



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE
RECURSOS HÍDRICOS

FÁBIO ARAÚJO DA COSTA

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DE
RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO DO NORDESTE: Poço da Cruz (Pernambuco)**

Recife

2019

FÁBIO ARAÚJO DA COSTA

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DE
RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO DO NORDESTE: Poço da Cruz (Pernambuco)**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Ferramentas Aplicadas aos Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário: Josias Machado da Silva Jr./ CRB4-1690 UFPE (BCTG)

C837s Costa, Fábio Araújo da.
Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento de reservatório no semiárido do nordeste: Poço da Cruz, Pernambuco / Fábio Araújo da Costa . – Recife, 2019.
109f., il., figs., tabs., abrs. e sigls.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, 2019.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Altimetria por radar. 2. Imagens. 3. Satélites. 4. Reservatório Poço da Cruz. I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Título.

333.91 CDD (22.ed)

UFPE
BCTG-2019/ 392

FÁBIO ARAÚJO DA COSTA

**SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO AO MONITORAMENTO DE
RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO DO NORDESTE: Poço da Cruz (Pernambuco)**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Aprovada em: 08 / 02 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Daniel Medeiros Moreira (Examinador Externo)
Serviço Geológico do Brasil

Profa. Dra. Joecila Santos da Silva (Examinadora Interna)
Universidade do Estado do Amazonas

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Alfredo Ribeiro Neto (UFPE), pelas ideias e orientações para desenvolvimento do trabalho, além de fornecimento de dados de altimetria do satélite ENVISAT em formato que permitiu a leitura pelo MAPS.

Aos colegas e amigos da CPRM que de alguma forma auxiliaram com informações e sugestões, especialmente aos amigos Adriano Santos, George Rodrigues e Daniel Medeiros.

Ao meu Gerente, Robson de Carlo, por facilitar as atividades necessárias à construção deste trabalho.

Ao amigo e Especialista em Geoprocessamento da Agência Nacional de Águas, Alexandre do Prado, pelos dados de levantamento de campo da curva cota-área-volume do açude Poço da Cruz.

Ao engenheiro da APAC, José Ráurium, por fornecer a série histórica dos níveis do açude Poço da Cruz.

Ao Adrien Paris, pelas orientações no uso do MAPS e pelo pleno atendimento às minhas dúvidas, quando consultado.

Aos técnicos em hidrologia Carlos Fernandes e Fernando Barros, que auxiliaram no levantamento da seção de régua no reservatório Poço da Cruz.

Aos professores Leidjane Maria e Roberto Azevedo, por participarem da minha qualificação e fornecerem orientações valiosas para prosseguimento dos trabalhos.

Aos membros da banca, Dra. Joecila Santos da Silva e Dr. Daniel Medeiros Moreira, por dedicarem um pouco do seu tempo na avaliação deste trabalho.

Aos colegas de turma do ProfÁgua, pelo convívio harmonioso e pelos bons momentos em salas de aula e nas atividades extraclases.

A todos os professores e palestrantes que participaram de alguma forma do programa, permitindo abranger os conhecimentos na Gestão dos Recursos Hídricos.

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pelas oportunidades de realizar levantamentos de dados em campo para validação das informações de altimetria espacial e pelo suporte em minhas atividades profissionais.

À Agência Nacional de Águas (ANA) pelo programa ProfÁgua e pelo fornecimento das curvas cota-área-volume do açude Poço da Cruz.

Ao Programa de Mestrado Profissional em Rede e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, pela oportunidade de especialização em Gestão de Recursos Hídricos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Superior (CAPES) pelo apoio ao ProfÁgua.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pela estrutura e professores, que dedicaram parte do seu tempo para repassar conhecimentos e orientações aos alunos do ProfÁgua.

À minha esposa Nadja, pelos 20 anos de convivência e companheirismo e apoio emocional em todos os momentos.

E, principalmente, a Deus e aos meus pais (*in memoriam*), com toda gratidão pela minha formação como pessoa, usando seus exemplos de caráter e dignidade.

RESUMO

A informação de quantidade de água disponível em rios e reservatórios é fundamental para gestão dos recursos hídricos. No caso da região semiárida, onde há grande volume de água armazenado em reservatórios, é muito importante que a relação entre o nível da água e esses volumes armazenados esteja atualizada. O presente trabalho avaliou a metodologia de utilizar o sensoriamento remoto com uso de imagens captadas por satélites (LANDSAT 05 e 08) e informações de radares altimétricos embarcados em satélites (ENVISAT, SARAL e Sentinel – 3A) para gerar a curva cota x área x volume do açude Poço da Cruz, localizado no semiárido do Estado de Pernambuco. Foram realizadas comparações entre os volumes fornecidos pelo processamento das imagens com os obtidos por empresa de topografia em levantamento de campo. Também foi comparada a série de dados altimétricos por satélite com a série do posto de monitoramento dos níveis instalado no reservatório. Os resultados apontaram não haver diferenças significativas entre os volumes obtidos com o processamento das imagens e os registrados pela CAV em levantamento de campo. Quanto à série altimétrica, houve desvios aproximados, quando comparados aos níveis medidos pelas réguas: para o ENVISAT, rmse de 0,15 m; para o SARAL, rmse de 0,16 m; e para o Sentinel-3A, rmse de 0,25 m. Vale salientar que os dados adquiridos pelos satélites acompanharam o regime de variação do nível do reservatório registrados *in situ*.

Palavras-chave: Altimetria por radar. Imagens. Satélites. Reservatório Poço da Cruz.

ABSTRACT

The information of the volume of water available in rivers and reservoirs is fundamental for the management of water resources. In the case of the semiarid region, where there is a large volume of water storage in reservoirs, it is very important that the relationship between the water level and the volume be updated. The present work evaluated the methodology of using remote sensing using images captured by satellites (LANDSAT 05 and 08) and altimetric radar information embedded in satellites (ENVISAT, SARAL and Sentinel - 3A) to generate the curve water level x area x volume of the Poço da Cruz reservoir, located in the semiarid of Pernambuco state. Comparisons were made between the volumes provided by the image processing, with those obtained by field survey. The time series of satellite altimetry data was also compared with the series of the monitoring station of the water level installed in the reservoir. The results indicated that there were no significant differences between the volumes obtained with the image processing, when compared to the curve obtained from the field survey. In relation to satellite series, they showed approximate deviations, when compared to the levels measured by the station, for ENVISAT rmse of 0.15 m, SARAL rmse of 0.16 m and Sentinel 3-A rmse of 0.25m. It is worth noting that the data acquired by the satellites followed the regime of variation of the water level of the reservoir registered in situ.

Keywords: Radar altimetry. Images. Satellites. Poço da Cruz Reservoir.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Área do polígono das secas.....	20
Figura 2 –	Evolução do volume dos reservatórios no Nordeste.....	21
Figura 3 –	Sistema de acompanhamento de reservatórios (semiárido).....	24
Figura 4 –	Princípio da altimetria por satélite.....	32
Figura 5 –	Formação do sinal do altímetro em uma superfície plana.....	34
Figura 6 –	Formação de sinal altimétrico sobre uma superfície irregular.....	35
Figura 7 –	Vista do satélite Sentinel-3 e da acomodação da carga.....	41
Figura 8 –	Mapa de localização do açude Francisco Saboia em Pernambuco.....	46
Figura 9 –	Tronco da pirâmide.....	52
Figura 10 –	Tracks do ENVISAT sobre a área de estudo.....	55
Figura 11 –	Tela do site aviso com informações de trajetórias de satélites.....	57
Figura 12 –	Fluxograma da metodologia.....	58
Figura 13 –	Diagrama boxplot.....	59
Figura 14 –	Modelo geoidal.....	61
Figura 15 –	Referência de nível da estação de réguas do açude Poço da Cruz.....	62
Figura 16 –	Imagem do LANDSAT 8 em 04/08/2013 classificada a partir do NDWI.....	64
Figura 17 –	Correlação cota x área.....	66
Figura 18 –	Cota x área.....	69
Figura 19 –	Cota x volume.....	70
Figura 20 –	Área imagem x área campo.....	71
Figura 21 –	Volume imagem x volume campo.....	71
Figura 22 –	Box plot para as séries altimétricas ENVISAT, SARAL e Sentinel-3a.....	74
Figura 23 –	Órbitas dos satélites em açude Poço da Cruz.....	75
Figura 24 –	Série composta dos satélites e série de réguas linimétricas.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Açudes públicos construídos pelo DNOCS, 1898-1990.....	23
Tabela 2 –	Vida útil dos satélites LANDSAT.....	30
Tabela 3 –	Missões altimétricas no século XXI.....	38
Tabela 4 –	Data da passagem dos satélites para coleta das imagens...	50
Tabela 5 –	Bandas para cálculo do NDWI.....	64
Tabela 6 –	Níveis das réguas e áreas das imagens.....	65
Tabela 7 –	Diferenças percentuais entre áreas da curva e áreas das imagens.....	67
Tabela 8 –	Diferenças percentuais Volumes imagens e volumes curva de campo.....	68
Tabela 9 –	Resultado do teste t-student para o nível de significância de 5% aplicado aos volumes.....	72
Tabela 10 –	Valores do RMSE e DAM para as séries altimétricas dos satélites usados no estudo.....	74
Tabela 11 –	Coordenadas do RN local.....	78
Tabela 12 –	Estados hidrológicos do sistema hídrico Poço da Cruz: condições de uso.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
AVISO	Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques
CAV	Curva cota x área x volume
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAM	Desvio absoluto da mediana
DCS	Data Collection System
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DORIS	Doppler Tracking System Receiver
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing
ERT	Earth Resources Technology
ESA	European Space Agency
ETM	Enhanced Thematic Mapper
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EV	Estação virtual
FO	Forma de onda
GMES	Monitorização Global do Ambiente e Segurança
GNSS	Global Navigation Satellite System
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars
GPS	Global Positioning System
IFOCS	Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
ISRO	Organização Indiana de Pesquisa Espacial
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LRR	Laser Retroreflector
LS	Linhas de Sondagem
MAPS	Multimission Altimetry Processing
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer

MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MSS	Multispectral Scanner System
MWR	Micro Wave Radiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalised Difference Water Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLCI	Ocean and Land Color Instrument
OLI	Operational Land Imager
RA	Radar altimétrico
RA-2	Advanced Radar Altimeter
RBV	Return Beam Vidicon
RLA	River Lake Atimetry
RLH	River Lake Hydrology
RMSE	Root mean square error
RTK	Real Time Kinematic
RVG	Rede de Vértices Geodésicos
SARAL	Satellite with Argos and ALtiKa
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SLC	Espelho Corretor de Linha
SLSTR	Radiômetro de Temperatura da Superfície Marítima e Terrestre
SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre
T/P	Topex/Poseidon
TIRS	Thermal Infravermelho Sensor
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
USGS	United States Geological Survey
VALS	Virtual Altimetry Station
WGS-84	World Geodetic System 1984
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	POLÍGONO DAS SECAS.....	19
2.2	AÇUDES NO SEMIÁRIDO.....	21
2.3	CURVAS CAV	25
2.4	SENSORIAMENTO REMOTO COM IMAGENSÓTICAS.....	26
2.4.1	Sistemas de Aquisição de Imagens.....	27
2.4.2	Missão Landsat	28
2.5	ALTIMETRIA ESPACIAL.....	30
2.5.1	Missões Altimétricas.....	37
2.6	TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADAS À RESERVATÓRIOS.....	42
2.7	ALGORITMO ICE 1.....	43
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.2	DADOS	47
3.2.1	Dados Linimétricos.....	47
3.2.2	Dados altimétricos (altitude elipsoidal) e curva CAV.....	48
3.3	GERAÇÃO DEVOLUMES.....	48
3.4	ALTIMETRIA POR SATÉLITE.....	54
3.4.1	Análise de Outliers.....	59
3.4.2	Análise dos Desvios dos Dados Altimétricos.....	60
3.4.3	Altitude Ortométrica.....	61
4	RESULTADOS.....	63
4.1	ESTIMATIVAS DAS ÁREAS E VOLUMES.....	63
4.2	ELEVAÇÃO DA ÁGUA COM SATÉLITE ALTIMÉTRICO.....	73
4.3	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO AÇUDE POÇO DA CRUZ.....	79

5	CONCLUSÃO.....	82
	REFERÊNCIAS.....	85
	APÊNDICE A – DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE NÍVEIS	
	ALTIMÉTRICOS POR SATÉLITES E IN SITU.....	94
	APÊNDICE B – IMAGENS CLASSIFICADAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho de mestrado busca proporcionar uma visão do uso de sensoriamento remoto para estimar volume de reservatórios. Utiliza-se o caso do reservatório de Poço da Cruz, o maior do Estado de Pernambuco em capacidade de armazenamento, localizado na bacia hidrográfica do Rio Moxotó (afluente do São Francisco pela margem esquerda), para desenvolvimento e aplicação de metodologia para produzir uma curva cota x área x volume (CAV). O trabalho pretende fornecer subsídios técnico-científicos para desenvolvimento de ferramentas para estimar a disponibilidade hídrica na região através de volumes armazenados em açudes.

O reservatório Poço da Cruz foi escolhido por haver a disponibilidade de uma curva cota x área x volume levantada em campo recentemente com uso de tecnologias modernas e confiáveis, o que fornece segurança para a validação de dados do sensoriamento remoto, com o uso de informações de satélites. Esse levantamento foi contratado pela Agência Nacional de Águas (ANA). A série histórica dos níveis do reservatório foi disponibilizada pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). O uso do sensoriamento remoto no reservatório escolhido busca também aplicar a metodologia em outros locais que possuam características semelhantes.

Quantificar com segurança os volumes armazenados nos açudes da região semiárida é imprescindível para a gestão dos recursos hídricos, uma vez que se encontra armazenado nela, em grandes e médios açudes, considerável volume de água disponível para diversos tipos de demandas.

Para locação dos volumes de reservatórios e gerenciamento dos reservatórios, as curvas cota-área-volume serão as ferramentas usadas para estimativa de volumes, sendo uma das principais fontes de informação. Conhecer a pluviosidade, as vazões afluentes e defluentes dos reservatórios, além da evaporação no local e os diversos usuários e suas demandas, compõe o conjunto de informações para a divisão e alocação da água no tempo e no espaço de maneira mais adequada.

Dados de volumes incorretos podem causar uma alocação de água ineficiente e como consequência trazer conflitos entre os usuários das águas do reservatório. Para subsidiar as tomadas de decisão pelos gestores de recursos hídricos desses

reservatórios, a CAV tem que fornecer dados confiáveis. CAVs desatualizadas podem gerar informações de volume que comprometem a boa gestão dos recursos hídricos.

A escassez de água na região Nordeste é um dos principais desafios que devem ser enfrentados em relação à questão dos recursos hídricos no Brasil. Esse problema foi acentuado pelo crescimento demográfico e conseqüentemente maior demanda por recursos hídricos para diversos usos, sobressaindo principalmente a utilização na irrigação para produção de alimentos.

A implantação da Lei 9.433 de 1997 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SINGREH).

Essa lei, inspirada no modelo francês de gestão dos recursos hídricos, tem por objetivos principais:

- assegurar disponibilidade de água com qualidade para gerações atuais e futuras;
- a utilização racional e integrada de água, visando ao desenvolvimento sustentável
- a prevenção contra eventos críticos.

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é um dos instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos. Trata-se de um amplo sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos, bem como fatores intervenientes para sua gestão. Na região semiárida, grande volume de água superficial está armazenado em açudes. O monitoramento desses reservatórios é essencial para a gestão da água na região.

Uma das características da região é a deficiência de retenção de água no solo, de pouca profundidade, oriundos de substrato cristalino. Contribuem também o clima, caracterizado por alta evaporação, baixa precipitação média, alta variabilidade interanual da precipitação e concentração das chuvas em curtos períodos (TOLEDO; ARAÚJO; ALMEIDA, 2014).

Atualizar as curvas cota-área-volume com levantamentos topográficos em campo não é uma tarefa fácil, pois envolve custos e mobilização de equipe

especializada. O levantamento de campo consiste na realização de batimetria para levantar as profundidades em vários pontos da área inundada e levantamento por aerofotogrametria e topografia convencional da área acima do nível da água. Alguns reservatórios ainda possuem curvas da época do projeto do açude em que se utilizaram técnicas pouco precisas. Ainda contribui para a falta de precisão das curvas o processo de assoreamento (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

A construção de açudes no Nordeste do Brasil está ligada diretamente às características climáticas e geológicas da região, que levaram o poder público, a partir do fim do século XIX, a fomentar políticas para armazenar água, destaque para o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), que construiu a maior parte dos açudes dos 9 estados do Nordeste e no norte de Minas Gerais (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

Os dados de inventário da maioria dos reservatórios são geralmente limitados, devido ao custo e ao tempo necessário para sua aquisição através de pesquisas de campo, particularmente em áreas pouco povoadas. As técnicas de sensoriamento remoto fornecem uma alternativa valiosa aos levantamentos batimétricos de reservatórios convencionais para gerenciamento de recursos hídricos (ZHANG *et al.*, 2016).

É possível identificar uma área inundada por um lago ou reservatório, com uso de imagens de satélites com sensores na banda do infravermelho próximo (entre 0,76 e 0,90 micrômetros), onde os corpos d'água absorvem a maior parte da radiação. Com o uso do índice *NDWI (Normalised Difference Water Index)*, é possível delimitar os corpos hídricos, em virtude da baixa reflectância da água no verde (0,52 a 0,60 micrômetros) e no infravermelho próximo em contraste com outras superfícies, tipo de vegetação e solo (PEREIRA *et al.*, 2016).

Trabalhos recentes vêm propondo estimar o volume de reservatórios, determinando nível e área da superfície da água por meio de produtos de satélites. O nível da água pode ser estimado a partir de satélites altimétricos como ENVISAT, Jason, Topex/Poseidon, Altika, ICESAT (PAIVA; DURAND; HOSSAIN, 2014).

A aplicação de altimetria com uso de dados de radares altimétricos é mais utilizada em rios da região amazônica devido aos grandes volumes e dificuldade em realizar monitoramento convencional em grandes áreas da região. Ainda é pouco

explorado o uso dessa tecnologia em outras regiões no Brasil distintas da região amazônica. O trabalho se propõe a explorar o uso de dados de satélite imageadores e altimétricos para gerar a curva cota x área x volume, instrumento de grande importância para a gestão dos recursos hídricos armazenados em reservatórios.

Trata-se de uma pesquisa aplicada e exploratória que visa proporcionar uma visão geral sobre o tema da estimativa de volume de reservatórios, buscando padrões quantitativos. Assume a forma de um estudo de caso, com utilização do reservatório Poço da Cruz, visando fornecer subsídios técnico-científicos sobre a disponibilidade hídrica na região.

1.1 OBJETIVOS

A relação do nível do reservatório com os volumes acumulados é essencial para gestão dos recursos armazenados. O levantamento topobatimétrico em campo é a maneira tradicional de obter esta relação, o trabalho propõe conseguir construir a relação a partir de dados gerados de monitoramento realizados por satélites altimétricos e Imageadores. Com os objetivos específicos e gerais relacionados nos próximos itens.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal do trabalho é obter a curva cota – área – volume para o lago do reservatório Poço da Cruz, usando técnicas de sensoriamento remoto com dados de altimetria e imagens obtidas por sensores embarcados em satélites.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar a viabilidade técnica do uso da metodologia para o açude Poço da Cruz;
- b) Estimar as diferenças entre as técnicas convencionais para confecção das curvas cota x área x volume e a metodologia adotada no trabalho;

- c) Estimar as diferenças obtidas entre as leituras de nível realizadas nas réguas limimétricas instaladas no lago do reservatório, com os dados de altimetria dos satélites ENVISAT, SARAL e Sentinel-3A.
- d) Avaliar o uso do sensoriamento remoto para subsidiar, com uso da CAV, a gestão de reservatórios no semiárido brasileiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção será realizada uma revisão de literatura para mostrar as características básicas da região afetada pelo fenômeno da seca, a solução da açudagem, adotada para enfrentar a problemática, o uso da relação do nível com volumes acumulados nos reservatórios para gestão dos recursos hídricos, resumo das atividades para realização de levantamento de campo, uma breve descrição do que é sensoriamento remoto e altimetria espacial e características básicas dos satélites utilizados no estudo.

2.1 POLÍGONO DAS SECAS

As grandes secas na região semiárida do Brasil são cíclicas e na história são relatadas desde a época da colonização pelos portugueses, a partir de documentação escrita. O fenômeno provocou, durante toda a história, fome e miséria nas famílias nordestinas e situações como fuga para grandes metrópoles em busca de condições de uma vida melhor.

O fenômeno da seca na região acontece devido à grande variabilidade climática, quando a zona de convergência intertropical (ZCIT) não consegue se deslocar até a região Nordeste no período verão-outono no Hemisfério Sul, principalmente nos anos de ocorrência de *El Niño*.

O Polígono das Secas (Figura 1) está demarcado pela Lei 175, de 5 de janeiro de 1936, e foi delimitado com o objetivo de implementar uma política de combate a fim de neutralizar os efeitos das estiagens que afetam a área do referido polígono (RAMALHO, 2013).

Nessa área, a precipitação é concentrada em poucos meses do ano e os índices de evaporação também são muito elevados devido à maior incidência da radiação solar. As características geológicas do solo da região, composto por estruturas cristalinas, também dificultam a exploração da água subterrânea. Nessa área, a precipitação varia de 150 a 1300 mm/ano e as temperaturas médias anuais nas faixas de 23° C a 27° C, evapotranspiração potencial média de 2.000 mm/ano e umidade relativa do ar média em torno de 50% (MOURA *et al.*, 2010). Por essas

características, a região apresenta volume de água insuficiente em seus mananciais para atendimento das necessidades da população.

