande, 16 de jan. de 2017a. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2017/01/apos-18-sangrias-em-60-anos-de-historia-boqueirao-vive-pior-seca.html>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

G1 PB. Água que chega a Boqueirão abastece até 2 milhões de habitantes, diz Ministério. **G1 Paraíba,** Campina Grande, 7 de set. 2017b. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/agua-que-chega-a-boqueirao-abastece-ate-2-milhoes-de-habitantes-diz-ministerio.ghtml>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

G1 PB. Vazão de água da transposição diminui na Paraíba após incidente em PE. **G1 Paraíba**, Campina Grande, 13 de jun. 2017c. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/vazao-de-agua-da-transposicao-diminui-na-paraiba-apos-incidente-em-pe.ghtml>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

G1 PB. Açude Boqueirão atinge 5%, mas água continua potável, diz Cagepa. **G1 Paraíba**, Campina Grande, 16 de dez. de 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2016/12/acude-de-boqueirao-atinge-5-mas-agua-continua-potavel-diz-cagepa.html>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

GERMANO, Eptácio. Boqueirão acumula recarga hídrica de 27,1 milhões de m³ após oito meses da chegada das águas do São Francisco. **Jornal da Paraíba**, 2017. Disponível em: <http://www.jornaldaparaiba.com.br/vida_urbana/boqueirao-acumula-recarga-hidrica-de-271-milhoes-de-m%C2%B3-apos-oito-meses-da-chegada-das-aguas-sao-francisco.html>. Acesso em: 20 ago.2018.

GONÇALVES, S.; BRASIL NETO, R. M.; SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M.. Análise da variabilidade espaço-temporal da precipitação no Cariri Paraibano utilizando dados do satélite TRMM. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABRH, nov-dez 2017, p. 1-8.

HA, N. T. T.; KOIKE, K.. Integrating satellite imagery and geostatistics of point samples for monitoring spatio-temporal changes of total suspended solids in bay waters: Application to Tien Yen Bay (Northern Vietnam). **Frontiers of Earth Science**, v.5, n.3, p.305–316, 2011.

HARZALLAH, A.; ROCHA DE ARAGÃO, J. O.; SADOURNY, R.. Interannual rainfall variability in North-East Brazil: observation and model simulation. **International Journal of Climatology**, v. 16, n.8, p. 861–878, 1996.

HAYAKAWA, Ericson. Hideki. **Análise da Variabilidade Especial e Temporal dos sedimentos Suspensos do Alto Rio Paraná via imagens orbitais**: Região de Porto São José – PR. Maringá/PR: UEM. Dissertação (Mestre em Geografia, área em Análise Regional e Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Geografia - Universidade Estadual de Maringá, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estado da Paraíba**. In: FIEPN - Perfil sócio-econômico da Paraíba, fev. 2006. Disponível em: <http://www.fiepb.com.br/arquivos/perfil_socioeco_2006.pdf> Acesso em: 13 abr. 2017.

HU, C.; CHEN, Z.; CLAYTON, T.D.; SWARZENSKI, P.; BROCK, J.C.; MULLER-KARGER, F.E.. Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium resolution bands: initial results from Tampa Bay, FL. **Remote Sensing of Environment**, v.93, p. 423–441, 2004.

JENSEN, John R. **Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective**. Remote Sensing of Water. 1 ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000. p. 379-530.

JIANG, H.; LIU, Y.. Monitoring of TSS concentration in Poyang Lake based on MODIS data. **Yangtze River**, v. 42, n. 17, p. 87–90, 2011.

JIANG, X.W.; TANG, J.W.; ZHANG, M.W.; MA, R.H.; DING, J.. Application of MODIS data in monitoring suspended sediment of Taihu Lake, China. **Chinese Journal of Oceanology and Limnology**, v. 27, n. 3, p. 614–620, 2009.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Sensoriamento Remoto: Manuais, tutoriais de geoprocessamento**, 2006. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html>. Acesso em: 29 jan. 2017.

KIMLEANG, C.; TY, S. O. K.; RATBOREN, C.; BUNMANUT, H.; SOKLY, S.. **Assessment of Spatial Interpolation Methods to Map Water Quality in Tonle Sap Lake**. Conference: The 2nd International Symposium on Conservation and Management of Tropical Lakes, 2017.