Figura 1 – Área do polígono das Secas



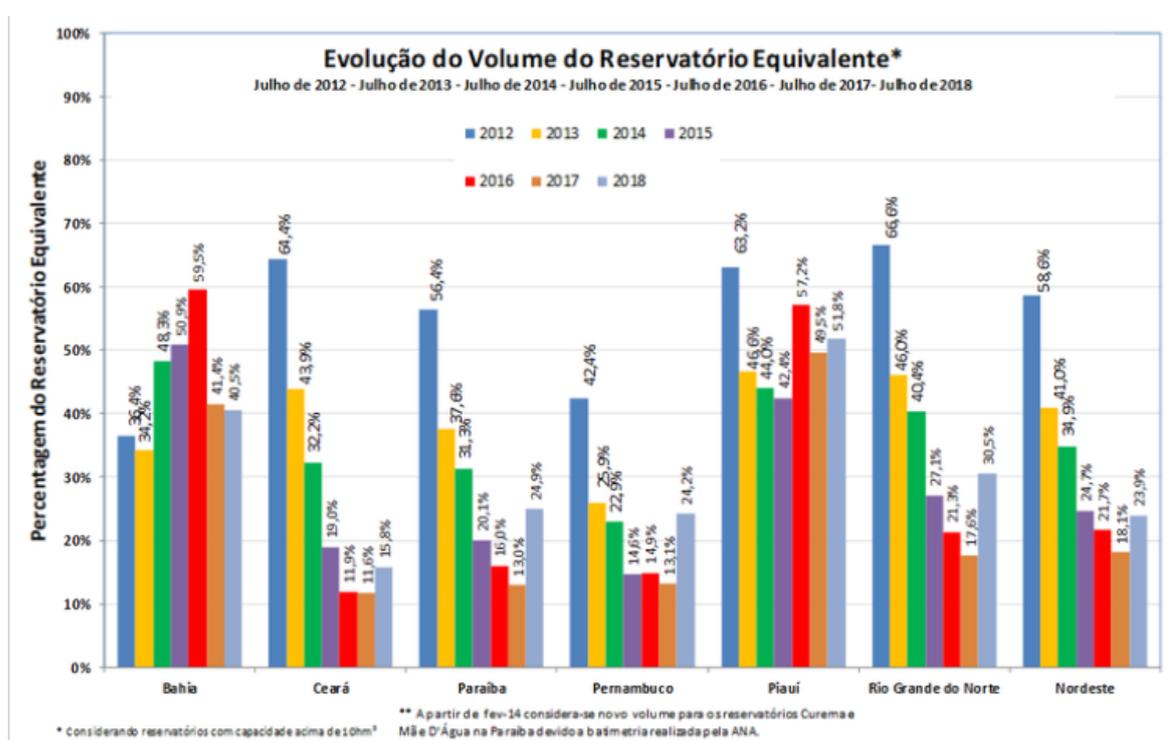
Fonte: Ministério da Integração Nacional (2005).

Em virtude das características descritas no parágrafo anterior, os rios da região semiárida têm regime fluvial temporário e intermitente, com fluxo concentrado em poucos meses dos anos.

Pelas características climáticas e geológicas da região, o primeiro modelo de engenharia para mitigar os efeitos da seca foi a solução “hidráulica”, através da construção de reservatórios que permitissem armazenar água dos rios no período de chuvas para regularização da distribuição ao longo do tempo.

Com a solução adotada, temos na região semiárida grande volume dos recursos hídricos disponíveis para os diversos usos, armazenados em grandes, médios e pequenos reservatórios. Conhecer a disponibilidade desses reservatórios é primordial para a gestão da água na região. Na Figura 2, a Agência Nacional de Águas (ANA) apresenta a evolução, entre os anos de 2012 e 2018, da disponibilidade de água em reservatórios por estado da região Nordeste.

Figura 2- Evolução do volume dos reservatórios no Nordeste



Fonte: ANA (2018).

2.2 AÇUDES NO SEMÁRIDO

A construção dos reservatórios hídricos no semiárido do Brasil surge como sendo um dos primeiros sistemas de engenharia para mitigar os efeitos produzidos pela seca. No semiárido, o fenômeno recorrente das secas, devido à irregularidade anual e interanual dos totais pluviométricos, desafia a busca contínua de técnicas que permitam minimizar a situação e atender as necessidades básicas de subsistência com o desenvolvimento da região.

A política de açudagem pública no Nordeste brasileiro segue o exemplo dos Estados Unidos. Segundo Ab'Saber (1999), tem início nos fins do Segundo Império e início da República, com a construção do açude de Orós, no Ceará. A partir de 1909, com a criação da Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS), a construção de açudes passa a ser amplamente incentivada, sendo adotada como a principal “solução” para escassez de água na região (CAVALCANTE, 2012; REBOUÇAS, 1997; CIRILO, 2008).

Um dos motivos para adoção de modelo de armazenamento de água através da técnica de açudagem na região semiárida leva em consideração a sua situação geológica predominante, estruturas cristalinas do embasamento rochoso, em sua maior parte rochas cristalinas, impermeáveis, salvo exceções, quando há entre as rochas problemas de falhas geológicas. Essas camadas cristalinas são muito próximas da superfície, com muitos afloramentos rochosos que são usados para armazenar água da superfície, como caldeirões. Contudo a presença de superfícies rochosas cristalinas contribui para salinizar a água, sais que provêm do intemperismo físico, que desprende muitos cristais de rochas, e sais arrastados pela precipitação das chuvas, sendo sedimentados nos rios e açudes. A alta insolação na região também contribui para taxas de evaporação elevada, facilitando a subida dos sais de rochas para a superfície, junto com a água que evapora. É estimado que um terço dos açudes do DNOCS apresentem problemas de salinização (SUASSUNA, 2002).

O DNOCS é a mais antiga instituição federal em atuação no Nordeste. Criado inicialmente com o nome de Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS), através do decreto 7.619 de 21 de outubro de 1909, editado pelo Presidente Nilo Peçanha, foi o primeiro órgão a estudar o problema da seca no semiárido. Em 1919, através do Decreto 13.687, recebeu o nome de Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS). Apenas em 1945 (Decreto-Lei 8.846, de 28/12/1945), recebe a denominação atual, DNOCS, sendo transformada em autarquia federal, através da Lei nº 4.229, de 01/06/1963. Entre 1909 até 1959, praticamente foi a única agência governamental federal a executar obras de engenharia na região, fazendo estradas, açudes, pontes, portos, ferrovias, hospitais, campos de pouso, redes de energia elétrica e telegráficas e usinas hidrelétricas. Até a criação da SUDENE, era o único órgão responsável pela assistência às populações flageladas pelas cíclicas secas na região, chegando a se

constituir como a maior “empreiteira” da América Latina na época em que o Governo Federal construía no Nordeste.

O fluxo de recursos para combater os efeitos da seca variou bastante ao longo do tempo, sendo mais intenso nos períodos que se seguem a alguma grande seca. Ao fim de 1990, o DNOCS já havia construído 295 açudes com uma capacidade total de 15,59 bilhões de metros cúbicos. Depois de um período de intensa atividade nos anos de 1950 e 1960, o número de açudes construídos caiu na década de 1970, crescendo novamente a partir da década de 1980, quando alguns dos maiores açudes foram construídos (ASSUNÇÃO; LIVINGSTONE, 1988). A Tabela 1 mostra a evolução do número de açudes construídos e volumes acumulados entre os anos de 1898 e 1990.

Tabela 1 - Açudes Públicos Construídos pelo DNOCS, 1898-1990 (volumes em 10^6 m^3)

Período	Nº	Acum.	Volume Total	Volume por açude	Médio por ano
1898-1909	3	3	177.961	59.320	16.178
1910-19	48	51	222.231	4.630	22.223
1920-29	44	95	269.666	6.129	26.967
1930-39	31	126	1.298.579,00	41.888	129.852
1940-49	5	131	778.454	157.691	77.854
1950-59	64	195	3.749.347,00	58.584	374.935
1960-69	57	252	4.094.138	71.826	409.413
1970-79	7	259	904.464	129.209	90.446
1980-90	36	295	4.131.200	114.756	375.473
1980-85	25	284	3.246.182	129.847	541.030
1986-90	11	295	885.018	80.456	177.003
1898-1990	295	-	1515.592,460	52.855	169.483

Fonte: DNOCS (1991).

O uso da água de açudes pode ser analisado nos seguintes aspectos:

- Irrigação de culturas;
- Pecuária;
- Abastecimento de água da população;
- Criação de peixes;
- Geração de energia elétrica;

- Turismo;
- Perenização de rios;
- Reserva de água de última instância.

A Agência Nacional de Águas (ANA) possui o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), que permite verificar a situação dos reservatórios no país. Fazem parte desse Sistema o Nordeste e o Semiárido, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (Semiárido)



Fonte: ANA (2019).

A informação de nível é coletada diariamente nos reservatórios monitorados e gerados os volumes a partir das curvas cota x área x volume. As tomadas de decisão para operação eficiente dos reservatórios dependem de que as informações sobre os

volumes sejam realistas. Informações erradas podem comprometer a adequada distribuição dos recursos hídricos para os usuários e deixar de atender usos prioritários. É inquestionável a importância de haver curvas cota x área x volume que permitam obter os volumes acumulados com segurança. A informação é primordial para gerir a água armazenada e dimensionar adequadamente a liberação para atendimento dos diversos usos possíveis no tempo. As demandas por recursos hídricos em uma bacia hidrográfica são variadas e, principalmente em situações de escassez, como na região semiárida, conhecer a disponibilidade de recursos é essencial.

2.3 CURVAS CAV

As curvas cota-área-volume são construídas para estimar os volumes armazenados em um reservatório por meio de uma tabela que correlaciona determinado nível do reservatório com a sua área e volume correspondente. Para confecção ou atualização das informações dessa curva, são necessárias etapas em campo, onde é realizada operação de batimetria para levantar a superfície coberta por água e técnicas de topografia complementares para a superfície não coberta pela água. Essas atividades de campo demandam equipe especializada, uso de diversos equipamentos, como ecobatímetro, GPS-Geodésico, barcos, motores, veículos, sobrevoo sobre a área, dentre outros, além de etapa em escritório para processamento dos dados. Há um custo significativo embutido no trabalho de levantamento de campo, que muitas vezes inviabiliza as atualizações dessas curvas nos intervalos recomendados.

Segundo informações contidas em ANA (2013), é de grande importância para a adequada gestão da água disponível nos açudes monitorar mudanças nas CAVs, que ocorrem, principalmente, devido ao assoreamento dos reservatórios, diminuindo a área disponível para armazenar água.

Para iniciar as atividades, dados cartográficos podem ser recuperados a partir da cartografia de projeto e por levantamentos geodésicos, batimétricos e aerofotogrametria, processos que permitem levantar a área até o nível máximo do empreendimento (cota de transbordamento).

O levantamento da área coberta pela água é realizado com uso de ecobatímetros de feixe único (*single beam*) ou múltiplo (*multibeam*), em barcos que realizam a navegação no lago, em locais preestabelecidos na etapa de planejamento, demarcados por linha de navegação, que são visualizados na tela de um *notebook* durante a coleta de dados em campo por meio de *softwares* específicos. A posição da embarcação é corrigida através de um sistema, composto por conjuntos de GPS, em que o GPS (*Rover*) que fica no barco recebe correções das coordenadas, através de um sistema de rádio de um GPS instalado em terra em ponto de coordenada estabelecida. A posição do levantamento deve estar georreferenciada ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). O mesmo referencial deve ser empregado para realizar o levantamento da área seca e molhada. Para delimitação do contorno do reservatório, são utilizados dados do levantamento topográfico, com uso de *laser* ou aerofotogrametria.

Os dados de campo são processados posteriormente em escritório, onde se verificam pontos inconsistentes e gera-se uma malha de pontos com informações de latitude, longitude e altitude. Com uso de programas topográficos, por triangulação dos pontos, consegue-se gerar informações da área e volume correlacionados com as curvas de nível para as cotas específicas. Tem-se como produto uma tabela, que pode ser resumida com a informação de cota da curva de nível, área referente a essa curva e volume abaixo da curva (ANA, 2013).

2.4 SENSORIAMENTO REMOTO COM IMAGENS ÓTICAS

Sensoriamento remoto consiste no uso de sensores para aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem haver contato direto entre eles. Os sensores são capazes de coletar energia proveniente do objeto e converter em um sinal que pode ser registrado de tal forma que permita a extração de informações. Os sensores remotos são sistemas fotográficos ou óptico-eletrônicos capazes de detectar e registrar, sob a forma de imagens ou não, o fluxo de energia radiante refletido ou emitido por objetos que estão distantes do alvo (STEFFEN *et al.*, 1981).

A radiação eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto (0 Kelvin). Todo corpo acima dessa temperatura

pode ser considerado como uma fonte de energia eletromagnética utilizada no sensoriamento remoto da superfície terrestre.

Não é necessário um meio material para a energia eletromagnética se propagar. A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é diretamente proporcional à sua frequência e comprimento de onda conforme a equação 1.

$$v = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Onde:

v = velocidade da onda (m/s)

λ = Comprimento de onda (m)

f = frequência (Hz)

Uma outra característica das ondas eletromagnéticas é a capacidade de transportar energia e informações. Existem vários tipos de radiação eletromagnética, que são diferenciadas uma da outra pelo seu comprimento de onda (distância entre dois pontos máximos de uma onda) (NOVO; HANSON; CURRAN, 1989).

2.4.1 Sistemas de aquisição de imagens

Cada ponto imageado pelos sensores dos satélites corresponde a uma área denominada "*pixel*" (*picture cell*), que é geograficamente identificada e que possui valores digitais relacionados à intensidade de energia refletida em faixas (bandas) bem definidas do espectro eletromagnético.

Em satélites como o LANDSAT e SPOT, o sinal elétrico detectado em cada um de seus canais, é convertido ainda a bordo do satélite, por um sistema analógico/digital, e a saída enviada para as estações de recepção via telemetria. As imagens desses satélites são amostradas com um número grande de pontos (as imagens do sensor "*Thematic Mapper*" do satélite LANDSAT possuem mais de 6000 amostras por linha). Além disso, tais imagens têm a característica de serem multiespectrais, no sentido de constituírem uma coleção de imagens de uma mesma cena, em um mesmo instante (LANDSAT, 2019).

O fluxo radiante que provém de uma fonte numa determinada direção por unidade de área é denominado radiância. A quantificação de radiância de uma cena

é representada pelos níveis de cinza descritos na imagem digital e é fornecida pelo número de bits por *pixel*. Os sensores mais modernos obtêm geralmente imagens de 8 ou 10 bits (256 ou 1024 níveis digitais). O nível de cinza é representado pela radiância média de uma área relativamente pequena em uma cena.

No caso das imagens multiespectrais, a representação digital é mais complexa, porque para cada coordenada (x, y), haverá um conjunto de valores de nível de cinza. Representa-se, então, cada *pixel* por um vetor, com tantas dimensões quantas forem as bandas espectrais. Banda espectral é o intervalo entre dois comprimentos de onda no espectro eletromagnético (INPE, 1991).

2.4.2 Missão Landsat

LANDSAT é nomenclatura de um programa de satélite de observação da terra de origem norte-americana. O programa teve início na segunda metade da década de 1960, com origem a partir de um projeto desenvolvido pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), sendo direcionado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. O programa inicialmente foi denominado EARTS (*Earth Resources Technology Satellite*) e em 1975 passou a se denominar LANDSAT.

O programa em sua maior parte foi gerenciado pela NASA e pela USGS e envolveu o lançamento de 8 satélites. O primeiro satélite desenvolvido para atuar diretamente na pesquisa de recursos minerais foi lançado em 1972 e recebeu a denominação ERTS-1 ou LANDSAT-1, com dois instrumentos a bordo, as câmeras RBV e MSS.

Em 1975 foi lançado o LANDSAT 2, que transportou os mesmos tipos de instrumentos. O LANDSAT 3, lançado em 1978, sofreu algumas alterações, principalmente em relação aos canais oferecidos. Os LANDSAT's 1, 2 e 3 foram considerados satélites experimentais.

Em 1982, começa a operar o LANDSAT 4, ainda com o MSS, mas também com um novo equipamento embarcado, o sensor TM, projetado para atender pesquisas nas mais diversas áreas temáticas no âmbito dos recursos naturais. Em 1984, entra em atividade o LANDSAT 5, com instrumentos embarcados iguais ao LANDSAT 4. Em 1995, o sensor MSS deixa de enviar dados, enquanto o sensor TM

ficou ativo até janeiro de 2013. O LANDSAT 6 foi projetado com o sensor ETM, com configurações semelhantes aos seu antecessor, com inclusão de uma banda pancromática com 15 metros de resolução espacial, contudo o satélite não conseguiu atingir a órbita terrestre por falhas no lançamento.

Em 1999 é lançado o LANDSAT 7, tendo a bordo o sensor ETM+, uma inovação do sensor ETM, que conseguiu melhorar a acurácia do sistema, mantendo os intervalos espectrais. Além disso, ampliou a resolução espacial da banda 6 (infravermelho normal) para 60 metros, tornou a banda pancromática operante e permitiu a geração de composições coloridas com 15 metros de resolução. O LANDSAT 7 funcionou, normalmente, até 2003, quando apresentou avarias no *hardware* e começou a operar com o espelho corretor de linha (SLC) desligado. As imagens continuam sendo adquiridas e remetidas à Terra, mas para utilizá-las, é necessário realizar correções prévias e análise da acurácia no posicionamento e calibração de *pixels* (USGS, 2013).

O LANDSAT 8 foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 e originalmente chamado de *LANDSAT Data Continuity Mission*, recebendo a denominação de Landsat 8 em 30 de maio de 2013 com controle do USGS. O LANDSAT 8 transporta os instrumentos *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). As bandas espectrais do sensor OLI apresentam aprimoramento de instrumentos em relação aos satélites anteriores, adicionando duas bandas espectrais: um canal visível azul profundo (banda 1) projetado para pesquisa de recursos hídricos e zonas costeiras, e um novo canal infravermelho de ondas curtas, para detecção de nuvens cirros.

O instrumento TIRS coleta duas bandas espectrais que eram cobertas por apenas uma banda nos sensores TM e ETM+ anteriores.

Os sensores presentes no LANDSAT 8 fornecem desempenho radiométrico do sinal-ruído 9 (SNR), quantificado em uma faixa dinâmica de 12 *bits* (4096 níveis de cinza em potencial em uma imagem), enquanto na de 8 bits há apenas 256 níveis de cinza. Esse sinal melhorado do ruído permite caracterizar melhor o estado e condição da cobertura da terra. Os produtos são entregues como imagens dimensionadas para 55.000 níveis de cinza (USGS, 2013). A Tabela 2 apresenta a linha do tempo das missões LANDSAT.

Onde:

R = Distância (*Range*, altura do altímetro, que separa o emissor do alvo, é deduzida pela duração do trajeto de ida e volta);

ΔR_j (com $j = 1, \dots, n$) são as correções instrumentais, ambientais e geofísicas. Ou seja, são as correções relativas às componentes de refração atmosférica e relativas à polarização entre a superfície média da dispersão eletromagnética no nível médio do mar na interface mar-atmosfera (FU; CAZENAVE, 2001);

$$\hat{R} = C \cdot \frac{dt}{2} \quad (3)$$

C = Velocidade de propagação da onda (velocidade da luz)

As medidas devem ser corrigidas devido aos efeitos que interferem, buscando uma medida mais precisa. O instrumento deve ser calibrado regularmente para determinar os tempos de atraso do sinal por interferência do ambiente na eletrônica do instrumento, devido a ciclos de aquecimento/resfriamento do satélite ao redor da órbita. Outro fator que deve ser levado em consideração é o atraso quando o sinal viaja através da ionosfera e atmosfera. Uma distância relativa às correções geofísicas é necessária para permitir correções desses atrasos. As marés na superfície terrestre também devem ser contabilizadas para permitir a determinação da altura instantânea da superfície.

A grandeza física utilizada na prática é a altura H, que representa a medida instantânea da altura do refletor que retorna o eco do radar, em relação a uma superfície matemática de referência, o elipsoide de referência (FU; CAZENAVE, 2001). A Figura 4 mostra esquemas que representam as variáveis envolvidas na determinação da elevação da água na superfície do planeta.

Para estimar a altura h, distância entre o nível do mar e o elipsoide de referência, há necessidade de conhecer duas grandezas, R (*range*) distância altimétrica do satélite em relação à superfície, H altura do satélite em relação ao elipsoide de referência WGS-84. A altura h representa a soma dos componentes:

a) permanente (topografia) ou altura do geóide em relação ao elipsoide (Figura 4);

b) uma topografia variável que traduz uma elevação temporária e instantânea da superfície.

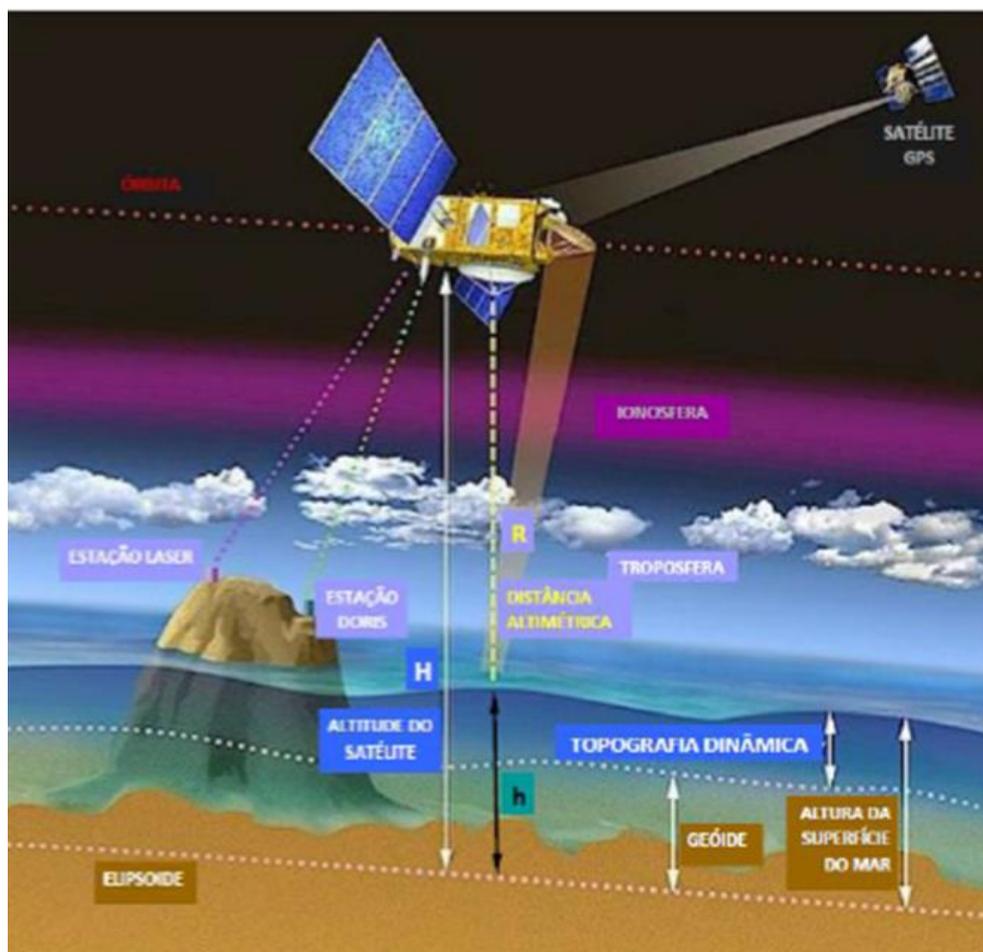
$$h = H - R \quad (4)$$

Onde:

H = Altitude do satélite em relação ao elipsoide.

R = Distância altimétrica do satélite em relação à superfície da terra.

Figura 4 - Princípio da altimetria por satélite



Fonte: AVISO (2008).

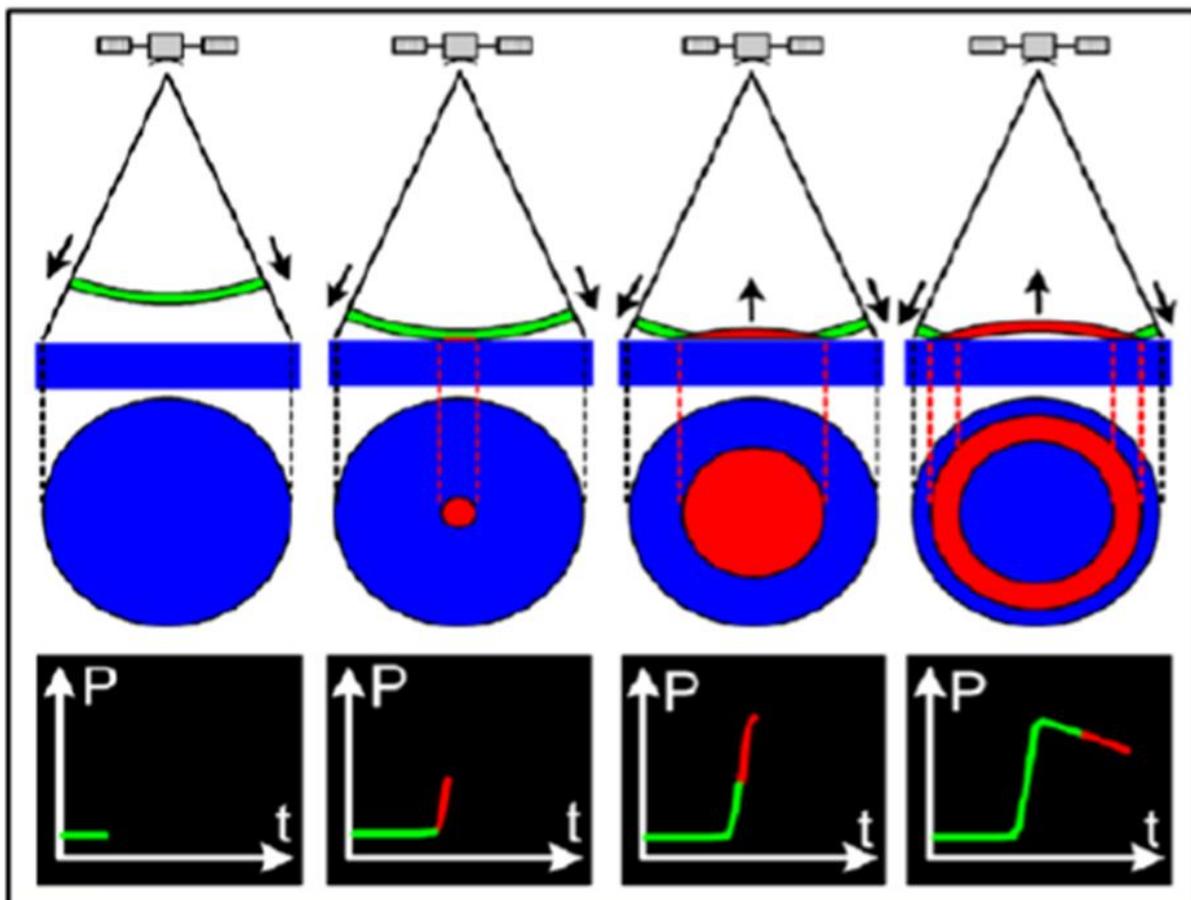
A determinação precisa da distância altimétrica R, correlacionada ao tempo gasto pelo feixe do radar para realizar o trajeto de ida e volta do satélite à superfície e

a informação da órbita do satélite H, localização precisa do satélite no espaço, são informações essenciais para obter dados altimétricos espaciais (FU; CAZENAVE, 2001). Pulsos de micro-ondas de frequência elevada são enviados do nadir do satélite para a superfície da terra e, após refletirem sobre um alvo, parte do sinal emitido retorna para o satélite. A partir do tempo de chegada dos ecos e conhecendo a velocidade de deslocamento desses ecos, é possível estimar a distância percorrida (SANTOS DA SILVA *et al.*, 2010).

O sinal de retorno do altímetro é um dado bruto, que deve passar por um tratamento para que possa ser utilizado na obtenção das estimativas dos parâmetros físicos da superfície levantada pelo instrumento. A energia que retorna para o altímetro é analisada, buscando-se a localização precisa do eco no tempo (COSTI, 2012).

Na formação do sinal do altímetro sobre uma superfície ideal plana, o eixo vertical é posicionado no momento da emissão do pulso do radar. A informação do tempo de ida e volta é obtida através do eco refletido pela superfície do plano de água. No exemplo teórico mostrado na Figura 5, para uma superfície oceânica, o tempo de ida e volta é correspondente à distribuição da energia (P) recebida na metade da curva ascendente (passagem do verde ao vermelho no terceiro quadro).

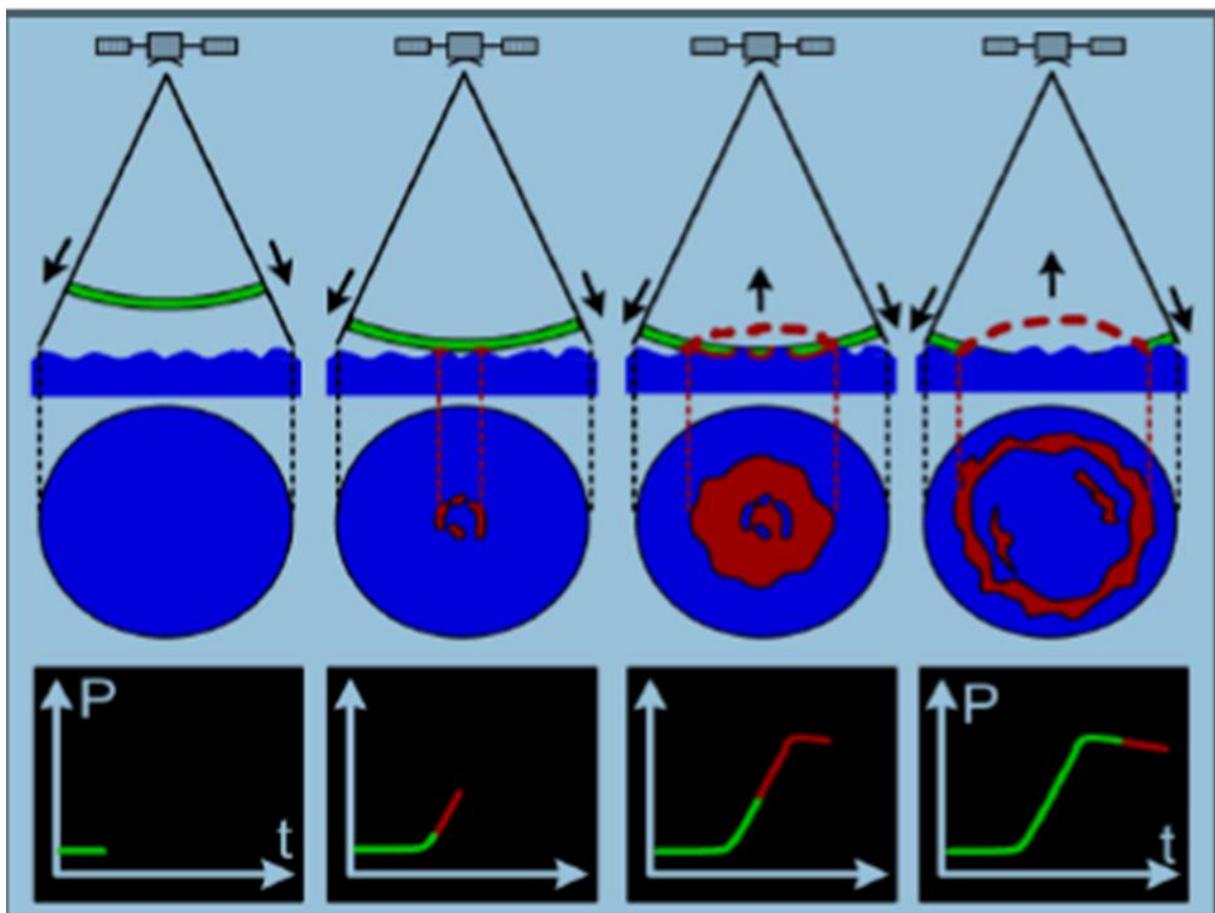
Figura 5 - Formação do sinal do altímetro em uma superfície plana



Fonte: Santos da Silva et al. (2010).

A Figura 5 apresenta uma situação ideal, que não acontece na prática. O ambiente de formação do sinal do altímetro é diferente de uma superfície plana e horizontal, principalmente tratando-se de medidas realizadas no continente, com alturas diferentes e reflexão não homogênea.

Figura 6 - Formação de sinal altimétrico sobre uma superfície irregular



Fonte: Santos da Silva et al. (2010).

Na Figura 6, como a superfície não é plana e horizontal, há diferentes alturas geradas por cristas e depressões na superfície. Portanto a reflexão do sinal bruto emitido pelo altímetro não é homogênea. As formas de ondas (FOs), que consistem na representação da potência recebida pelo altímetro em função do tempo, obtidas a partir de cada eco elementar, apresentam ruídos. É preciso, assim, realizar um tratamento específico desses ecos, para que eles possam ser explorados. Esses tratamentos são realizados a bordo do satélite (*tracking*), no trajeto do sinal ao solo (*retracking*), com uso de algoritmos, que permitem extrair diversas informações, incluindo a distância do satélite à superfície.

Muitos estudos têm mostrado a elevada capacidade das missões altimétricas na recuperação de dados de níveis em rios ou observações de áreas inundadas (CALMANT *et al.*, 2012), utilizando principalmente o algoritmo ICE-1 para obtenção

das informações (WINGHAM; RAPLEY; GRIFFITHS, 1986) para processamento do eco radar e comparação com as informações das réguas instaladas.

Existem muitos estudos de validação de dados altimétricos sobre rios e lagos, que verificam apenas a variação do nível da água, comparando dados da série altimétrica com leituras realizadas *in situ*.

Georreferenciar seções de réguas permite identificar o viés existente entre leituras realizadas *in situ* e as informações altimétricas dos radares. Esses vieses podem ter diferenças significativas entre uma missão e outra. Roca et al. (2002) e Yi et al. (2003) relatam valores de vieses diferentes, variando de 40 a 53 cm, em experimentos separados para o satélite Envisat. Crétaux et al. (2009) mostraram que ao longo do lago Issyk-Kul diferentes valores de vieses tiveram que ser considerados para diferentes algoritmos de rastreamento do Envisat.

Créataux et al. (2012) observaram que o viés absoluto obtido a partir de dados do Envisat, usando o algoritmo Ice-1, em comparação com medidas das campanhas de campo, realizadas em 2009 e 2010, no Lago Issykkul, ficou entre 62,1 e $63,4 \pm 3,7$ cm.

Crétaux et al. (2018), calcularam os desvios dos altímetros dos satélites Jason-3 e Sentinel-3A em relação a medidas realizadas *in situ*, em 2016 e 2017, no Lago Issykkul, no Quirguistão. Três campanhas foram organizadas no lago, a fim de estimar o viés absoluto do altímetro do nadir dos referidos satélites. O trabalho de campo consistiu em medir a altura da água, usando um sistema GPS transportado em um barco, ao longo das trilhas dos satélites no lago. Os desvios absolutos dos altímetros foram calculados pela média das diferenças das alturas da água ao longo da passagem do satélite (Sistema de GPS instalado no barco *versus* altimetria). Os valores de vieses encontrados no referido trabalho para os altímetros do Jason-3 e Sentinel-3A, comparando com dados *in situ*, utilizando o algoritmo Ice-1, foram de 2,4 cm para o Sentinel-3A e 3 cm para o Jason-3. Os autores relatam também a importância dos estudos dos vieses no Lago Issykkul, para correlacionar informações históricas de altimetria de diversas missões de satélites altimétricos.

Georreferenciar as séries de dados altimétricos dos níveis ao longo do curso do rio fornece a inclinação da superfície, um parâmetro-chave para a modelagem hidrológica. Quando as réguas são niveladas com equipamentos GNSS, os dados de

nível da água em relação ao zero das escalas são transformados em altitude absoluta, possibilitando também determinar o viés existente entre a informação *in situ* e a fornecida pelo radar altimétrico. Um viés se não for corrigido pode fornecer um erro sistemático na inclinação e, conseqüentemente, produzir informações erradas para o modelo.

Para estudos climáticos, a duração da série temporal é de grande importância em estudos que incluem mudanças no nível da água. Embora a altimetria por satélite forneça estimativas do nível da água a mais de duas décadas, a missão de um satélite, raramente dura mais de uma década, sendo necessário, para obter séries maiores, juntar séries temporais advindas de vários satélites, garantindo um maior tempo da série hidrológica. Conhecer o viés de cada missão altimétrica é necessário para montar essa série combinada.

A metodologia proposta para obter estimativas confiáveis do viés altimétrico sobre rios em relação aos valores medidos para uma determinada missão altimétrica, consiste na correção das medições *in situ* com rastreamento por GPS.

2.5.1 Missões altimétricas

O radares altimétricos foram projetados inicialmente para tomada de medidas do nível dos oceanos, contudo a grande quantidade de dados em áreas continentais viabiliza os estudos em Hidrologia com monitoramento sistemático da variação espacial e temporal do nível de água em rios, lagos e reservatórios de forma contínua e precisa, sendo um instrumento cada vez mais utilizado para entender os processos ambientais. O uso da técnica foi mais aplicado à região amazônica devido ao grande porte dos seus rios e à dificuldade do monitoramento convencional em muitos locais de difícil acesso. A Tabela 3 mostra missões altimétricas do século XXI

Tabela 3 – Missões altimétricas no século XXI

Satélite	Agência	Lançamento	Altimetro	Banda	Período de Revisita
Jason-1	CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA	2001	Poseidon - 2	Ku e C	10 dias
ENVISAT	ESA	2002	RA-2	Ku	30-35 dias
Icesat-1	NASA	2003	Laser	-	8 e 9 dias
Jason-2	CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA	2008	Poseidon - 3	Ku e C	10 dias
Cryosat-2	ESA	2008	Siral	Ku	369 dias
HY-2A	CHINA	2011	-	Ku e C	14 dias
SARAL	CNES/ISRO	2013	Altika	Ka	35 dias
Jason-3	CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA	2015	-	Ku e C	10 dias
Sentinel-3	ESA	2016		Ku e C	27 dias-
SWOT	CNES, NASA CSA	2021 (previsão)	Karin	Ka	21 dias

Fonte: Adaptado de Sulistioadi (2013).

SARAL (Satélite com Argos e ALTika)

A missão SARAL foi uma cooperação tecnológica em altimetria espacial entre a ISRO (Organização Indiana de Pesquisa Espacial) e a CNES (Agência Espacial Francesa). Em relação ao monitoramento de sistemas hidrocontinentais, o SARAL/Altika melhorou os produtos derivados de altimetria por satélite, principalmente para séries temporais de nível de lagos e rios. Demonstrou-se que o SARAL melhorou significativamente devido às novas tecnologias embarcadas e à qualidade dos produtos hidrológicos em relação aos seus antecessores. O SARAL usa a mesma órbita que o RRS e o ENVISAT e pode ser usado para estender as séries temporais de nível da água interior derivadas dessas missões.

O SARAL permitiu acesso a rios e lagos menores que não eram “visíveis” com os outros altímetros. Ainda há interferência de nuvens na aquisição dos dados de altimetria dos níveis das águas continentais, mas ainda permite que as estimativas dos níveis sejam confiáveis e possam ser usados para gerar séries altimétricas do nível da água. O SARAL em comparação com o ENVISAT tem potencial de proporcionar estimativas mais homogêneas do nível da água em rios e lagos (KRAMER; CRACKNELL; ARTHUR, 2009).

O objetivo geral da missão foi realizar medições globais precisas e repetitivas da elevação da superfície do mar, alturas de ondas significativas e velocidade do vento.

A missão é considerada complemento das missões Jason-2 da NASA/NOAA e CNES/EUMETSAT. Além disso, é uma missão para preencher a lacuna de dados entre o ENVISAT e o Sentinel-3.

O altímetro principal da missão é o AltiKa, primeiro altímetro espacial que operou na onda Ka. O conceito AltiKa, baseado em um altímetro de banda larga (35,75 GHz, ~ 500 MHz), foi inicialmente proposto em 2002 como uma missão de minissatélites de altimetria do CNES (150 kg) na plataforma Myriade. Estudos de viabilidade também foram feitos para acomodar o AltiKa na plataforma TopSat de SSTL (*Surrey Satellite Technology Ltd.*).

A qualidade dos dados do SARAL é tão boa ou até melhor que a do Jason-2. Outro fator chave para aplicação de altimetria é o conteúdo espectral dos dados. O altímetro AltiKa fornece uma relação sinal-ruído que nunca foi obtida antes. Em comparação com os dados Jason-2 e CryoSat-2 (modo SAR), o conteúdo espectral das observações SARAL/AltiKa é amplamente melhorado para todos os comprimentos de onda abaixo de 70 km. Isso é explicado pelo ruído branco muito menor, devido aos excelentes desempenhos de retrocesso da banda Ka e à taxa de medição de 40 Hz (maior que o padrão de 20 Hz nas missões Jason-class e CryoSat-2). Em conclusão, os desempenhos da missão confirmam amplamente as expectativas nominais em termos de precisão, qualidade de dados e disponibilidade de dados. Em relação às águas interiores, SARAL/AltiKa melhora a qualidade dos produtos hidrológicos derivados da altimetria por satélite (SILVA, 2010).

SARAL/AltiKa é, em muitos aspectos, um protótipo da altimetria do futuro. O SARAL/AltiKa representa o início de uma nova classe de altímetros que operam na frequência da banda Ka com um *footprint* pequeno e uma alta taxa de pulso. A banda Ka está prevista para vários novos projetos de satélites altimétricos (AltiCryo do CNES, CryoSat-3 e SKIM da ESA) e a banda escolhida para o SWOT (*Surface Water and Ocean Topography*). Em relação aos satélites anteriores, expande as aplicações em projetos interdisciplinares (AVISO, 2013).

Schwatke et. al. (2010), realizaram comparações de séries do SARAL e ENVISAT com dados *in situ*, onde se demonstrou que o SARAL tem potencial de prolongar as séries temporais do ENVISAT e diminuir o RMSE (*root mean square error*) em cerca de 10% para grandes lagos e 40% para os rios selecionados.

ENVISAT

O ENVISAT foi lançado em 1º de março de 2002 pela Agência Espacial Europeia (ESA). Os dados do satélite serviram de apoio às investigações científicas sobre a Terra e permitiram monitorar alterações ambientais e climáticas. Os dados também ajudaram no desenvolvimento de aplicações operacionais e comerciais. A missão foi finalizada em 8 de abril de 2012 (ESA EDUSPASCE, 2015).

O ENVISAT foi o sucessor do ERS, tendo sido equipado com radares de imagem mais avançados, altímetro de radar e radiômetro de medição de temperatura que ampliaram o conjunto de dados do ERS. Houve também o complemento de novos instrumentos, incluindo um espectrômetro de média resolução, sensível às características terrestres e à cor do oceano. O ENVISAT também transportou dois sensores atmosféricos de monitoramento de gases traços.

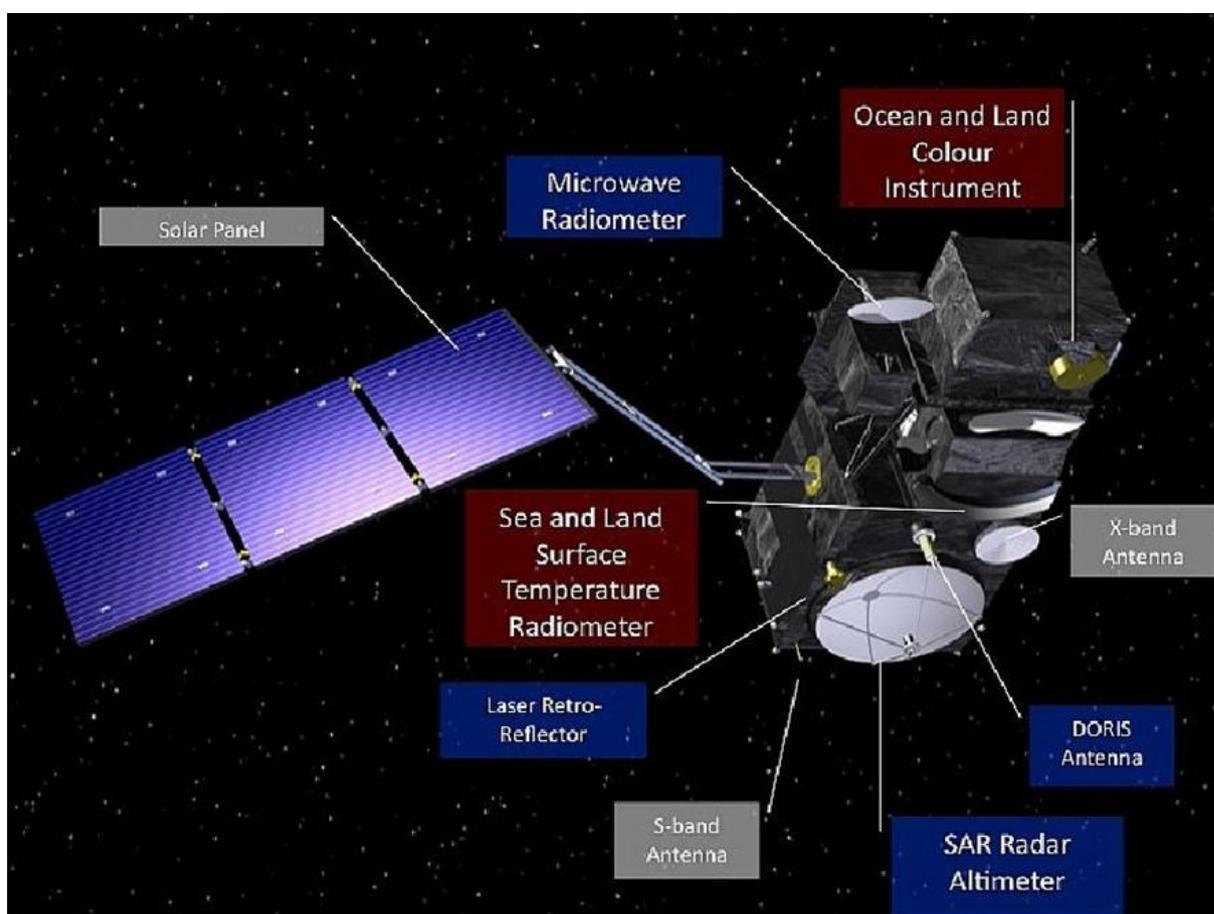
SENTINEL-3 A

A missão Sentinel-3 (S3) da ESA e do CNES é um dos elementos do programa GMES (Monitorização Global do Ambiente e Segurança), que responde aos requisitos de monitoramento operacional e quase em tempo real dos oceanos, continentes e superfícies de gelo durante um período de 20 anos. O elemento topográfico dessa missão servirá principalmente aos usuários operacionais marinhos, mas também permitirá o monitoramento do gelo marinho e do solo, bem como das superfícies de águas interiores, usando novas técnicas de observação. A missão Sentinel-3 foi projetada como uma constelação de dois satélites em órbita polar idênticos, separados por 180º, para a prestação de serviços operacionais de monitoramento marítimo e terrestre de longo prazo. O caráter operacional dessa missão implica um alto nível de disponibilidade dos produtos de dados e tempo de entrega rápido. Estão previstas uma série de satélites dentro do programa Sentinel-3,

durante o período previsto de atividade, garantindo um fluxo contínuo de dados globais robustos.