KUMAR, A.; EQUENUDDIN, S.M.; MISHRA, D.R.; ACHARYA, B.C.. Remote monitoring of sediment dynamics in a coastal lagoon: Long-term spatio-temporal variability of suspended sediment in Chilika. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 170, p. 155-172, 2016.

KUTSER, T.; METSAMAA, L.; VAHTMAE, E.; APS, R.. Operative monitoring of the extent of dredging plumes in coastal ecosystems using MODIS satellite imagery. **Journal Coast**, Edição Especial, v. 50, p.180–184, 2007.

LIN, H.; KUZMINOV, F. I.; PARK, J.; LEE, S.; FALKOWSKI, P. G.; GORBUNOV, M. Y.. The fate of photons absorbed by phytoplankton in the global ocean. **Science**, v. 351, n. 6270, p. 264-267, 2016.

LIU, Q.; ROSSITER, D.G. Estimation on suspended sedimentation concentration of Poyang Lake using MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing Technologies**, v. 23, n. 1, p. 7–11, 2008.

LIU, X.; WANG, M. River runoff effect on the suspended sediment property in the upper Chesapeake Bay using MODIS observations and ROMS simulations. **Journal of Geophysical Research C: Oceans**, v. 119, n.12, p. 8646-8661, 2014.

MALUTTA, Simone. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT**. 127f. Dissertação (Mestrado-Pós-Graduação de Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

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**, n.79, p.257-264, 2009.

MELO, Rostand. Açude de Boqueirão sangra e vira opção de folia durante o carnaval. **Jornal da Paraíba**, 2011. Disponível em: < http://www.jornaldaparaiba.com.br/vida_urbana/acude-de-boqueirao-sangra-e-vira-opcao-de-fofia-durante-o-carnaval.html>. Acesso em: 20 ago. 2018.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T.. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília/Df: Editora UNB (2012).

MENEZES, Paulo Henrique Bretanha Junker. **Estudo da dinâmica espaço-temporal do fluxo de sedimentos a partir das propriedades ópticas das águas no reservatório Três Marias - MG**. 112 f. Brasília/DF: UnB. Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas – Universidade de Brasília, 2013.

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

MI – Ministério da Integração Nacional. **Nota Técnica nº 06/2018/CGAOH/DPE/SIH**, Assunto: Paralisação da operação do Eixo Leste do PISF para finalização das obras de recuperação nos reservatórios Poções e Camalaú. 2018. Disponível em <<https://s3.portalt5.com.br/arquivos/NOTA-TECNICA-1.pdf?mtime=20180314154240>>. Acesso em: 27 set. 2018.

MISHRA, D.R.; S. MISHRA.. Plume and bloom: effect of Mississippi river diversion on the water quality of Lake Pontchartrain, **Geocarto International**, n. 25, v. 7, p. 555-568, 2010.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Divulgação do Bioma Caatinga**. Brasília: 2011, DF. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/203/_arquivos/plano___comunicacao_jorge_1_203_1.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2017.

MOLLE, François. **Geometria dos pequenos açudes**. Recife: SUDENE, DPG, PNR, HME, 1994. 126 p.

MPF PB – Ministério Público Federal na Paraíba. **Nota do MPF em Monteiro (PB) sobre a transposição do rio São Francisco**. 31 de março de 2017 às 15h10, 2017. Disponível em <<http://www.mpf.mp.br/pb/sala-de-imprensa/noticias-pb/nota-do-mpf-em-monteiro-pb-sobre-a-transposicao-do-rio-sao-francisco>>. Acesso em: 27 set. 2018.

MURPHY, R. R.; CURRIERO, F. C.; BALL, W. P.. Comparison of Spatial Interpolation Methods for Water Quality Evaluation in the Chesapeake Bay. **Journal of Environmental Engineering**, v. 136, n.2, p.160–171, 2010.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. **MODIS**. Washington, D.C. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em: 29 out. 2016a.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. NASA LP DAAC: **MODIS Land Products Quality Assurance Tutorial: Part-3. How to interpret and use MODIS QA information in the Land Surface Reflectance product suite**, 2016b. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/sites/default/files/public/modis/docs/MODIS_LP_QA_Tutorial-3.pdf>

NASCIMENTO, Sebastiana Santos do. **Análise multitemporal do processo de desertificação na sub-bacia hidrográfica do Alto Paraíba**. 120f. Dissertação (Mestrado-Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba, 2013.