O sentinel-3 leva embarcado 6 instrumentos. Os 3 instrumentos de alta taxa fornecem dados de missão coletados diretamente através da rede SpaceWire, enquanto os instrumentos de baixa taxa são adquiridos pelo computador central para distribuição através da rede SpaceWire. A Figura 7 mostra uma imagem do Sentinel – 3A com os principais instrumentos embarcados.

Figura 7 - Vista do satélite Sentinel-3 e da acomodação da carga



Fonte: ESA (2019).

O satélite faz parte de uma constelação de satélite de observação da terra, também desenvolvido pela Agência Espacial Europeia, como parte do programa Copernicus, um programa europeu, que realiza observação da terra com a finalidade de fornecer aos formuladores de políticas e autoridades públicas informações precisas e oportunas para gerenciar o meio ambiente e mitigar os efeitos de mudanças

climáticas (disponível em: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/pag-filter/-/article/sentinel3>, com acesso em 25/04/2019).

2.6 TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADAS A RESERVATÓRIOS

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento do meio ambiente tem sido bastante difundida. Estudos relacionados à cobertura vegetal e suas modificações e ao monitoramento de recursos hídricos vêm sendo intensificados na região Nordeste.

Collischonn e Clarke (2016) realizaram estimativas e verificaram as incertezas para geração de curvas CAVs em reservatórios localizados na Paraíba com técnicas de sensoriamento remoto, utilizando dados do nível da água do monitoramento diário e áreas a partir de imagens dos satélites LANDSAT 5, LANDSAT 7 E LANDSAT 8, avaliando a metodologia em reservatórios que possuem levantamento batimétrico de campo recentes e considerados confiáveis. A metodologia foi avaliada para cálculo do intervalo de confiança das curvas CAV resultantes (curva obtida das imagens x curva de campo), mostrando resultados consistentes. Contudo, no mesmo trabalho, chamam atenção para algumas limitações para o uso da metodologia. Só é possível em reservatórios existentes e que operem com regularização, sem variações abruptas da variação do nível da água ao longo do tempo, portanto não é possível aplicar em reservatórios a fio de água. Para imagens com resolução de até 30 m, estimaram que o uso da metodologia é viável somente em reservatórios cujas áreas inundadas sejam maiores que algumas dezenas de Km². O intervalo de tempo das imagens coletadas deve ser relativamente curto, entre 10 e 15 anos, para evitar interferências de fenômenos de longo prazo, como assoreamento ou ocupação das margens, produzindo distorções na relação cota-área. Há também questões de incerteza quanto aos dados obtidos no campo, no monitoramento do nível, nos deslocamentos das réguas, sem relacioná-las com um nível absoluto, e nos erros inerentes ao próprio levantamento batimétrico.

Há ainda a questão da falta de um histórico de monitoramento do nível nos reservatórios. O uso de radares altimétricos pode facilitar o preenchimento de falhas

e substituição de dados de nível de réguas em locais onde não existem postos limimétricos instalados.

Abreu e Maillard (2016) realizaram trabalho para determinação de curvas cota x área do reservatório da UHE de Três Marias com uso de radar altimétrico e imagens orbitais. Utilizaram imagens adquiridas pelos satélites LANDSAT 5, LANDSAT 7 e LANDSAT 8 e dados do radar altimétrico dos satélites SARAL e ENVISAT, estabelecendo um modelo através do qual pode-se inferir o valor do nível da água a partir do valor da área do espelho d'água, obtidos por meio da classificação de uma imagem LANDSAT e do valor da área do espelho d'água a partir do valor de nível obtido por altimetria espacial.

2.7 ALGORITMO ICE-1

Ainda não existe um algoritmo de acompanhamento para as águas continentais efetuados diretamente de satélites. Os algoritmos específicos foram desenvolvidos para oceanos, para gelos e para os *icebergs*. O ice-1 foi desenvolvido por Wingham, Rapley e Griffiths (1986) e aplicado por Bamber (1994). As formas de onda obtidas para o gelo, em geral, são tão específicas quanto as adquiridas para as águas continentais.

As formas de onda (FOs) originadas pelos ecos de radar localizados em domínios continentais são muito diferentes das formas de ondas originadas nos oceanos. Foram desenvolvidas diferentes soluções de processamento para essas formas de onda, de acordo com a natureza da superfície considerada, podendo ser divididas em três grandes famílias: os métodos de limiar ("*thresholding*"), os métodos analíticos e o reconhecimento de formas.

Frappart et. al. (2006) testaram quatro algoritmos para aquisição de níveis de rios na Bacia Amazônica, constatando que, embora o ice-1 não tenha sido originalmente ajustado para aplicação hidrológica, é bastante robusto para FOs obtidas nas medições altimétricas realizadas em águas continentais. Os autores compararam dados adquiridos utilizando os algoritmos ocean, ice-1, ice-2 e sea ice. Todos os algoritmos mostraram resultados realistas do nível da água, contudo algumas medidas de altura derivadas do ocean, ice-2 e sea ice foram equivocadas,

porque subestimam os níveis de água em alguns metros para latitude maiores que 3,2° S. Situações similares foram observadas em diferentes configurações comparáveis na Bacia Amazônica, onde os níveis de água provenientes do ice-1 se mostraram mais confiáveis do que as estimativas oriundas dos outros algoritmos. Os autores também observaram que, quando os dados das estações virtuais foram comparados com dados das estações *in situ*, o algoritmo ice-1 forneceu entre 8% e 15% mais dados válidos que os outros algoritmos. A dispersão foi menor com o ice-1 do que com os demais algoritmos, tipicamente menor que 0,2 e 0,1 metros para níveis baixos e altos de água, respectivamente. Em todos os casos, o ice-1 apresentou o menor erro médio quadrático (rms) comparado com os outros algoritmos.

A quantificação dos níveis de água em domínio continental exige a realização de muitas medidas, que são possíveis através de avanços recentes obtidos na aquisição e no tratamento dos dados de altimetria espacial. Dentre as limitações principais para uso dos dados adquiridos por satélite, destacam-se a limitação da perda de ancoragem do altímetro e a ancoragem persistente (COSTI, 2012). A perda de ancoragem acontece quando o algoritmo de acompanhamento de bordo encontra-se incapacitado de adaptar os seus parâmetros de aquisição ao terreno encontrado. Quando a ancoragem não acontece, processos automáticos de uma nova inicialização do instrumento são processados de maneira a permitir, ao encontrar um terreno favorável, uma adaptação às novas condições de medida (SANTOS DA SILVA *et al.*, 2010).

3 METODOLOGIA

Na seção é descrita a localização do reservatório em estudo, os dados utilizados e suas fontes e as técnicas utilizadas para obter as áreas e volumes do reservatório para as diferentes cotas e obtenção dos níveis partir dos dados dos satélites altimétricos.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O açude Francisco Saboia (Poço da Cruz) foi projetado pela Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS), antecessor do atual Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). As principais finalidades eram a irrigação das terras a jusante e a montante do vale, a piscicultura e a geração de energia (MELO, 2010).

O açude é o maior reservatório do Estado de Pernambuco. Está localizado no município de Ibimirim, na bacia do Rio Moxotó, que faz parte da bacia do Rio São Francisco, sendo a principal fonte hídrica para abastecimento do Perímetro Irrigado do Moxotó (PIMOX). O açude tem capacidade de aproximadamente 504 milhões de metros cúbicos de água.

A bacia do Rio Moxotó está localizada no semiárido nordestino, em sua maior parte no Estado de Pernambuco, estendendo-se na sua porção sudeste para o estado de Alagoas até o Rio São Francisco. A bacia se localiza entre 07° 52' 21" e 09° 19' 03" de latitude sul, e entre 36° 57' 49" e 38° 14' 41" de longitude oeste (ver Figura 8).

Figura 8 - Mapa de localização do açude Francisco Saboia em Pernambuco



Fonte: O Autor (2019).

A bacia possui uma área total de 9.744,01 km². A maior parte do seu perímetro situa-se no Sertão do Moxotó, que abrange áreas de 12 municípios. Dentre estes, Inajá e Sertânia estão totalmente inseridos na bacia e os municípios de Arcoverde, Custódia, Ibirimir, Manari e Tacaratu possuem suas sedes localizadas dentro da área da bacia (PERNAMBUCO, 1998).

Ao final da década de 1960, o DNOCS elaborou um estudo sobre o potencial irrigável das terras no Nordeste, onde foi identificado o perímetro irrigado do Moxotó. Na época, as águas do açude Poço da Cruz seriam totalmente utilizadas para aproveitar os solos aluviais da região, através da irrigação, utilizando a gravidade para distribuição das águas, não havendo preocupação com a eficiência de sua distribuição. O Perímetro Irrigado do Moxotó abrange os municípios de Ibirimir e Inajá. O projeto foi implantado no início da década de 1960 e ao final da década de 1980 teve a operação em seu potencial máximo, chegando a 4.000 hectares de áreas irrigadas realizadas por pequenos agricultores. A área total irrigada nos primeiros anos da década de 1990 superou 5.200 hectares.

Entre os anos de 1980 e 1983, a produção no perímetro irrigado teve seu ápice de contribuição para a economia da região, principalmente para os municípios de Inajá e Ibimirim, produzindo milhões de toneladas de alimentos, gerando muitos empregos diretos e indiretos, além da construção de um parque industrial. Contudo, todo esse dinamismo econômico entrou em colapso a partir do ano de 1993, com as restrições ao fornecimento de água para irrigação, devido à seca e ao uso irracional e sem controle da água.

Com a seca prolongada, alta taxa de evaporação e uso sem parâmetros técnicos da água e pelo sistema de canalização, o açude Poço da Cruz foi perdendo a capacidade de atender a demanda de irrigação do perímetro, ocasionando o fechamento de suas comportas, que ficavam abertas 24 horas, ocasionando o fechamento do perímetro irrigado do Moxotó (MELO, 2010).

3.2 DADOS

Foi necessário para validação das informações geradas a partir da altimetria por satélite, série histórica dos níveis do reservatório. Também a série de imagens dos satélites Landsat e arquivos com altimetria dos satélites utilizados no estudo para confecção da curva cota x área x volume e assim comparar a curva obtida com levantamento de campo.

3.2.1 Dados Linimétricos

A série foi obtida através da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), abrangendo o período de maio de 1994 até novembro de 2017. Vale ressaltar que para todo o período a série possui apenas 20% de dados coletados pelos observadores, havendo muitos dias com falhas. A série também conta com a participação de diversos operadores, como o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), APAC e DNOCS. Em alguns meses, devido ao fato de não haver entrada de água no reservatório, foi possível estimar os níveis para determinadas datas com certa segurança, correlacionando com a área da imagem para a respectiva data.

3.2.2 Dados altimétricos (altitude elipsoidal) e curva CAV

Foi realizada visita por técnicos da CPRM para levantamento com GPS geodésico da seção de réguas no reservatório Poço da Cruz, permitindo comparação dos dados coletados pela empresa responsável pelo levantamento topobatimétrico da área do reservatório com os níveis das réguas locais, em relação à altimetria, tendo como referência o Elipsoide WGS-84.

O GPS Geodésico foi instalado durante 4 horas sobre a RN instalada na seção de réguas do reservatório. Foi utilizado o Posicionamento por Ponto Preciso do IBGE. Os dados coletados foram processados e o valor encontrado utilizado para corrigir toda a série de nível para altitude elipsoidal.

As curvas CAV foram obtidas por meio da Agência Nacional de Águas (ANA), levantadas no âmbito de um projeto de atualização das curvas CAV para 30 reservatórios localizados no semiárido do Brasil. Foram confeccionadas duas CAVs, sendo uma delas atrelada ao Sistema de Referência empregado no apoio Geodésico de campo, usado pela empresa contratada, e outro ao Sistema de Referência altimétrico local (nível do vertedor).

3.3 GERAÇÃO DOS VOLUMES

As imagens utilizadas no trabalho, compostas de séries dos satélites LANDSAT 5 TM e LANDSAT 8 OLI, foram obtidas a partir do endereço eletrônico <https://earthexplorer.usgs.gov>, onde é possível realizar pesquisa por localização e data das cenas, além de percentual de cobertura por nuvens. A partir da série histórica dos níveis do reservatório, foram analisadas as datas que poderiam cobrir a maior amplitude de variação possível, com o auge em situação de seca até os momentos nos quais estivesse cheio. Em seguida, selecionaram-se as datas que cobrissem os diferentes níveis do reservatório para, enfim, realizar o *download* das imagens.

Foram realizadas pesquisas no *site* do USGS, buscando imagens das séries LANDSAT, a partir das coordenadas de localização do espelho de água do açude Poço da Cruz. Os dados brutos dos sensores a bordo de satélites apresentam

distorções, tanto relativas à geometria de aquisição dos dados quanto relacionadas à radiometria, devido a efeitos causados pela atmosfera, sendo necessário primeiramente corrigir essas distorções. As imagens escolhidas foram processadas, realizando correções geométricas e atmosféricas segundo Richter e Schläpfer (2014). O processamento foi realizado no recorte obtido, através de uma máscara vetorial para a área de interesse. Dessa forma, delimitou-se a máxima área alagada, permitindo processar os dados referentes a essa área e posteriormente realizar a eliminação de “ruídos” provenientes de “água” que não fazem parte do reservatório. O *software Quantum Gis* (QGIS) foi utilizado para realizar os ajustes das imagens e determinar o valor da área do espelho de água do lago para as diversas cenas selecionadas. A Tabela 4 mostra as datas, os sensores usados nas capturas das imagens e os níveis de água obtidos *in situ* nessas datas.

Tabela 4 - Data da Passagem dos satélites para coleta das imagens

Data da altimetria	Sensor	Nível da Régua (m)
05/12/2017	L08OLI	411,24
12/06/2017	L08OLI	411,30
19/11/2017	L08OLI	411,39
04/02/2017	L08OLI	413,45
15/08/2017	L08OLI	413,90
12/08/2016	L08OLI	414,82
01/01/2016	L08OLI	414,93
27/09/2015	L08OLI	415,86
14/01/2015	L08OLI	417,56
11/01/2014	L08OLI	420,46
26/12/2013	L08OLI	420,62
10/12/2013	L08OLI	420,72
04/08/2013	L08OLI	422,39
14/04/2013	L08OLI	423,46
19/07/2007	L05TM	430,39
24/01/2007	L05TM	430,72
07/12/2006	L05TM	431,14
18/09/2006	L05TM	432,02
29/09/2010	L05TM	432,20
02/11/2005	L05TM	433,01
13/01/2009	L05TM	433,09
07/03/2005	L05TM	433,16
17/12/2004	L05TM	433,68
01/12/2004	L05TM	433,71
02/12/2004	L05TM	433,72
10/11/2008	L05TM	433,80
26/05/2005	L05TM	433,83
23/03/2008	L05TM	434,28
20/03/2004	L05TM	435,05

Fonte: O Autor (2019).

As imagens trabalhadas foram usadas para o cálculo da área de “água” e “não água”, através do processamento dessas imagens para obter o Índice da Diferença Normalizada de Água (*Normalized Difference Water Index – NDWI*), que permite delinear feições aquáticas, realçando a presença das mesmas nas imagens (BORGES *et al.*, 2015).

Esse método, proposto por McFeeters (1996), é derivado do Índice da Diferença Normalizada de Vegetação (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI).

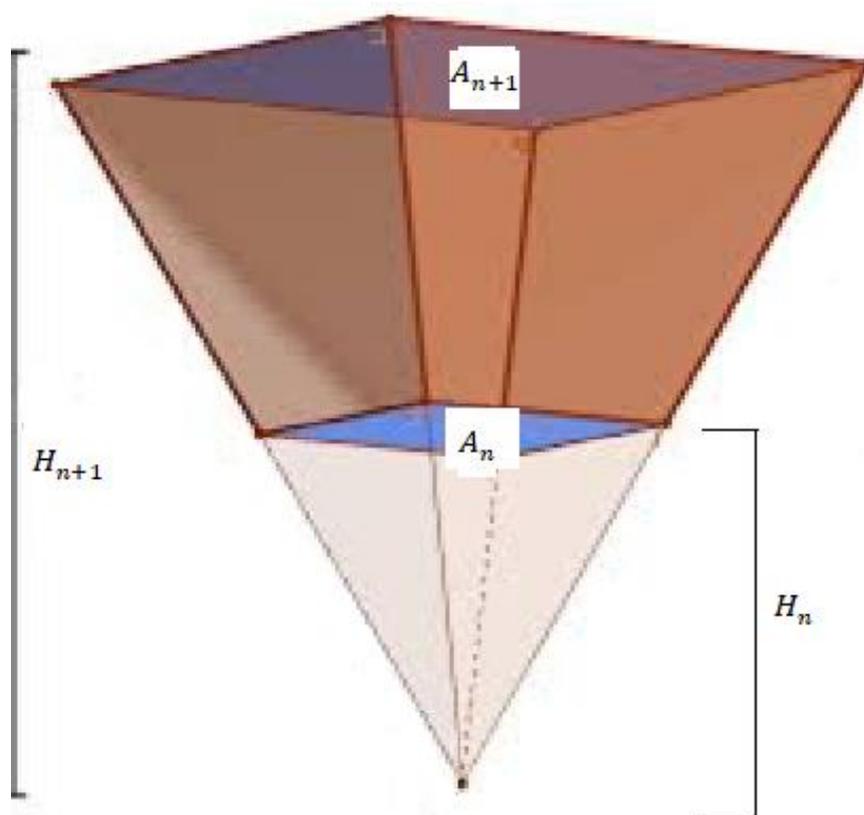
A determinação dos valores físicos de imagens é um parâmetro essencial para se obter o NDWI. Eles podem ser obtidos através da transformação dos números digitais (valores brutos das imagens) em valores físicos reais (radiância e reflectância) (BRITO NETO *et al.*, 2008). O número digital é definido como a intensidade do *pixel* e sua amplitude muda de acordo com a resolução radiométrica do sensor. Os níveis digitais estão relacionados com a intensidade da energia radiante refletida através de um modelo linear (calibração). Esses níveis não são diretamente comparáveis entre satélites por causa das diferenças na calibração dos sensores de cada satélite (ROBINOVE, 1984; BRANDÃO *et al.*, 2005). A Equação 5 mostra as operações matemáticas necessárias entre bandas para obter o NDWI:

$$NDWI = \frac{V - IVP}{V + IVP} \quad (5)$$

Onde V é a banda referente ao verde e IVP ao infravermelho próximo.

Podemos determinar os volumes parciais do reservatório, como a intersecção de um plano a uma determinada altura da base de uma pirâmide, gerando uma figura geométrica espacial similar à Figura 9, denominada tronco da pirâmide. As áreas $A_{(n+1)}$ e A_n foram obtidas a partir dos valores resultantes do processamento das imagens NDWI, correspondentes à porção “água” da classificação realizada. $H_{(n+1)}$ e H_n são níveis da água obtidos *in situ*.

Figura 9 - Tronco da pirâmide



Fonte: Cardia (2014).

Para obter os volumes parciais entre níveis da água e as suas respectivas áreas encontradas, utilizou-se a Equação 6 de volume do tronco da pirâmide (CARDIA, 2014):

$$v_{n+1} = \frac{(H_{n+1} - H_n)}{3} * (A_{n+1} + A_n + \sqrt{A_{n+1} \cdot A_n}) \quad (6)$$

Onde:

v_{n+1} = Volume entre as áreas A_n e A_{n+1} e os níveis H_n e H_{n+1} ;

H_{n+1} = Cota para imagem coletada com área igual a A_{n+1} ;

H_n = Cota para imagem coletada com área igual A_n ;

Os volumes parciais são acumulados e correlacionados com o respectivo nível da água conforme Equação 7.

$$V_{acumulado_n} = v_n$$

$$V_{acumulado_{n+1}} = V_{acumulado_n} + v_{n+1} \quad (7)$$

$$V_{acumulado_{n+2}} = V_{acumulado_{n+1}} + v_{n+2}$$

Para o volume referente à cota mínima com imagem disponível (411,24 m) foi utilizado o valor de volume fornecido pela curva de campo. O artifício foi utilizado em virtude da incerteza em extrapolar a curva gerada para o volume nulo. Como não há a informação de nível para esse valor, foi adotada a informação de volume fornecida pela curva como ponto de partida.

A melhor correlação obtida entre as cotas e volumes gerados é uma equação polinomial de terceiro grau conforme Equação 8.

$$v = a \cdot x^3 - bx^2 + cx - d \quad (8)$$

Onde a, b, c e d são parâmetros da equação, v são os volumes, e x os níveis das réguas.

Foi também utilizado como ferramenta de validação dos dados o teste de significância *t-student* com dados pareados para igualdade dos volumes calculados do reservatório com a metodologia alternativa proposta em comparação com a metodologia convencional empregando as técnicas de batimetria e topografia em campo.