NASCIMENTO, S. S.; ALVES, J. J. A.. Ecoclimatologia Do Cariri Paraibano/Ecology of the Cariri Paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 2, n. 3, p. 28–41, 2008.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto princípios e aplicações**. 4° Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

ONDRUSEK, M.; STENGEL, E.; KINKADE, C.S.; VOGEL, R.L.; KEEGSTR, P.; HUNTER, C.; KIM, C.. The development of a new optical total suspended matter algorithm for the Chesapeake Bay. **Remote Sensing of Environment**, v. 119, p. 243–254, 2012.

PAHLEVAN, N.; SCHOTT, J.R.. Characterizing the relative calibration of Landsat-7 (ETM+) visible bands with Terra (MODIS) over clear waters: The implications for monitoring water resources. **Remote Sensing of Environment**, v. 125, p. 167-180, 2012.

PARAÍBA ONLINE. Vazão de água da transposição diminui na Paraíba após incidente em PE. **Paraíba Online**, Campina Grande, 16 de jul. 2018. Disponível em: <<https://paraibaonline.com.br/2018/07/aesa-reforca-que-mesmo-sem-transposicao-boqueirao-abastece-cg-por-dois-anos/>>. Acesso em: 26 ago. 2018.

PINTO, C. E. T.; MENEZES, P. H. B. J.; MARTINEZ, J.; ROIG, H. L. VILLAR, R. A. E.. Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 5, p. 507-516, 2014.

PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; NOGUEIRA, M.G., LOPES, W.T.A; COCHONNEAU, G.; VENTURA, D.; VIEIRA, M.R.; OLIVIERA, E.; GUIMARÃES, V.S.. Avaliação do impacto dos reservatórios em cascata sobre o fluxo de sedimentos no rio Paranapanema. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013a, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABRH, abr. 2013, p. 5896-5903.

PISCOYA, R.C.C.C.; MARTINEZ, J.M.; LOPES, W.T.A; COCHONNEAU, G.; NOGUEIRA, M.G.; VENTURA, D.T.; OLIVIERA, E.. Caracterização do fluxo de sedimentos no reservatório UHE Jurumirim utilizando dados do sensor espacial MODIS. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013b, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, nov. 2013, p. 1-8.

POLETTI, Kayla Walquiria Garmus. **Curva chave para o monitoramento automático de sedimentos na Bacia do Rio São Francisco Falso – PR**. 70f. Dissertação (Mestrado-Pós-Graduação na Área de Concentração em Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2007.

ROBERT, E.; KERGOAT, L.; SOUMAGUEL, N.; MERLET, S.; MARTINEZ, J. M.; DIAWARA, M.; GRIPPA, M.. Analysis of suspended particulate matter and its drivers in Sahelian Ponds and Lakes by remote sensing (landsat and MODIS): Gourma Region, Mali. **Remote Sensing**, v.9, n.12, 2017.

ROBERT, E.; GRIPPA, M.; KERGOAT, L.; PINET, S.; GAL, L.; COCHONNEAU, G.; MARTINEZ, J.. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data. **International Journal of applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 52, p. 243-251, 2016.

RODRIGUES, M. Geoprocessamento: um retrato atual. **Revista Fator GIS**, Curitiba, v. 1, n. 2, p. 20-23, 1993.

SATO, F. Y.; SOUZA, A. L.; ARAI, E.; ADAMI, M.; FREITAS, R. M.; MELLO, M. P.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Distribuição de produtos MODIS via interface web. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba, **Anais...** Curitiba: INPE/SBSR, abr-mai 2011, p. 7502-7508.

SHI, K.; ZHANG, Y.; ZHU, G.; LIU, X.; ZHOU, Y.; XU, H.; QIN, B.; LIU, G.; LI, Y.. Long-term remote monitoring of total suspended matter concentration in Lake Taihu using 250 m MODIS-Aqua data. **Remote Sensing of Environment**, v. 164, p. 43-56, 2015.