Os valores resultantes das medições de volumes foram considerados pareados porque nesse cenário a mesma variável (volume), na mesma cota (nível da superfície livre da água) e mesmo local, foi aferida por duas tecnologias distintas. A Equação 9 representa o cálculo estatístico do teste t (BARBETTA, 2002)

$$t_{calc} = \frac{\bar{D} \cdot \sqrt{n}}{S_D} \quad (9)$$

Em que:

\bar{D} =Média das diferenças observadas entre os dados pareados, n = tamanho da amostra ou número de pares observados, S_D = Desvio padrão das diferenças observadas. O grau de liberdade (gl) da amostra é o tamanho da amostra subtraído do valor unitário e o p-valor representa a probabilidade de significância do teste. O nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha=0,05$). O t_{calc} foi comparado com o valor tabelado para o nível de significância selecionado.

3.4 ALTIMETRIA POR SATÉLITE

Uma projeção da órbita de um satélite altimétrico sobre um determinado espelho d'água (rios, lagos, reservatórios) permite determinar uma estação virtual (EV), com a possibilidade de obtenção de série temporal da altura do nível da água (SANTOS DA SILVA *et al.*, 2010). O cruzamento dos traços dos satélites sobre um lago, rio ou reservatório é uma oportunidade de validar a qualidade do dado altimétrico.

A partir das medidas dos altímetros em determinado ponto estabelecido, é possível montar uma série de dados altimétricos a partir de satélites, tendo como principal limitação a resolução temporal do satélite. No caso do ENVISAT, por exemplo, a revisita acontece a cada 35 dias.

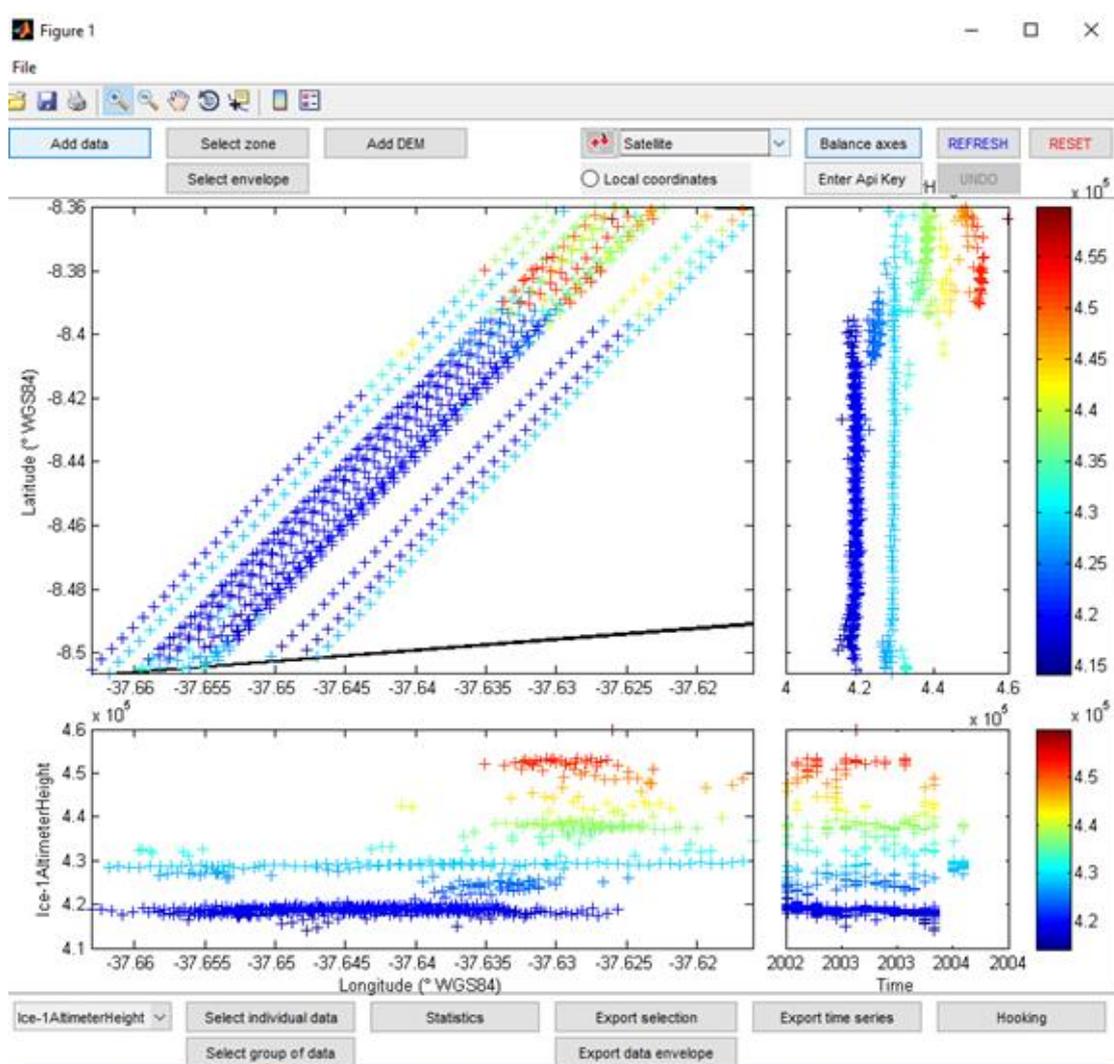
As séries temporais são geradas por meio da seleção da informação referente aos dados altimétricos adquiridos pelo satélite, dentro da resolução temporal dele. Escolhe-se o traço do satélite que permita cobrir a área de interesse e que se pode correlacionar com os dados da estação *in situ*.

No presente trabalho, foi preciso, inicialmente, delimitar a área de interesse para estabelecer a série da estação virtual, através de um polígono construído com o uso do Google Earth (2018). Para analisar e permitir selecionar os dados que determinassem os níveis de água do reservatório, foi usado o *software Multimission Altimetry Processing* (MAPS) (Frappart *et al.*, 2012), que possui ferramentas para

leitura de informações de diferentes missões altimétricas e para realizar análise de parâmetros contidos nos arquivos específicos para cada satélite. Em seguida, identificam-se os dados que se referem ao nível da água. Para isso, toma-se a mediana dos pontos selecionados e identificados como pontos na água, que representam estatisticamente o nível da água em cada ciclo do satélite. O MAPS possibilita uma representação espacial das alturas altimétricas (FRAPPART *et al.*, 2012).

Na Figura 10, é possível visualizar a tela inicial do MAPS com traços do satélite ENVISAT na área de interesse do açude Poço da Cruz.

Figura 10 - Tracks do ENVISAT sobre a área de estudo



Fonte: MAPS (2018)

Para determinar a altitude dos níveis de água nas diferentes datas, foram adotadas as seguintes medidas:

1 - Delimitação da área do reservatório, utilizando um mosaico de imagem do Google Earth (2018), através das coordenadas máximas e mínimas, determinado a localização da Estação Virtual (EV);

2 - Os satélites realizam suas trajetórias em torno do globo terrestre em ciclos, onde revisitam determinadas regiões em intervalos fixos de tempo. Cada ciclo possui conjunto de “traços” (*ground-track*) que são identificados por números e se referem à projeção de meia órbita do satélite no solo, entre a latitude mais ao norte e a latitude mais ao sul da trajetória. Cada revolução do satélite ao redor da Terra corresponde a dois traços. Para cada satélite, o espaçamento entre passagens é diferente. Cada satélite também possui diferentes altitudes e inclinações de órbita (COSTI, 2012). Para identificar os satélites que poderiam ser utilizados no presente estudo, com trajetórias que cobrissem a região do lago do açude Poço da Cruz, foi realizada consulta no endereço eletrônico: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/tools/pass-locator.html> (Figura 11), onde é possível visualizar trajetórias dos satélites altimétricos Jason 1, 2 e 3; Topex/Poseidon; Sentinel 3; Cryosat 2; Saral; ERS-2 e ENVISAT e realizar download das mesmas em formato .kmz.

3 - A partir da identificação dos satélites ENVISAT, SARAL e Sentinel – 3A e seus respectivos trajetos sobre a área de interesse, realizou-se pesquisa no endereço <http://odes.altimetry.cnes.fr>, para download dos arquivos.netcdf, que contêm as informações geradas pelos sensores altimétricos e que podem ser lidas pelo MAPS. Foi utilizado o algoritmo lce-1 para cálculo da altitude elipsoidal do nível da água do reservatório. No trabalho foi analisado um total de 70 ciclos do ENVISAT, 25 ciclos do SARAL e 18 do Sentinel - 3A. Os tracks utilizados para cada satélite são: ENVISAT 648; SARAL 648 e Sentinel – 3A 560.

Figura 11 - Tela do site AVISO com informações de trajetórias de satélites.

AVISO+ DATA TOOLS PASS LOCATOR

PASS LOCATOR

Use Google Earth to check a pass number for:

- Referenced orbit: Jason-3, Jason-2 (2008-Oct.2016), Jason-1 (before February 2009), Topex/Poseidon (before August 2002),
- Sentinel-3 (ESA delivered the kml file with S3 ground-track points with a time step of 10 seconds, please refer to ESA's website),
- Cryosat-2 (entire cycle)
- Saral (before July 4th 2016 : orbit change), ERS1 (35 days phase), ERS-2 and Envisat (before October 22th 2010: orbit change),
- Envisat new orbit (theoretical tracks extension phase - beyond November 2010, not strictly repetitive),
- Interlaced orbit: Jason-2 (after Oct. 2016), Jason-1 (after february 2009) and Topex/Poseidon (after September 2002) ,
- GFO

(.kmz files)

Summary: Topex/Poseidon was launched on 1992 on a referenced orbit which was assumed by Jason-1 (on December 2001) and OSTIM Jason-2 (on June 2008)

Jason-1 track coverage and track number with Google Earth

Discover
Customize products step by step AVISO+.

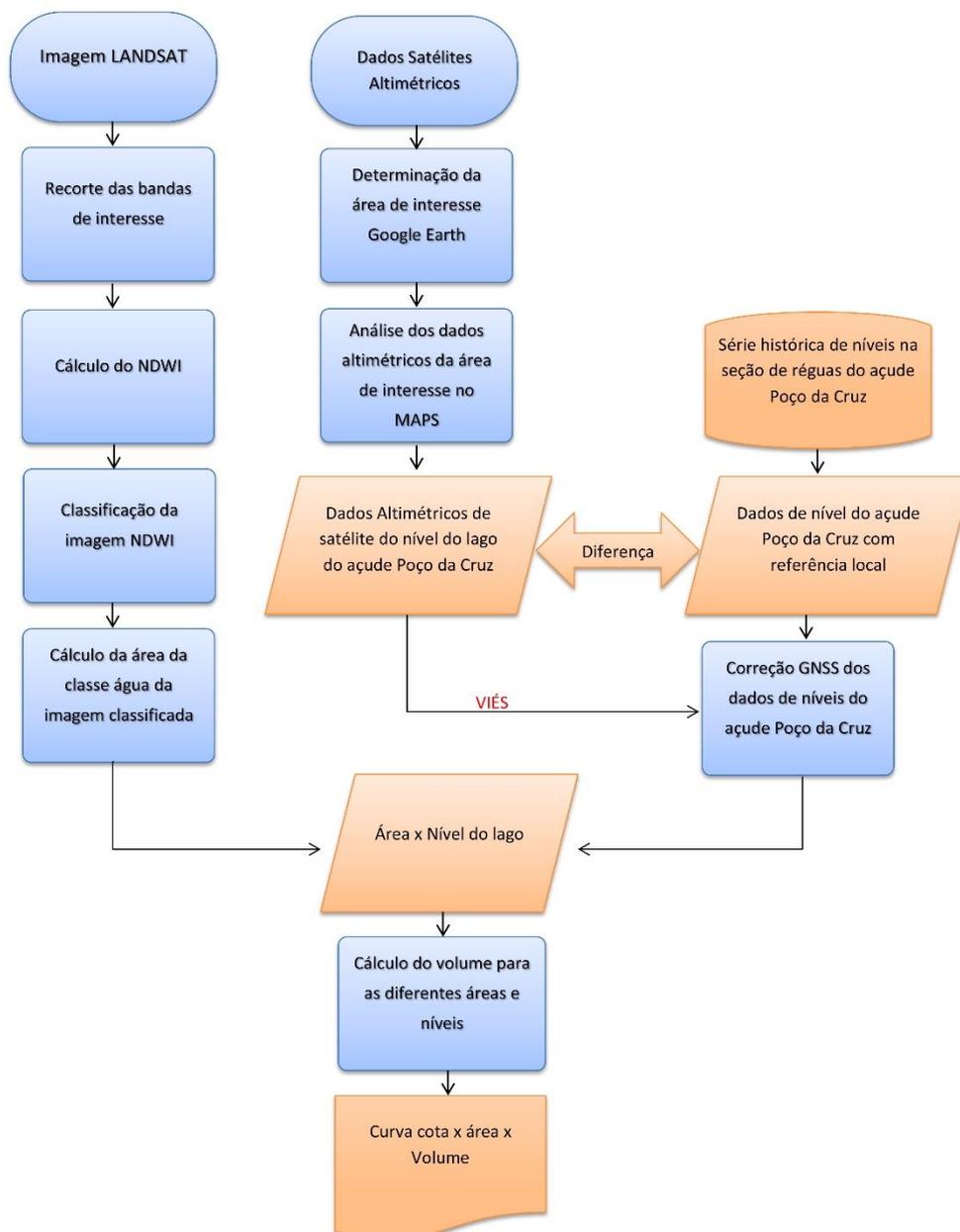
Fonte: AVISO (2018).

4 - Os dados selecionados nas etapas 1 e 3 foram utilizados no MAPS, onde é possível visualizar o perfil altimétrico com uso do algoritmo Ice-1. Devem ser definidos parâmetros, como o σ_0 , que fornece informação da intensidade do sinal refletido, que tende a ter maiores valores em superfícies com água. As informações dos pontos selecionados são exportadas em formato .csv.

5 – Para controle altimétrico dos dados da Estação Virtual, é necessário estudo dos referenciais que constituem a base de cálculo dos desníveis das medidas. As réguas linimétricas instaladas no reservatório não estão na mesma referência dos dados altimétricos dos satélites, sendo necessário estabelecer uma base comum para conexão e articulação entre os dados fornecidos por satélite e os fornecidos por leituras de réguas (MOREIRA, 2010). Para conseguir levar os níveis das réguas para a mesma referência utilizada pelos satélites, foi realizado levantamento em campo, com uso de GPS GNSS, da Referência de Nível (RN) da seção de réguas do reservatório e pós-processamento dos dados coletados pelo Processamento por Ponto Preciso (PPP), serviço *online* para pós-processamento de dados GNSS – IBGE-PPP. Após processamento dos dados do receptor GNSS e comparação com a referência de nível local, foi determinado o valor de -7,29 m para as correções para o mesmo referencial dos satélites.

A figura 12 apresenta um fluxograma da metodologia empregada.

Figura 12 - Fluxograma da metodologia

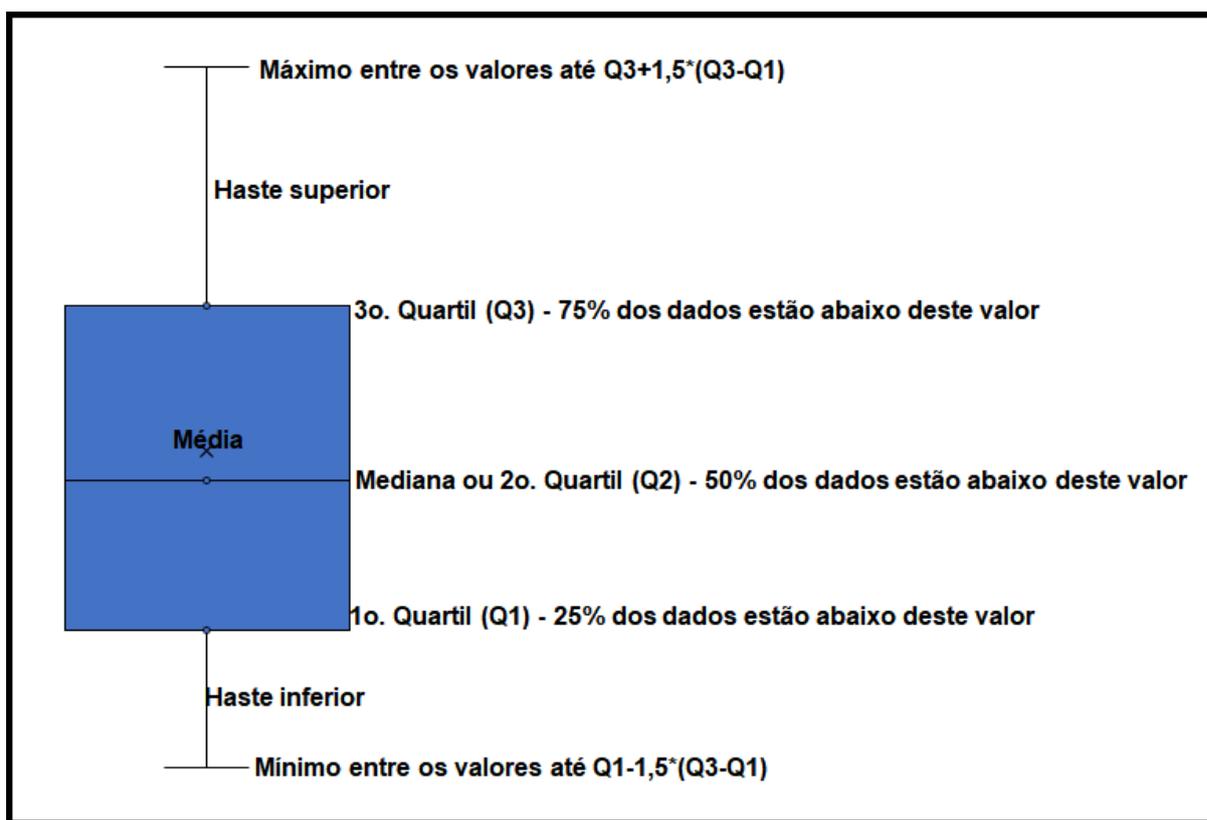


Fonte: O Autor (2019).

3.4.1 Análise de outliers

Foi realizada análise estatística para verificar *outliers* nas diferenças entre os dados altimétricos conseguidos pelos dados de satélites e os níveis de régua linimétricas corrigidas pelo GPS. Foi utilizado o diagrama *boxplot*, que consiste em um gráfico constituído de um retângulo definido pelo primeiro e terceiro quartil, contendo a mediana em seu interior. A partir do lado superior do retângulo, traça-se uma linha até o ponto que não exceda o valor do 3º quartil mais 1,5 vezes um quartil ($Q_3+1,5Q$) e para o limite inferior um valor que não exceda ($Q_1+1,5Q$) conforme Figura 13 (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Figura 13 - Diagrama BoxPlot.



Fonte: Valladares, et. al. (2017).

3.4.2 Análise dos desvios dos dados altimétricos

A validação de um resultado altimétrico é realizada pela comparação com medidas diárias dos níveis locais obtidos a partir de uma régua instalada próximo à passagem do satélite (BIRKETT et. al., 2002).

Usualmente, para realizar as comparações entre as medidas *in situ* e as medidas dos altímetros, é utilizada a medida estatística RMSE (*root mean square error* ou raiz do erro médio quadrático). Pode ser entendida como o desvio padrão das diferenças entre os níveis altimétricos e os níveis *in situ* (Equação 10).

$$RMS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{n} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Com n igual ao número de medidas, $H_{1,i}$ são as estimativas altimétricas e $H_{2,i}$ são as medidas linimétricas.

Muitos fatores podem influenciar as correlações entre os níveis *in situ* com os níveis dos satélites (BIRKETT et al., 2002). A medida da régua é coletada em um local geográfico fixo, enquanto os valores de alturas do altímetro representam uma média da topografia para as medidas realizadas para área determinada para a estação virtual. A precisão do altímetro é baseada no processo de cálculo de médias sobre uma escala geográfica.

A caracterização da qualidade dos resultados obtidos é realizada pela associação de uma dispersão à mediana. Essa dispersão foi calculada pelo desvio médio absoluto da mediana – DAM (Equação 11), aplicada com dados de níveis da água obtidos a partir de satélites. Para evitar o problema de estimativas em amostras pequenas, chamado tendenciosidade, costuma-se usar uma correção para o desvio em que o denominador N é substituído por N-1.

$$DAM = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n [h_i - h_{med}] \quad (11)$$

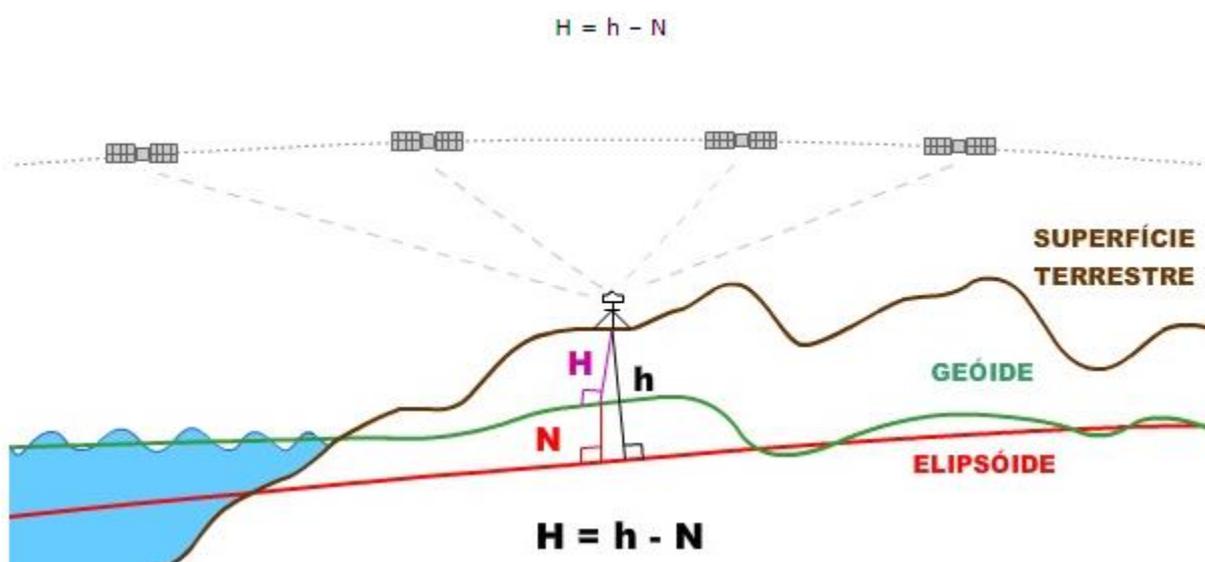
Onde, n é o número de observações, h_i é a *i*ésima observação e h_{med} é a mediana.