SILVA, A. M.; SILVA, J. F. C. B. C.; HENRIQUES, I. G. N.; SILVA, R. M.. Estimativa da produção de sedimentos na bacia do reservatório Epitácio Pessoa - PB. **OKARA**, João Pessoa, , v.11, n. 2, p. 225-236, 2017.

SOUSA, Wanderley Lemgruber de. **Impacto Ambiental de Hidrelétricas**: uma análise comparativa de duas abordagens. 154 f. Rio de Janeiro/RJ: UFRJ. Tese (Mestrado em Planejamento Energético), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

STARK, J.R.; HANSON, P.E.; GOLDSTEIN, R.M.; FALLON, J.D.; FONG, A.L.; LEE, K.E.; KROENING, S.E.; ANDREWS, W.J. **Water Quality in the Upper Mississippi River Basin: Minnesota, Wisconsin, South Dakota, Iowa, and North Dakota, 1995-98**. Reston: USGS, 2000. ISBN 0-607-95416-7.

SUDEMA – Superintendência de Administração do Meio Ambiente do Estado da Paraíba. **Atividades**. João Pessoa, 2016. Disponível em: <<http://sudema.pb.gov.br/institucional/atividades/>>. Acesso em: 29 out. 2016.

VENTURA, Dhalton Luiz Tosetto. **Uso do sensoriamento remoto para monitoramento da concentração de clorofila-a em açudes do semiárido**. 47 f. Brasília/DF: UnB. Dissertação (Mestrado em Ecologia), Programa de Pós-Graduação em Ecologia – Universidade de Brasília, 2013.

VERMOTE, E.. **MOD09Q1 MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid V006**. distribuído por NASA EOSDIS LP DAAC, 2015.

VERMOTE, E. F.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M. A.; MORCETTE, J. J. A. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

VESTENA, L.R. **Análise da relação entre a dinâmica de áreas saturadas e o transporte de sedimentos em uma bacia hidrográfica por meio de monitoramento e modelagem**. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2008. 264f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.

VIANA, Leandro Gomes. **Dinâmica de variáveis limnológicas em reservatório durante período de estiagem prolongada, semiárido brasileiro**. 51 f. Campina Grande/PB: UEPB. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - UEPB, 2016.

VILLAR, R.E.; MARTINEZ, J.M.; LE TEXIER, M.; GUYOT, J.L.; FRAIZY, P.; MENESES, P.R.. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 45-54, 2013.

VILLAR, Raúl Arnaldo Espinoza. **Monitoramento das dinâmicas espaciais e temporais dos fluxos sedimentares na bacia Amazônica a partir de imagens de satélite**. 226 f. Brasília/DF: UnB. Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas – Universidade de Brasília, 2013.

WATANABE, F.S.Y.; ALCÂNTARA, E.; RODRIGUES, T.W.P.; IMAI, N.N.; BARBOSA, C.C.F.; ROTTA, L.H.S.. Estimation of chlorophyll-a concentration and the trophic state of the Barra Bonita hydroelectric reservoir using OLI/landsat-8 images. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 12, n. 9, p. 10391-10417, 2015.

WSCOM. Sangrando há 15 dias, açude. **WSCOM**, 2011. Disponível em: <<https://www.wscom.com.br/noticia/sangrando-ha-15-dias-acude-em-boqueirao-vira-atracao-turistica/>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

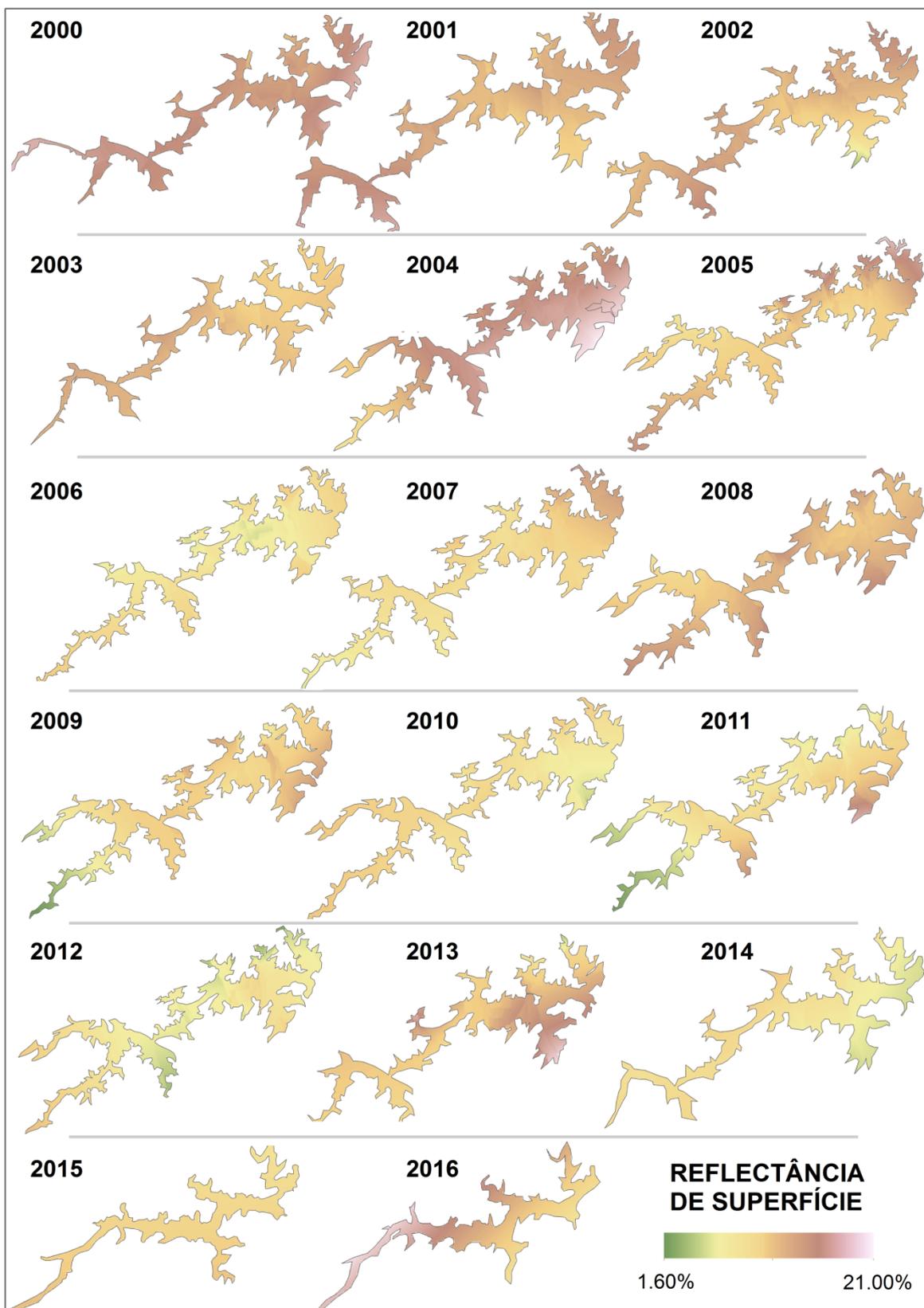
WU, G.F.; CUI, L.. Time-series MODIS images- based retrieval and change analysis of suspended sediment concentration during flood period in Poyang Lake. **Journal of Lake Science**, v. 28, n. 12, p. 6113-6120, 2008.

ZHANG, M.; DONG, Q.; CUI, T.; XUE, C.; ZHANG, S.. Suspended sediment monitoring and assessment for Yellow River estuary from Landsat TM and ETM+ imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 146, p. 136-147, 2014.

ZHAO, H.H.; CHEN, Q.; WALKER, N.D.; ZHENG, Q.A.; MACINTYRE, H.L.. A study of sediment transport in a shallow estuary using MODIS imagery and particle tracking simulation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 21, p. 6653-6671, 2011.

APÊNDICE

A – Interpolação de dados de reflectância de superfície da água pelo método UK para banda RED (645nm, B01), análise interanual (2000-2016)



B – Interpolação de dados de reflectância de superfície da água pelo método UK para banda NIR (849nm, B02), análise interanual (2000-2016)