No presente estudo, todas as avaliações dos dados de altimetria por satélite foram feitas a partir das informações da série histórica de nível fornecida pela seção de réguas. A qualidade das séries temporais altimétricas do nível da água fornecidas pelos diferentes satélites, após retirada dos *outliers*, foi avaliada computando o DAM e o RMSE para o conjunto de dados.

3.4.3 Altitude ortométrica

Os valores dos níveis foram comparados com os das réguas corrigidos pelo levantamento GNSS. A altitude determinada pelo receptor GNSS não está relacionada ao nível médio do mar (forma geóide), mas a um elipsoide de referência com dimensões específicas. É necessário conhecer a diferença entre a superfície do geóide e do elipsoide (ondulação geoidal) para obter a altitude em relação ao nível médio do mar (altitude ortométrica). Existem modelos de ondulação geoidal brasileiros cada vez mais precisos para utilização nas áreas de cartografia e engenharia. O modelo utilizado neste trabalho para correção da altitude ortométrica foi o MAPGEO 2015 (IBGE, 2015). A Figura 14 mostra um desenho esquemático para entendimento do modelo Geoidal.

Figura 14 - Modelo Geoidal



Fonte: IBGE (2015).

Onde:

H = Altitude ortométrica;

h = Altitude elipsoidal;

N = Altura geoidal

O valor encontrado de ondulação geoidal pelo MAPGEO 2015 para área da seção de régua de leituras de nível do reservatório foi de -8,16 m, enquanto o processamento de campo realizado pela empresa VisãoGeo foi igual a -8,19 m. A Figura 15 apresenta a RN 2 com a referência local para nivelamento das régua.

Figura 15 - Referência de nível da estação de régua do açude Poço da Cruz



Fonte: VisãoGeo (2017).

4 RESULTADOS

A geração da área a partir das imagens captadas pelos satélites LANDSAT5 e LANDSAT8 foi avaliada a partir das informações fornecidas pela curva CAV disponibilizada pela ANA. Um dos problemas encontrados foi a falta de dados de nível entre as cotas 425 cm e 430 cm com imagens da série LANDSAT (5, 7 e 8) que pudessem ser correlacionadas.

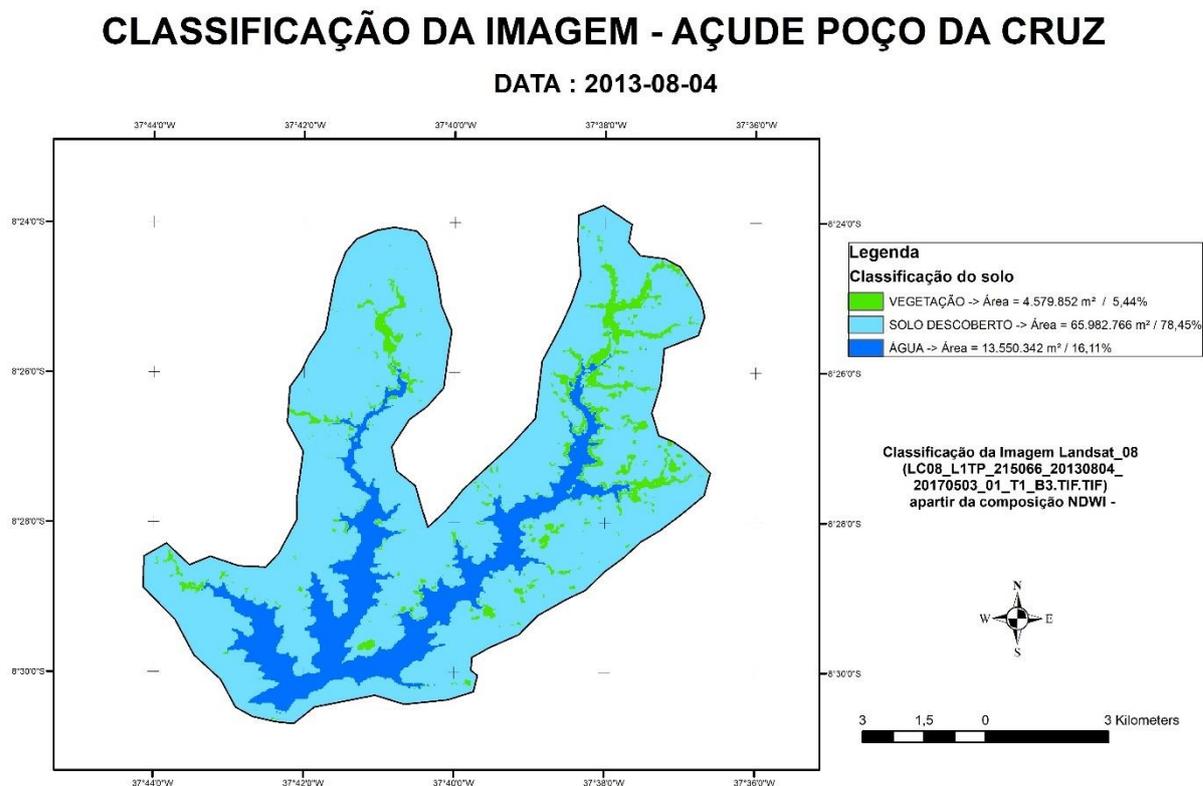
Os dados altimétricos apresentaram uma boa correlação com a série histórica de níveis fornecidos pela APAC, contudo a série histórica apresenta muitas falhas em determinados períodos, o que dificultou um pouco as comparações. Isso mostra também que o desenvolvimento da altimetria por satélite pode auxiliar a preencher falhas nas séries de nível.

4.1 ESTIMATIVA DAS ÁREAS E VOLUMES

A validação das áreas obtidas pelas imagens em relação às áreas levantadas a partir das curvas geradas no levantamento de campo apresenta maiores diferenças até o nível de água de 414,82 m, tendendo a diminuir as diferenças para os níveis mais elevados. Os cálculos dos volumes são obtidos a partir das informações das áreas e dos níveis dos reservatórios, portanto, essas duas informações devem ser confiáveis. A Tabela 7 apresenta as diferenças percentuais entre as áreas da curva do levantamento de campo e as obtidas pelo processamento das imagens LANDSAT com o QGIS.

Os valores de NDWI variam de -1 para 1, em que valores maiores que zero são considerados “água” e NDWI menor que zero é considerado “não água”. A Figura 16 mostra a imagem classificada a partir do NDWI resultante da operação com bandas do satélite LANDSAT 8 para a cena do dia 04/08/2013.

Figura 16 - Imagem do Landsat 8



Fonte: O Autor (2019).

- Imagem obtida em 04/08/2013, classificada a partir do NDWI

Para realizar essa operação matemática nos satélites LANDSAT 5 e LANDSAT 8, são utilizadas as seguintes bandas conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Bandas para cálculo do NDWI.

Satélite	Resposta Espectral	Bandas
LANDSAT 05 TM	Verde (V)	2
	Infravermelho Próximo (IVP)	4
LANDSAT 08 OLI	Verde (V)	3
	Infravermelho Próximo (IVP)	5

Fonte: O autor (2019).

Foram realizadas as operações para cenas de diversas datas com níveis diferentes do reservatório, separando “água” e “não água” e realizando o cálculo da

área para as faixas de água. Posteriormente, foram correlacionadas as informações das áreas calculadas com os níveis para as datas das imagens.

Com as áreas calculadas com uso do *software* QGIS e informações de níveis para as áreas, foi possível determinar os volumes parciais entre áreas contíguas. A Tabela 6 mostra os valores da área processada pela imagem e o nível correspondente.

Tabela 6 - Níveis das réguas e áreas das imagens

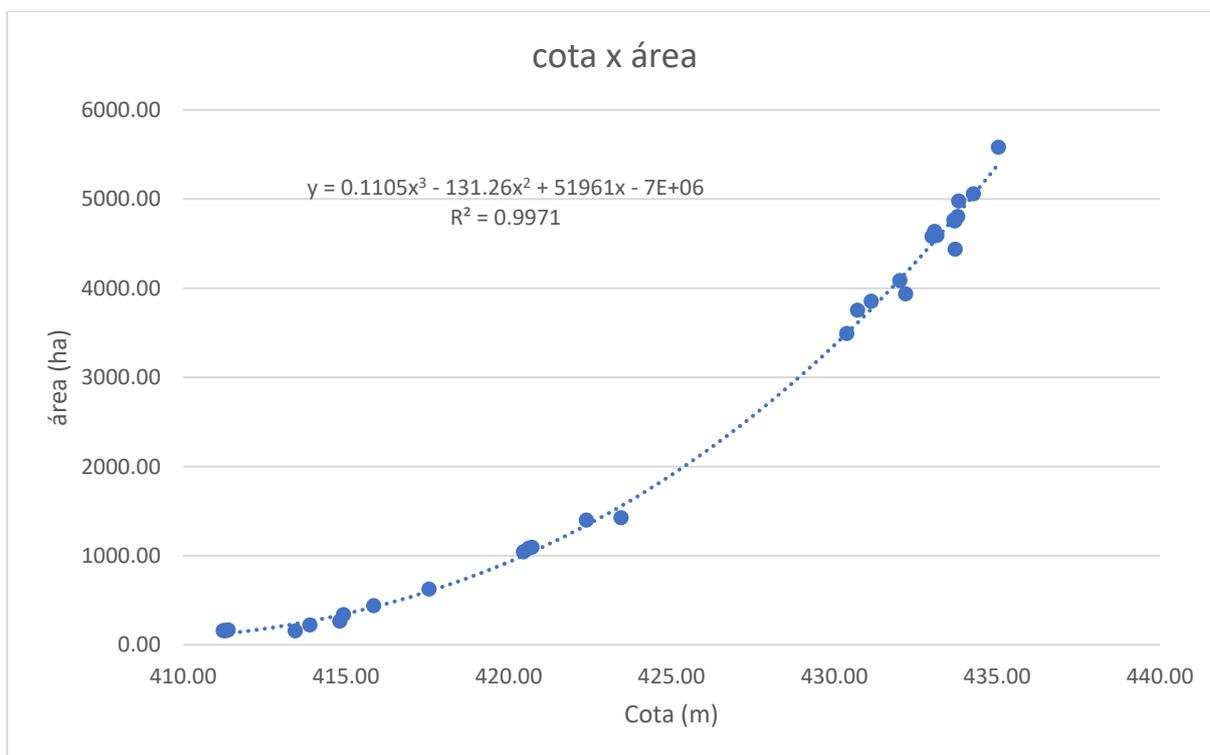
Data da altimetria	Sensor	Nível da Régua (m)	Área imagem (m²)
05/12/2017	L08OLI	411,24	1.584.000,00
12/06/2017	L08OLI	411,30	1.543.500,00
19/11/2017	L08OLI	411,39	1.656.000,00
04/02/2017	L08OLI	413,45	1.533.600,00
15/08/2017	L08OLI	413,90	2.208.600,00
12/08/2016	L08OLI	414,82	2.639.700,00
01/01/2016	L08OLI	414,93	2.570.400,00
27/09/2015	L08OLI	415,86	4.367.700,00
14/01/2015	L08OLI	417,56	6.226.200,00
11/01/2014	L08OLI	420,46	10.411.200,00
26/12/2013	L08OLI	420,62	10.818.000,00
10/12/2013	L08OLI	420,72	10.927.800,00
04/08/2013	L08OLI	422,39	13.964.400,00
14/04/2013	L08OLI	423,46	14.229.900,00
19/07/2007	L05TM	430,39	34.906.500,00
24/01/2007	L05TM	430,72	37.516.500,00
07/12/2006	L05TM	431,14	38.522.700,00
18/09/2006	L05TM	432,02	40.842.900,00
29/09/2010	L05TM	432,20	39.337.200,00
02/11/2005	L05TM	433,01	45.782.100,00
13/01/2009	L05TM	433,09	46.359.900,00
07/03/2005	L05TM	433,16	45.900.000,00
17/12/2004	L05TM	433,68	47.610.900,00
01/12/2004	L05TM	433,71	47.528.100,00
02/12/2004	L05TM	433,72	44.352.500,00
10/11/2008	L05TM	433,80	48.015.900,00
26/05/2005	L05TM	433,83	49.765.500,00
23/03/2008	L05TM	434,28	50.575.500,00
20/03/2004	L05TM	435,05	55.793.700,00

Fonte: O autor (2019).

Os volumes para os níveis de água menores tendem a ter diferenças percentuais maiores entre os de campo e os obtidos a partir do processamento das imagens (COLLISCHONN; CLARKE, 2016).

A partir da correlação cota x área, o melhor ajuste obtido entre os valores do eixo x (cota) e eixo y (área) foi através de uma equação polinomial de terceiro grau conforme visualizado na Figura 17.

Figura 17 – Correlação cota x área



Fonte: O Autor (2019).

A tabela 7 mostras as diferenças percentuais entre os valores de área obtidos dos levantamentos de campo e as áreas calculadas pelas imagens.

Tabela 7 - Diferenças percentuais entre áreas da curva e áreas das imagens

Cota (m)	Área curva (ha)	Área imagem (ha)	Diferença (%)
411,24	134,53	158,40	17,75%
411,30	136,95	154,35	12,71%
411,39	140,77	165,60	17,64%
413,45	283,26	153,36	-45,86%
413,90	317,20	220,86	-30,37%
414,82	393,18	263,97	-32,86%
414,93	402,60	336,60	-16,39%
415,86	489,65	436,77	-10,80%
417,56	666,94	622,62	-6,65%
420,46	1.075,36	1.041,12	-3,18%
420,62	1.101,64	1.081,80	-1,80%
420,72	1.118,21	1.092,78	-2,27%
422,39	1.435,96	1.396,44	-2,75%
423,46	1.676,11	1.422,99	-15,10%
430,39	3.649,50	3.490,65	-4,35%
430,72	3.766,14	3.751,65	-0,38%
431,14	3.919,50	3.852,27	-1,72%
432,02	4.260,07	4.084,29	-4,13%
432,20	4.332,18	3.933,72	-9,20%
433,01	4.678,08	4.578,21	-2,13%
433,09	4.713,32	4.635,99	-1,64%
433,16	4.744,59	4.590,00	-3,26%
433,68	4.979,71	4.761,09	-4,39%
433,71	4.993,53	4.752,81	-4,82%
433,72	4.951,96	4.435,25	-10,43%
433,80	5.035,25	4.801,59	-4,64%
433,83	5.049,19	4.976,55	-1,44%
434,28	5.263,25	5.057,55	-3,91%
435,05	5.633,58	5.579,37	-0,96%

Fonte: O Autor (2019).

Observa-se na Tabela 7 alguns valores que, considerando a realidade física da correlação cota x área, ou seja, os valores de área aumentam com a subida do nível, estes podem ser suprimidos para obtenção da curva cota x área. Foi realizado teste com a retirada desses valores e não houve ganho significativo para os cálculos dos volumes finais. A diferença percentual entre o volume obtido a partir das imagens, comparado com o volume da curva de campo para a cota de 435,05 m, diminuiu de -5,5% para -5,0%. Como não há certeza sobre se as áreas relacionadas são realmente

distorcidas em relação à situação real, optou-se por mantê-las para os cálculos de volumes.

A partir da Equação 6 foram determinados os volumes parciais entre os níveis das réguas e as áreas das imagens e posteriormente acumulados esses volumes, obtendo os volumes totais. A Tabela 8 mostra os valores de volume correlacionados com os níveis e comparados com os da curva de campo. Nota-se que os valores encontrados a partir das imagens são menores que os da curva cota x volume levantados em campo, sendo -5,5% a diferença para o maior nível usado no estudo.

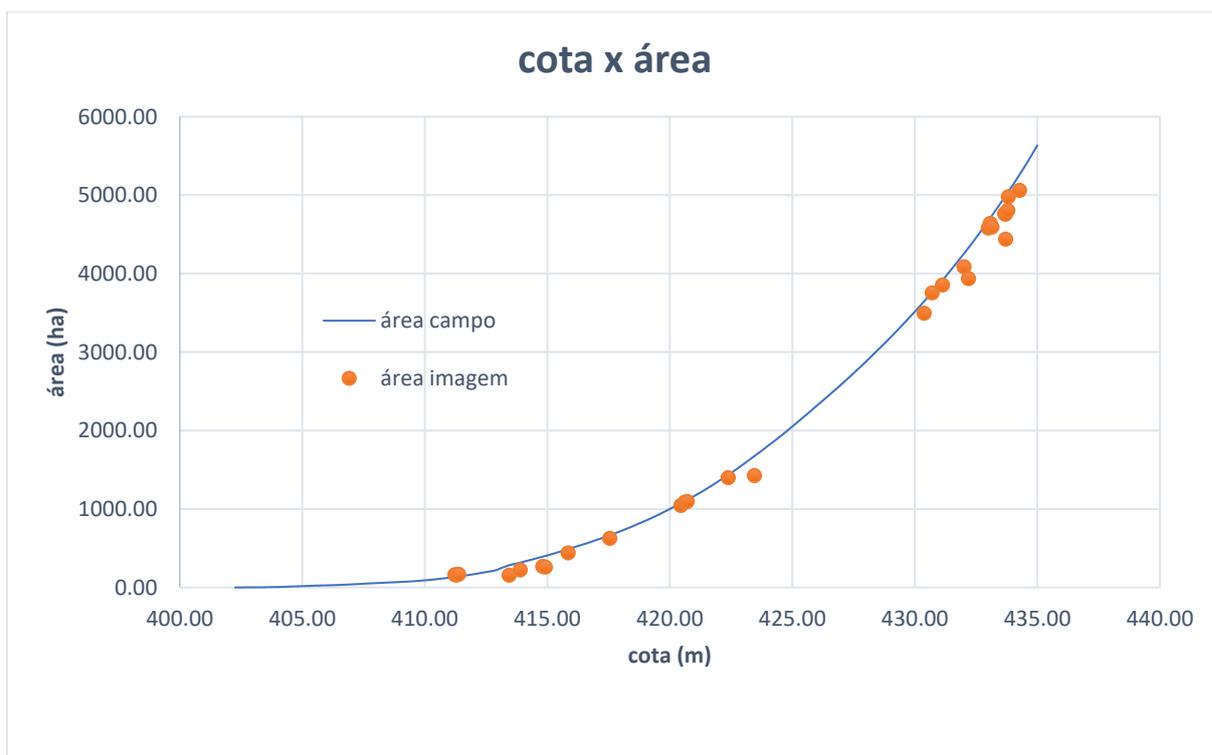
Tabela 8 - Diferenças percentuais Volumes imagens e volumes curva de campo

Cota (m)	Volume curva (hm³)	Volume imagem (hm³)	Diferença (%)
411,24	3,95	3,95	0,0%
411,30	4,03	4,05	0,3%
411,39	4,16	4,19	0,8%
413,45	8,23	7,48	-9,2%
413,90	9,58	8,31	-13,2%
414,82	12,85	10,54	-17,9%
414,93	13,28	10,87	-18,2%
415,86	17,42	14,46	-17,0%
417,56	27,20	23,41	-13,9%
420,46	52,07	47,28	-9,2%
420,62	53,81	48,98	-9,0%
420,72	54,92	50,07	-8,8%
422,39	76,15	70,80	-7,0%
423,46	92,78	85,88	-7,4%
430,39	272,81	250,87	-8,0%
430,72	285,04	262,82	-7,8%
431,14	301,18	278,79	-7,4%
432,02	337,16	313,70	-7,0%
432,20	344,89	320,92	-7,0%
433,01	381,36	355,36	-6,8%
433,09	385,12	359,04	-6,8%
433,16	388,43	362,27	-6,7%
433,68	413,71	386,58	-6,6%
433,71	415,21	388,01	-6,6%
433,72	415,71	388,47	-6,6%
433,80	419,72	392,16	-6,6%
433,83	421,23	393,63	-6,6%
434,28	444,43	416,21	-6,4%
435,05	483,64	457,14	-5,5%

Fonte: O Autor (2019).

Na Figura 18, apresenta-se a curva cota área de campo, com os valores de áreas, obtidos pelo processamento das imagens dos satélites Landsat, plotados no gráfico. Observa-se que para as maiores áreas, existe um afastamento mais significativo entre os dados de campo e os obtidos pelas imagens.

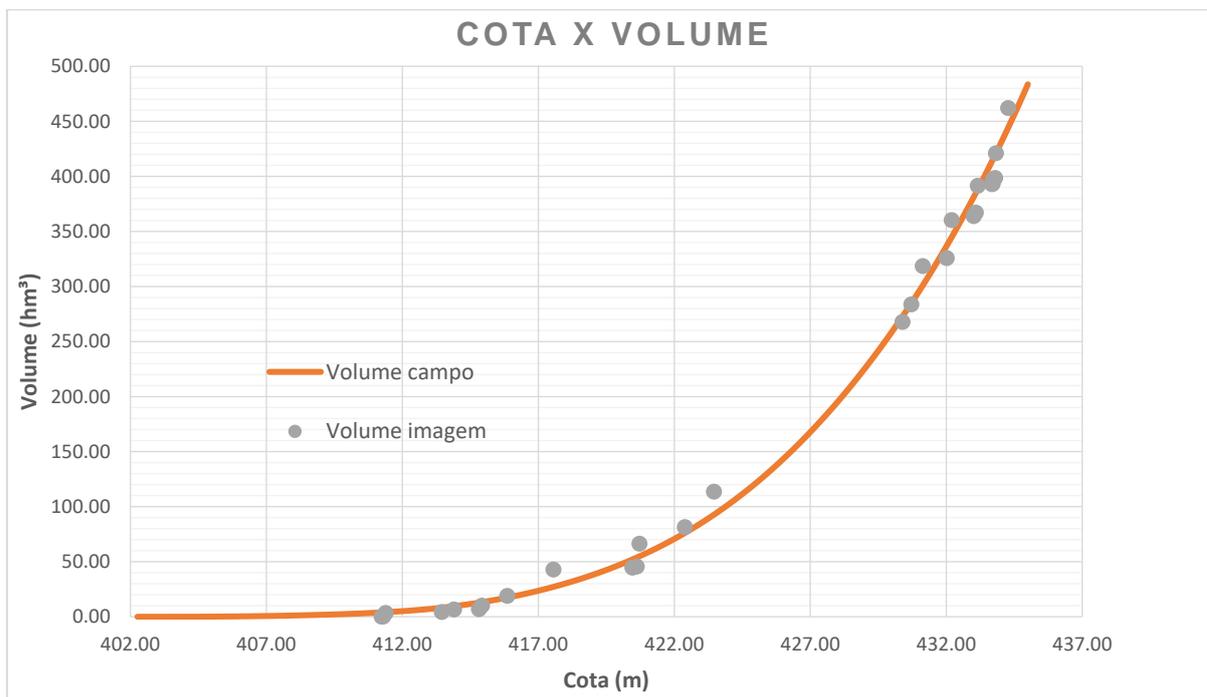
Figura 18 - Cota x área



Fonte: O Autor (2019).

A figura 19 apresenta a relação cota x volume, com os pontos de valores de volumes processados pela metodologia do trabalho, plotados no gráfico, verifica-se que existe um bom ajuste dos valores de volumes obtidos a partir das imagens com a curva de campo.

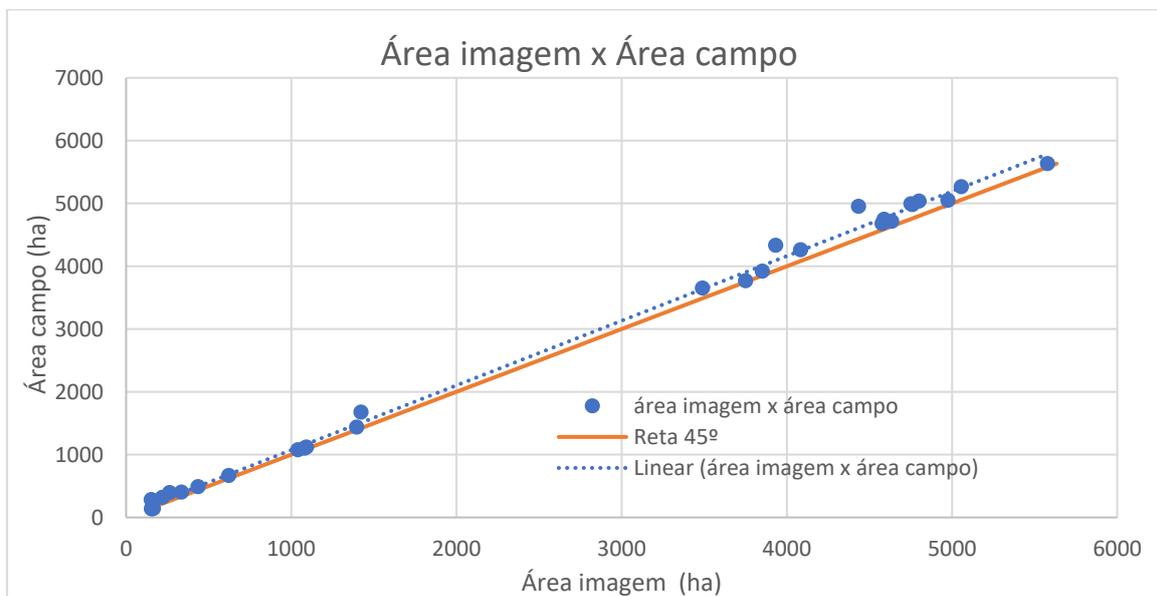
Figura 19 - Cota x volume



Fonte: O Autor (2019).

A figura 20 representa o gráfico das áreas obtidas pelas imagens versus as áreas de campo, onde no eixo X estão lotados os valores de área das imagens e no eixo Y as áreas de levantamento de campo. Observamos que na porção inferior da reta, existe um melhor ajuste. Na figura, também se visualiza a falta de informações entre áreas de 1.422 ha e 3.490 ha, a falta de dados no intervalo pode ter interferido para um melhor ajuste da curva para os valores superiores de volumes.

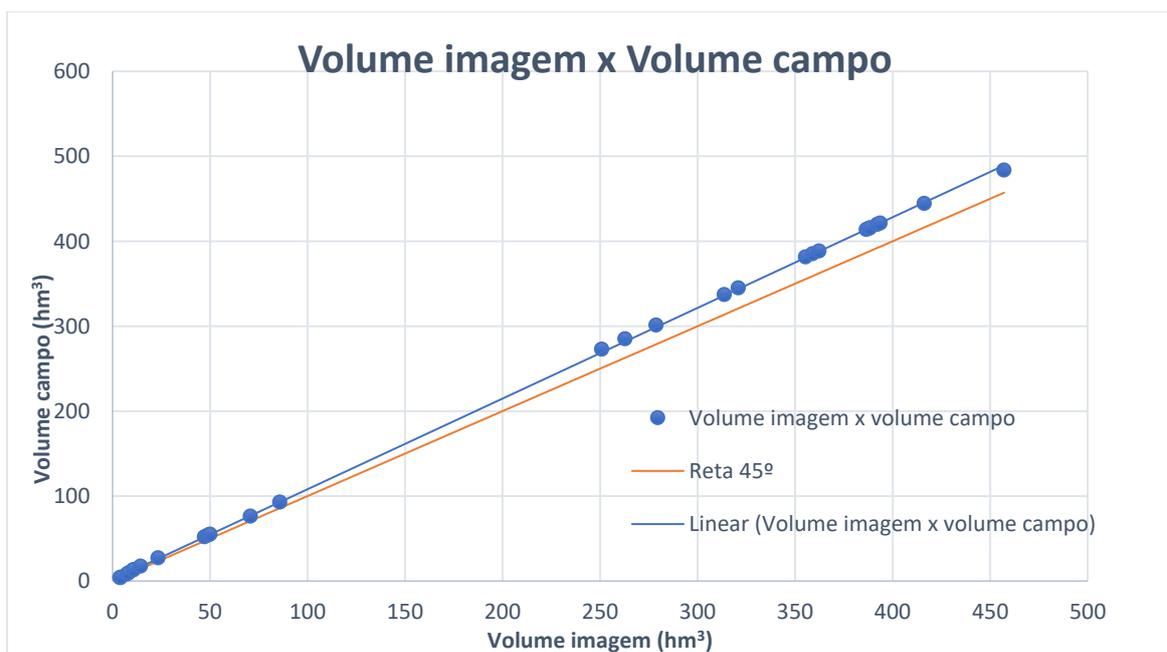
Figura 20 - Área imagem x área campo



Fonte: O Autor (2019).

Na figura 21 verifica-se a correlação existente entre os volumes obtidos pela metodologia adotada neste trabalho e os volumes de campo. Para os maiores valores de volume, os valores de correlação ficam acima da reta de 45 graus. Os volumes obtidos a partir das imagens são menores, comparados com os de levantamentos realizados em campo.

Figura 21 - Volume imagem x volume campo.



Fonte: O Autor (2019).

Como informado na metodologia, foi realizado também um teste de significância para verificar o nível de correlação entre as amostras de campo e as amostras obtidas por sensoriamento remoto.

O resultado do teste t mostrou que, pelo nível de significância adotado de 5%, não existe diferença significativa entre as amostras analisadas, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultado do teste t-student para o nível de significância de 5% aplicado aos volumes

Parâmetros estatísticos do teste t pareado para os volumes								
Hipótese nula (H0)		Volumes calculados = Volumes medidos						
Hipótese alternativa (H1)		Volumes calculados \neq Volumes medidos						
\bar{D} (m ³)	S _D (m ³)	n	gl	t-calc	α	p-valor	2*(p-valor) < α	Decisão
2.400.076,71	12.544.928,15	28	27	1,012	0,05	0,16	NÃO	H0 é aceita

Fonte: O Autor (2019).

A estatística do teste (t-calc=1,012) forneceu um valor de probabilidade de significância (p-valor=0,160) muito superior ao nível de significância selecionado (0,05) indicando que a hipótese nula não deve ser rejeitada. A probabilidade de significância do teste t pareado (0,160) foi pelo menos 3 vezes superior ao nível de significância ($\alpha=0,05$) adotado, indicando uma probabilidade muito pequena, na amostra selecionada de 28 elementos, de que haja diferença significativa entre os volumes calculados pela metodologia convencional e a metodologia alternativa proposta.

Os ajustes dos pontos de áreas e volumes gerados a partir das imagens LANDSAT ajustaram-se bem às curvas cota x área e cota x volume de campo.

4.2 ELEVAÇÃO DA ÁGUA COM SATÉLITE ALTIMÉTRICO

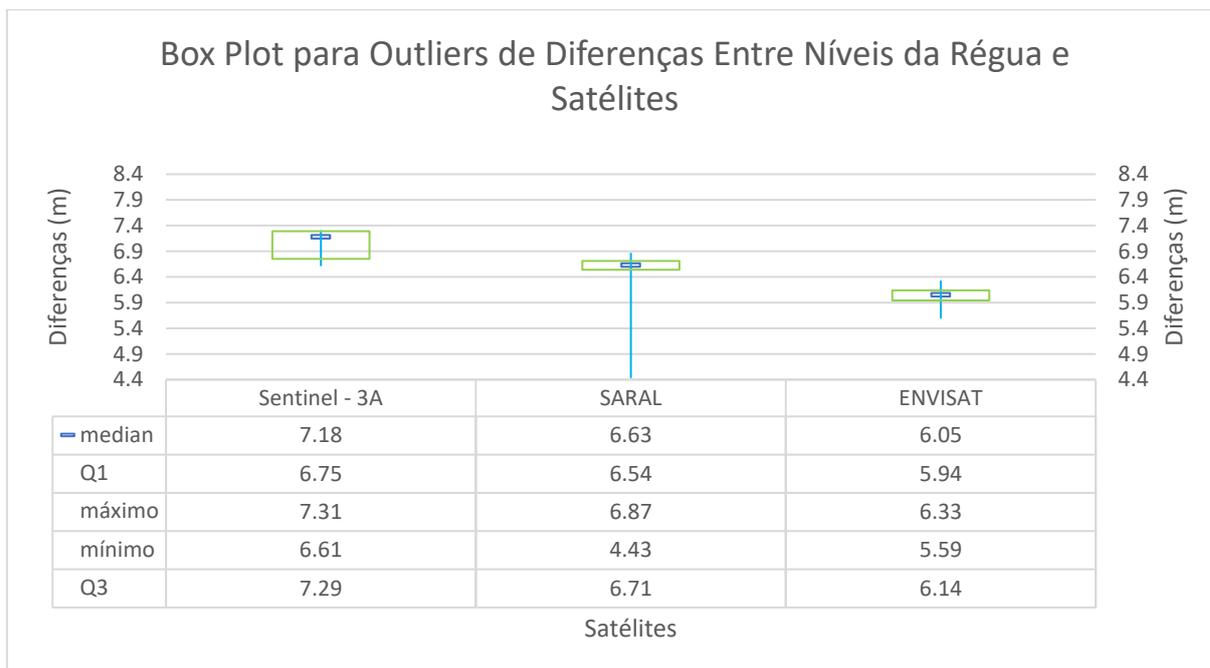
A análise descrita nesta seção refere-se à comparação dos dados de nível obtidos na seção de régua instalada no reservatório, sem a correção do delta obtido com o levantamento do GPS GNSS e os níveis altimétricos obtidos com os satélites. Verificou-se que as diferenças entre as medidas obtidas pelas régua e as conseguidas a partir dos radares altimétricos permanecem próximas de uma média, e apenas algumas medidas ficaram afastadas (*outliers*), o que pode ser devido a erros durante a etapa de determinação dos pontos que identificam o nível de água na análise efetuada no MAPS, *tracks* fora da área lago, dentre outros problemas. No caso do SARAL, por exemplo, notou-se que algumas medidas estavam incoerentes, provavelmente, porque não eram medidas relativas ao nível da água do reservatório. A construção de um gráfico *box plot* permitiu uma análise estatística buscando eliminar esses *outliers* da série.

Após análise de *outliers*, foram eliminadas quatro altitudes altimétricas geradas a partir do Sentinel – 3A. Para o SARAL foram retiradas da série dois níveis de altimetria processados com o MAPS, para as datas 06/03/2015 e 11/12/2015, que pelo valor elevado em relação à média das diferenças obtidas para as outras datas ficaram fora dos cálculos. O ENVISAT apresentou a série mais extensa e coerente com os níveis obtidos pelas régua. Todos os 70 valores da série ficaram dentro dos limites estabelecidos.

Vale salientar que para o Sentinel-3A as nove medidas iniciais da série altimétrica apresentaram uma boa correlação com os níveis medidos *in situ*. Posteriormente as medidas ficaram com desvios maiores em relação às régua devido ao rebaixamento do nível. Como a série de dados é relativamente pequena, sugere-se continuar o estudo para verificar o uso dos dados altimétricos do Sentinel-3A para a região.

A Figura 22 mostra o gráfico *box plot* construído para verificação de *outliers* das diferenças obtidas entre as séries altimétricas geradas a partir dos radares altimétricos dos três satélites usados no presente estudo e os dados *in situ*.

Figura 22- Box plot para as séries altimétricas ENVISAT, SARAL e Sentinel-3A



Fonte: O Autor (2019).

Após a retirada dos *outliers*, foi realizada análise para verificar a precisão das medidas realizadas obtidas pela altimetria por satélite com os valores do DAM e RMSE, ainda sem correções das régua com as informações obtidas do levantamento com GPS GNSS. Na Tabela 10, observam-se os valores de DAM e RMSE para os três satélites usados.

Tabela 10 - Valores do RMSE e DAM para as séries altimétricas dos satélites usados no estudo

Satélite	RMS (m)	DAM (m)
ENVISAT	0,15	1,93
SARAL	0,16	1,54
Sentinel - 3A	0,25	1,71

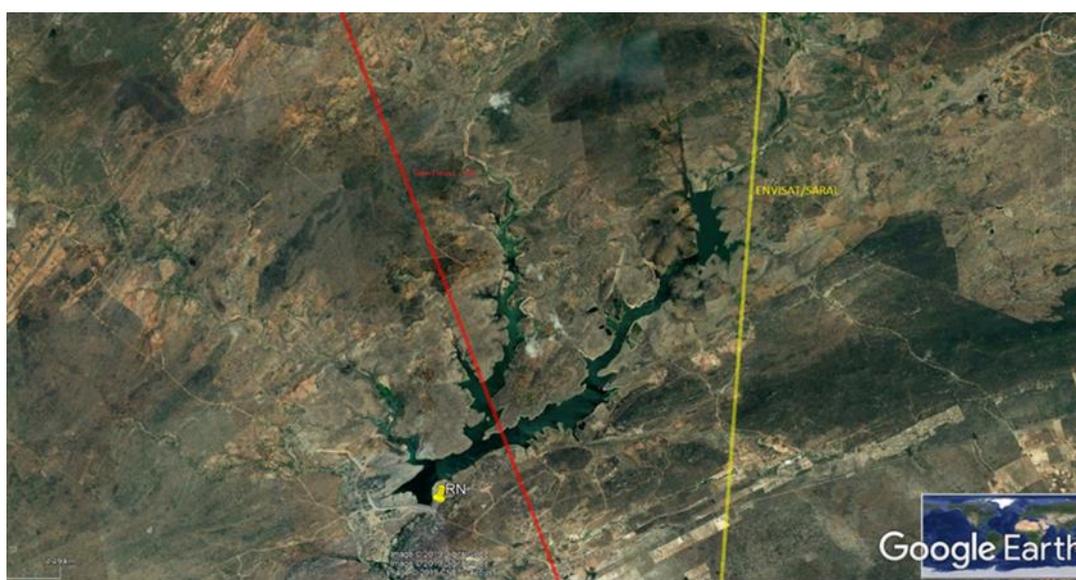
Fonte: O Autor (2019).

No caso estudado, os valores do DAM são relativamente elevados, já que o comportamento da variação do nível para esse reservatório difere de situações em rios, onde a série histórica oscila em torno de um valor médio, diferente da situação analisada, onde o comportamento na maior parte do período levantado é de rebaixamento do nível.

Os dados de altimetria processados no MAPS também foram comparados com os níveis das réguas corrigidas a partir do levantamento GNSS, para identificação das diferenças existentes entre as duas medidas. Para verificar o viés é preciso que as informações fornecidas pela régua estejam na mesma referência do satélite e que a localização da seção linimétrica esteja sob um *track* do satélite ou que se conheça a declividade entre o ponto de medição e a área do trajeto.

Nota-se pela figura 23, que os trajetos do ENVISAT e SARAL estão nas bordas do lago do reservatório. Essa situação afetou as informações de nível do SARAL, que cobriu um período mais seco se comparado ao ENVISAT. Durante a análise de dados para o SARAL, notou-se que as diferenças de medidas entre a régua e o dado altimétrico processado começaram a se distanciar do valor médio esperado com o rebaixamento do nível de água do reservatório.

Figura 23 - Órbitas dos satélites em açude Poço da Cruz



Fonte: Google Earth (2019).

Muitos dos estudos realizados comparando séries de altimetria por satélite com leituras de régua *in situ*, não possuem referências altimétricas comuns, ou seja, não são referenciados a um mesmo *datum*, que impossibilita a detecção do viés existente entre diferentes conjuntos (diferentes missões altimétricas). Contudo os efeitos dos erros sistemáticos não devem ser negligenciados, principalmente quando são utilizados dados de múltiplas missões altimétricas para caracterizar uma mesma região hidrológica (CALMANT et al., 2012). Exemplos de alguns estudos de

comparação de dados de altímetros com informações *in situ* em uma área do lago Issyk-kul na Ásia (CRÉTAUX et al., 2009; 2011) demonstraram a necessidade de calibração dos altímetros para realizar análises rigorosas e validação dos dados altimétricos das diversas missões com aplicação em hidrossistemas continentais. Um exemplo pode ser analisado no estudo que observou que o *Retracking* padrão do altímetro Poseidon-3, embarcado no satélite Jason 2, não apresentou bom desempenho nas proximidades da costa da Califórnia (LEE et al., 2012). Estudos em lagos utilizando o satélite Jason 2 mostraram variações de altura de água com RMSE entre 3 e 33 cm (BIRKETT; BECKLEY, 2010). Outro estudo realizou a comparação e validação de produtos de dados altimétricos de nível de água de 18 lagos e reservatórios para um período de 19 anos (1992 a 2011) com informações dos satélites TOPEX/POSEIDON e Jason 1 e 2. Foram encontrados valores para RMSE, variando entre 0,87 e 0,99 (RICKO et al., 2012). No lago Argyle Eildon (Austrália), com dados dos satélites Jason 2, os valores de RMSE ficaram em 0,28 m (JARIHANI et al., 2013).

Os vieses de altimetria na família TOPEX/Poseidon, Jason 1 e 2 de satélites altimétricos estão sujeitos a uma abundante literatura (SHUM et al., 2003; BONNEFOND et al., 2003, 2010; WATSON et al., 2004, 2011; CHENG et al., 2009; CRÉTAUX et al., 2009, 2011, entre outros). Um ponto importante nesses estudos é que o viés da altimetria pode ser significativamente diferente de uma missão para outra. Roca et al. (2002) e Yi et al. (2003) avaliaram o viés nos dados do Envisat para faixas calculadas com o algoritmo padrão sobre superfícies oceânicas profundas, ou seja, o *retracking* oceânico. Yi et al. (2003), relatam valores significativamente diferentes, variando de 40 a 53 cm, para o viés Envisat encontrado em experimentos separados, em particular sobre os Grandes Lagos. Crétaux et al. (2009) mostraram que ao longo do Lago Issyk-kul há diferentes vieses que tiveram que ser considerados para os diferentes algoritmos de rastreamento propostos nos dados do Envisat. Crétaux et al. (2012) encontraram um viés na faixa de 62,1-63,4 cm para o algoritmo Ice-1 aplicado a dados do Envisat sobre o Lago Issyk-kul.

A informação do viés possibilitaria a extensão de séries temporais de altimetria por satélite, importantes para estudos de mudanças climáticas, incluindo mudanças no nível da água, uma vez que o clima apresenta variações notáveis em toda a escala de tempo. As estimativas do nível de água por mais de duas décadas são importantes para a caracterização climática. A missão de um satélite dificilmente

dura mais de uma década, sendo preciso, portanto, concatenar séries temporais de várias missões, garantindo uma série hidrológica longa. O conhecimento dos vieses em relação a um mesmo referencial permite combinar essas séries.

A referência vertical é uma das principais vantagens na aplicação da altimetria por satélite sobre os rios em comparação às leituras de réguas convencionais. Quando as réguas são niveladas por GPS, suas leituras se transformam em altitudes absolutas da superfície da água e a comparação entre diferentes réguas sobre o mesmo rio fornece a inclinação da superfície da água. A série de altimetria fornece diretamente essas alturas e inclinações absolutas.

CALMANT et al. (2012) aplicaram metodologia apresentada por SANTOS DA SILVA et al. (2010), para séries temporais derivadas da missão Envisat em 87 locais de passagem do satélite sobre rios (estações virtuais). Para obter os valores de altimetria pelo satélite, foi utilizado ao algoritmo Ice-1, obtendo informações de altimetria para os 87 locais de passagem do satélite.

Nos 87 locais foram realizadas cerca de 70 medições em cada local. Entre os 87 locais medidos, 37 possuíam seções de réguas instaladas, que permitiu realizar as comparações. Para realizar o estudo foram utilizadas as alturas ortométricas em vez de alturas elipsoidais. Trabalhar com alturas ortométricas permite explicar a inclinação do rio e realizar correções de declividade entre dois pontos. Assim, todas as alturas de réguas foram niveladas com GPS, para obtenção da altitude elipsoidal. As altitudes obtidas pelo Envisat e as altitudes dos níveis d'água, corrigidas com GPS, foram convertidas em alturas ortométricas por meio do modelo geoide EGM2008 (PAVLIS et al., 2008). O referido trabalho, determinou que alturas Envisat/ICE-1 na Bacia Amazônica devem ser reduzidas em $1,044 \pm 0,212$ m para serem globalmente consistentes com a referência vertical fornecida pelo nivelamento GPS dos níveis *in situ*.

SANTOS et. al. (2015), avaliaram o viés altimétrico do SARAL na Bacia Amazônica para permitir a construção de séries hidrológicas utilizando multimissões e chegaram ao valor de - 25 cm para correção.

No presente estudo, a altimetria obtida com SARAL deve ser reduzida em 0,62 m. Observa-se que é importante levantar a declividade do local do *track* do satélite em relação à seção de régua. Nos dados do Sentinel-3A, deve-se realizar a redução de

0,23 m. Vale salientar que a série analisada para esse satélite é pequena, precisando de um número maior de informação para validação, além disso, considerando apenas os oito primeiros dados altimétricos, o viés fica em 0,01 m. O Envisat apresentou um viés de 1,25 m para redução nos dados altimétricos obtidos.

A Tabela 11 informa a localização da RN instalada na seção linimétrica, o nível com referência local e as altitudes elipsoidal e ortométrica.

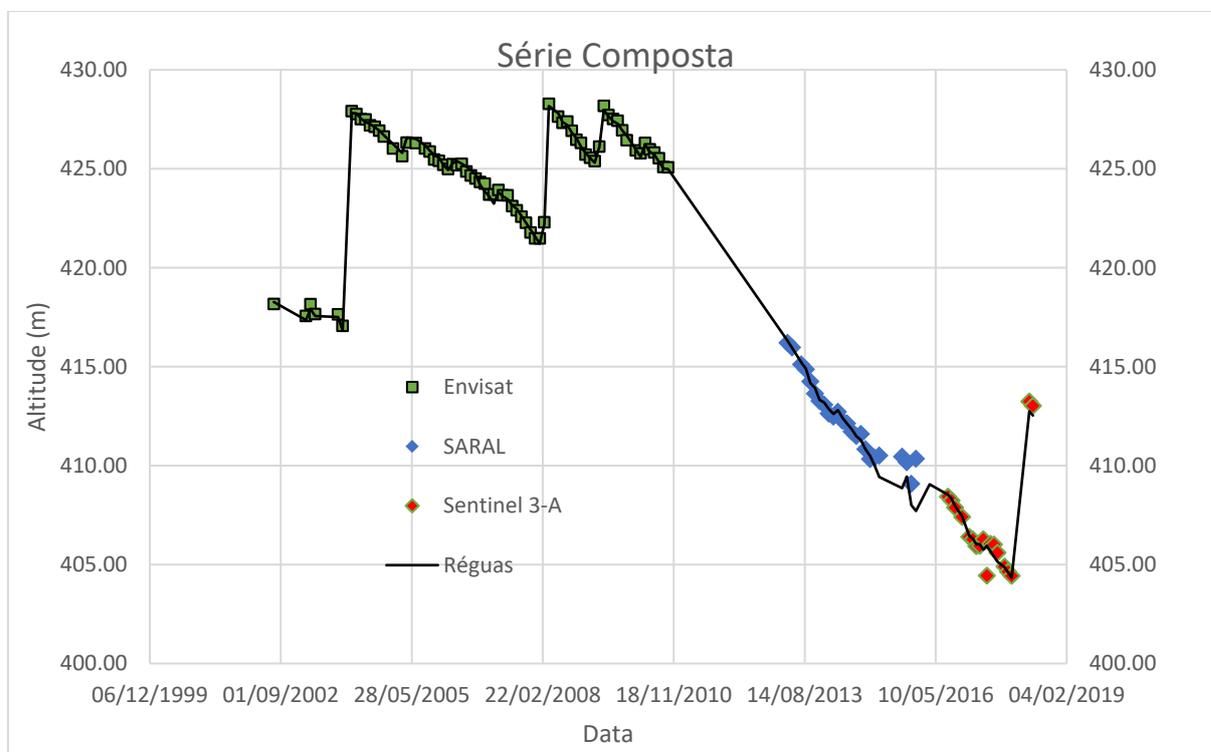
Tabela 11 – Coordenadas do RN local

RN Local	Localização da RN (graus decimais)	Referência Local (m)	Altitude Elipsoidal (m)	Altitude Ortométrica (m)
RN 1	-8,508,888	437,52	430,23	438,39
	-37,703,157			

Fonte: O Autor (2019).

A série de dados de altimetria é mostrada na Figura 24 comparando com a série histórica das réguas. Os valores encontrados tiveram um bom ajuste aos níveis da série histórica das réguas linimétricas instaladas no reservatório.

Figura 24 - Série composta dos satélites e série de réguas linimétricas



Fonte: O Autor (2019)

As diferenças percentuais entre as séries altimétricas com correção do viés com os níveis *in situ* apresentam valores mínimos, conforme pode ser visto no Apêndice 1.

Com uso de imagens obtidas por sensores dos satélites Landsat 5 e 8, determinaram-se as áreas. As informações de altimetria foram obtidas a partir de sensores do satélite SARAL, ENVISAT e Sentinel – 3A. Determinados os vieses para cada informação altimétrica fornecida pelos diferentes satélites, montou-se uma série de 16 anos com os níveis do reservatório Poço da Cruz.

Com as áreas do espelho d'água do reservatório e a série histórica dos níveis de água, obtiveram-se os volumes, possibilitando a montagem da curva cota x área x volume para o açude Poço da Cruz.

4.3 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO AÇUDE POÇO DA CRUZ

Os marcos regulatórios de alocação de água em sistemas hídricos estabelecem diretrizes para as alocações anuais de água, por meio das quais são definidas as condições de uso para cada segmento usuário, pelo período de um ano, em função do volume de água armazenado ao final do período chuvoso. Os marcos regulatórios também estabelecem as regras para emissão de outorgas e dispensa de outorga, padrões de eficiência para os diversos usos e monitoramento dos usos.

Vemos, assim, quanto é importante ter informações sobre o nível e volume armazenado para a adequada gestão dos recursos hídricos do sistema, sendo esse volume no mês de maio, caso do açude Poço da Cruz, final do período chuvoso na região, o dado inicial para distribuir água no sistema durante o período de um ano.

O sistema hídrico formado pelo reservatório Poço da Cruz passou a contar com condições de uso dos recursos hídricos a partir da publicação da Resolução ANA nº 54/2018, de 6 de agosto de 2018, que dispõe sobre condições de uso dos recursos hídricos no sistema, definindo a vazão média outorgável no reservatório. De acordo com a resolução, os usos da água do sistema ficam condicionados ao estado hidrológico do reservatório, que será determinado conforme o volume acumulado em maio de cada ano. Além disso, as alocações anuais de água serão realizadas em reuniões públicas coordenadas pela ANA em articulação com a APAC e com a Comissão Gestora do açude Poço da Cruz.

O estado hidrológico no açude Poço da Cruz é caracterizado pelas seguintes condições de uso, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Estados hidrológicos do sistema hídrico Poço da Cruz: condições de uso

Estado Hidrológico	Volume hm ³ (maio)	Cota m (maio)	Uso	Condições de uso	
				l/s	%
Azul	>=279 hm ³	>=430,55 m	Todos consultivos	1598	100%
			Perenização do Rio Moxotó	100	100%
			Geração complementar de energia	1552	100%
Verde	Entre 185,80 e 279 hm ³	Entre 427,67 e 430,55 m	Todos consultivos	1598	100%
			Perenização do Rio Moxotó	100	100%
			Geração complementar de energia	Entre 0 e 1552	Entre 0 e 100%
Amarelo	Entre 98,50 e 185,80 hm ³	Entre 423,79 e 427,67 m	Abastecimento público	60	100%
			Demais usos entornos	Entre 15 e 60	Entre 25 e 100%
			Irrigação PIMOX e jusante	Entre 370 e 1478	Entre 25 e 100%
			Perenização do Rio Moxotó	Entre 25 e 100	Entre 25 e 100%
			Geração complementar de energia	0	0%
Curva-guia EH Amarelo	128 hm ³	425,31 m	Abastecimento público	60	100%
			Demais usos entornos	30	50%
			Irrigação PIMOX e jusante	739	50%
			Perenização do Rio Moxotó	50	50%
			Geração complementar de energia	0	0%
Vermelho	<=98,50 hm ³	<=423,79 m	Abastecimento público	<=60	<=100%
			Demais usos entornos	<=15	<=25%
			Irrigação PIMOX e jusante	<=370	<=25%
			Perenização do Rio Moxotó	<=25	<=25%
			Geração complementar de energia	0	0%

Fonte: ANA, Resolução nº 54/2018.

Para gestão do reservatório, a tabela mostra que o parâmetro principal são os volumes obtidos a partir dos níveis de água no reservatório. A curva cota x volume deve estar atualizada para dimensionar com segurança os volumes armazenados.

5 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a geração da curva cota-área-volume a partir de imagens de satélites e dados altimétricos fornecidos por radares embarcados em satélites, como forma de gerar um instrumento essencial para a gestão dos recursos hídricos, principalmente no semiárido do Brasil, onde a maior parte das reservas hídricas estão armazenadas em açudes. Conhecer os volumes para os diferentes níveis é primordial para dimensionar corretamente os diversos usos da água em períodos de escassez, priorizando as utilizações mais essenciais.

O objetivo foi alcançado, ao mostrar que informações fornecidas por sensoriamento remoto podem ser um instrumento complementar para confecção e atualização das CAVs. Tanto os volumes quanto as séries altimétricas geradas apresentaram uma boa correlação com os dados coletados *in situ*. Vale salientar que a curva utilizada para validar o trabalho foi obtida dentro de normas técnicas e é, portanto, confiável para realização das comparações. Quanto aos dados de nível da água *in situ*, apresentaram muitas falhas e, em determinados períodos, não havia informações para comparar com os dados dos radares altimétricos. Entretanto é possível notar que o comportamento da variação dos níveis *in situ* e altimetria por radar apresentam o mesmo comportamento.

Os satélites LANDSAT 5 TM e LANDSAT 8 OLI possuem uma resolução temporal de 18 dias, característica que para a situação de reservatórios semelhantes a Poço da Cruz não representa grandes problemas na utilização das imagens para cálculo dos volumes. Em reservatórios que operem a fio d'água, o uso da metodologia pode ficar inviável.

A quantidade de imagens disponíveis, além da pouca cobertura de nuvens na região em boa parte do tempo, facilita a identificação dos diversos tipos de coberturas presentes na superfície da terra, sendo segura a delimitação dos corpos de água utilizando-se índices como o NDWI.

No ponto de inflexão da curva, entre os níveis de 425 m e 430 m, não havia imagens dos dois satélites utilizados. Trata-se de uma situação limite imposta pela série histórica de nível da água, que apresenta poucas medidas nesse intervalo.

Foi realizado o teste de significância *t-student* para os dados pareados para igualdade de volumes calculados do reservatório com levantamento de campo versus a metodologia adotada. O p-valor foi ao menos 3 vezes superior ao nível de

significância ($\alpha=0,05$) adotado, indicando uma probabilidade pequena de existir diferenças entre os valores de volumes obtidos *in situ* e os volumes obtidos utilizando a metodologia apresentada neste trabalho. O *software* MAPS mostrou-se uma ferramenta com muitos recursos para determinação dos níveis de água no reservatório de Poço da Cruz, de tal modo que a metodologia poderá ser aplicada em outros reservatórios do semiárido do Brasil com características similares.

A gestão de recursos hídricos no semiárido do Brasil passa pela gestão da água acumulada nos reservatórios construídos ao longo do tempo na região. Séries históricas de acompanhamento dos níveis desses reservatórios permitem analisar e estudar o desenvolvimento de fatores e variáveis que podem interferir na disponibilidade hídrica desses reservatórios, como secas, aumento das demandas e assoreamento. Conhecer os volumes e outras variáveis intervenientes é essencial para planejar o uso dos recursos armazenados nesses locais.

O sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta para complementar e auxiliar na gestão de reservatórios hídricos, tanto com o uso de imagens quanto de dados altimétricos de sensores embarcados em satélites. Mesmo sabendo que os principais açudes construídos na região possuem seções de réguas para medições de nível da água, verificamos que as séries históricas possuem muitas falhas, assim o dado de altimetria com satélite pode ajudar a recompor parte dessas séries.

A recomposição da série histórica dos níveis e atualização das curvas cota x área x volume são ferramentas fundamentais de gestão. Para recomposição da série histórica, conhecer o viés das diferentes missões altimétricas é primordial para unir as séries de níveis altimétricos obtidos por diferentes satélites. As imagens obtidas a partir de sensores embarcados em satélites, principalmente com o avanço da tecnologia, facilitam a obtenção de cenas com melhor resolução para delimitar o espelho de água dos reservatórios, de tal forma que se pode extrair as informações do valor da área do lago para diferentes situações de nível, integrando-as para obter os volumes. Como produto, temos a curva cota x área x volume por sensoriamento remoto.

As perspectivas futuras para o uso do sensoriamento remoto são muito boas, principalmente com o avanço das tecnologias de aquisição de dados de forma remota, lançamentos de novos satélites, a exemplo do SWOT, que permitirá avanços maiores no monitoramento remoto de sistemas hidrocontinentais. A missão SWOT está planejada para fazer a primeira pesquisa global das águas da superfície da terra,

sendo capaz de levantar informações de sistemas hidrocontinentais com medidas de elevação de alta resolução.

Com o avanço da tecnologia e melhor resolução espacial e temporal, será possível difundir o uso da metodologia para construção de curvas CAVs em outros reservatórios, fornecendo aos gestores informações de maior segurança e precisão dos volumes de água armazenados nesses locais.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. G. A. C. A.; MAILLARD, P. Determinação de Curva “cota x área” do Reservatório da UHE Três Marias com o Uso de Radar Altimétrico e Imagens Orbitais. In: SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO FRANCISCO, 1., 2016. **Anais [...]**. 2016.

AB'SABER, Aziz Nacib. O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 43, p. 1-39, 1974.

AB'SÁBER, Aziz Nacib. Sertões e sertanejos: uma geografia humana sofrida. **Estudos Avançados**, v. 13, n. 36, p. 7-59, 1999. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9474>. Acesso em: 14 jan. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Orientações para atualização das curvas cota x área x volume**. Brasília, DF: ANA, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Evolução dos Volumes dos Reservatórios Equivalente**. Brasília, DF: ANA, 2018. Disponível em: <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/sala-de-situacao/acudes-do-semiarido#>. Acesso em: 15 jan. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema de acompanhamento de Reservatórios**. Brasília, DF: ANA, 201x. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar0/>. Acesso em: 14 jan. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Resolução nº 54, de 6 de agosto de 2018**. Dispõe sobre condições de uso dos recursos hídricos no sistema hídrico Poço da Cruz, e rio Moxotó, localizados no Estado de Pernambuco. Brasília, DF: ANA, 2018. Documento nº 00000.048370/2018-65. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2018/Outorgas/0054-2018_Outorga_de_Direito_de_Uso.pdf?124415.

AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Monitoramento Hidrológico**. Recife: APAC, 2019. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/monitoramento/>. Acesso em: 05 jan. 2019.

ASSUNÇÃO, Luiz Márcio; LIVINGSTONE, Ian. **Água, seca e desenvolvimento no Nordeste do Brasil**. Recife: Sudene, 1988.

AVISO. **SARAL**. 2013. Disponível em : <https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/saral.html>. Acesso em : 22 jan. 2019.

AVISO. **Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques**. 2008. Disponível em: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>. Acesso em: 22 jan. 2019.

BAMBER, J. L. Ice sheet altimeter processing scheme. **International Journal of Remote Sensing**, 1994. doi: 10.1080/01431169408954125

BARBETTA, P. A. **Estatística aplicada às ciências sociais**. Florianópolis: Ed. Universitária da UFSC, 2002.

C. M. BIRKETT L. A. K. MERTES T. DUNNE M. H. COSTA M. J. JASINSKI. Surface water dynamics in the Amazon Basin: Application of satellite radar altimetry. **Journal of geophysical research**, v. 107, n. D20, p. 8059, 2002. Disponível em: doi:10.1029/2001jd000609. Acesso em: 05 jan. 2019.

BIRKETT, C. M.; B. BECKLEY. Investigating the Performance of the Jason2/OSTM radar altimeter over Lakes and Reservoirs. Jason-2/OSTM. **Marine Geodesy**, v. 33, n. 1, p. 204-238, 2010. Special Issue.

BONNEFOND, P.; EXERTIER, P.; LAURAIN, O.; MENARD, Y.; ORSONI, A.; JAN, G.; JEANSOU, E. Absolute calibration of Jason-1 and Topex/Poseidon altimeters in Corsica. **Marine Geodesy**, 26 (3–4), p. 261-284, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/714044521>. Acesso em: 07 jan. 2019.

BONNEFOND, PASCAL; EXERTIER, PIERRE; LAURAIN, OLIVIER; JAN, GWENAELE. Absolute Calibration of Jason-1 and Jason-2 Altimeters in Corsica during the Formation Flight Phase. **Marine Geodesy**. Volume 33, 2010 <https://doi.org/10.1080/01490419.2010.487790>.

BORGES, Raphael; CAMARGO, Flavio Fortes; CAMPAGNOLI, Fernando; BAYER, Maximiliano. **Aplicação do índice da diferença normalizada da água (NDWI) na delimitação de fluxos de sedimentos em suspensão no Rio Araguaia: avaliação das imagens Landsat 8 para o monitoramento hidroviário**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE. **Anais [...]**. João Pessoa, PB: SBSR, 2015.

BRANDÃO, Ziany N. et al. **Determinação de índices de vegetação usando imagens de satélite para agricultura de precisão**. Campina Grande: CNPA, 2005. Trabalho apresentado no 5º Congresso Brasileiro de Algodão, 2005, Salvador, BA.

BRITO NETO, Romildo Toscano de; BARROS FILHO, Marcelo Benigno Borge; LOPES, Helio Leandro; PACHECO, Admilson da Penha. Determinação de valores físicos de imagens TM/LANDSAT-5 utilizando a linguagem legal para obter índices de vegetação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIA DA GEINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife, PE. **Anais [...]**. Recife, 2008.

CALMANT, Stéphane; SILVA, Joecila Santos; MOREIRA, Daniel Medeiros; SEYLER, Frédérique; SHUM, C. K.; CRÉTAUX, Jean François; GABALDA, Germinal. Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. **Advances in Space Research**, v. 51, p. 1551-1564, 2012.

CARDIA, L. S. **Uma Abordagem do Ensino de Geometria Espacial**. 2014. Dissertação (Mestrado profissional em Matemática) – PROFMAT, Sociedade Brasileira de Matemática, Instituto de Matemática Pura e Aplicada, 2014.

CAVALCANTE, A. M. B. Paisagens insulares no semiárido do estado do Ceará. **Revista de Geografia** (UFPE), v. 29, n. 3, 2012.

CHENG, K.; CALMANT, S.; KUO, C-Y.; TSENG, H.-G.; SHUM, C. K.; SEYLER, F.; DA SILVA, J. S. Branco River stage gradient determination and Amazon hydrologic studies using GPS water level measurements. **Marine Geodesy**, v. 32, n. 3, p. 267-283, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01490410903094460>. Acesso em: 10 jan. 2019.

CINQUINI, J.; AZEVEDO, A. Estimativa de áreas alagadas no período de seca e cheia em ottobacia no município de Corumbá/MS, utilizando NDVI, NDWI e atributos de textura em imagens Landsat/TM. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 4., 2012, Bonito/MS. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 71-80. CDROM, On-line. Disponível em: <http://www.geopantanal.cnptia.embrapa.br/2012/cd/geopantanal.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2019.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200005>. Acesso em: 10 jan. 2019.

COLLISCHONN, B; CLARKE, R. T. Estimativa e incertezas de curvas cota-volume por meio de sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 4, p. 719-727, 2016.

COPERNICUS: sentinel-3 — **global sea/land monitoring mission including Altimetry**. E O PORTAL DIRECTORY. 2016. Disponível em: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/pag-filter/-/article/sentinel3>. Acesso em: 10 jan. 2019.

COSTI, A. C. Z. **Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica**. 2012. 141 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 2012.

CRÉTAUX, J.-F.; CALMANT, S.; ROMANOVSKI, V.; PEROSANZ, F.; TASHBAEVA, S.; BONNEFOND, P.; MOREIRA, D.; SHUM, C. K.; NINO, F.; BERGE-NGUYEN, M.; FLEURY, S.; GEGOUT, P.; ABARCA DEL RIO, R.; MAISONGRANDE, P. Absolute calibration of jason radar altimeters from GPS kinematic campaigns over lake Issykkul. **Marine Geodesy**, 34 (3-4), p. 291-318, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2011.585110>.

CRÉTAUX, J.-F.; CALMANT, S.; ROMANOVSKI, V.; SHABOUNIN, A.; LYARD, F.; BERGE-NGUYEN, M.; CAZENAVE, A.; HERNANDEZ, F.; PEROSANZ, F. An absolute calibration site for radar altimeters in the continental domain: Lake Issyk-kul in

Central Asia. **Journal of Geodesy**, v. 83, p. 723-735, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-008-0289-7>.

CRÉTAUX, J-F.; BERGE-NGUYEN, M.; CALMANT, S.; ROMANOVSKI, V.; MESSIGNAC, B.; PEROSANZ, F.; TASHBAEVA, S.; ARSEN, A.; FUND, F.; MARTIGNANO, N.; BONNEFOND, P.; LAURAIN, O.; MORROW, R.; MAISONGRANDE, P. Calibration of Envisat radar altimeter over Lake Issykkul. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 8, p. 1523-1541, 15 april 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.039>. Acesso em: 10 jan. 2019.,

CRÉTAUX, J.-F.; BERGÉ-NGUYEN, M.; CALMANT, S.; JAMANGULOVA, N.; SATYLKANOV, R.; LYARD, F.; PEROSANZ, F.; VERRON, J.; SAMINE MONTAZEM, A.; LE GUILCHER, G.; LEROUX, D.; BARRIE, J.; MAISONGRANDE, P.; BONNEFOND, P. Absolute Calibration or Validation of the Altimeters on the Sentinel-3A and the Jason-3 over Lake Issykkul (Kyrgyzstan). **Remote Sens.**, v. 10, p. 1679, 2018.

DNOCS., Barragens do Nordeste do Brasil; DNOCS, Fortaleza, 1982a; DNOCS, relatórios 1983-88 e DNOCS, **Funções básicas do DNOCS para responder aos desafios, do presente e do futuro**. Fortaleza, 1991. Mimeo

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **ENVISAT**. Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_envisat.html. Acesso em: 10 jan. 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Missões LANDSAT**. Disponível de: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html. Acesso em: 10 jan. 2019.

ESA. **Earth Online**. Disponível em: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ENVISAT>. Acesso em: 10 jan. 2019.

ESA EDUSPACE. **ENVISAT**. 2015. Disponível em: http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEMPWD65P1G_0.html. Acesso em: 22 jan. 2019.

ESA. **Sentinel-3**. 2019. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/instrument-payload>. Acesso em: 21 jan. 2019.

FRAPPART, F.; CALMANT, S.; CAUHOPÉ, M.; SEYLER, F.; CAZENAVE, A. Preliminary results of ENVISAT RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 252-264, 2006.

FRAPPART, F. et al. Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, 2012. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044010.

FU, L. L.; CAZENAVE, A.. **Satellite altimetry and earth science**: a handbook of techniques and applications. London: Academic Press, 2001.

GOMMENGINGEREMAIL, C. P.; THIBAUTL, P.; FENOGLIO, L.; QUARTLY, G.; DENGJ. G.-E.; CHALLENGORY, G. Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts. **Coastal Altimetry**, 2010.

GOOGLE EARTH.-MAPAS. [Http://mapas.google.com](http://mapas.google.com). Acesso em: 10 jan. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Ondulação Geoidal MAPGEO 2015**. Brasília: IBGE, 2015. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm. Acesso em: 15 jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Tutorial de Geoprocessamento**. 1991. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_sen.html. Acesso em 10 jan. 2019.

JARIHANI, A. A.; CALLOW, J. N.; JOHANSEN, K.; GOWWLEEUW, B. Assessment of multiple satellite altimetry data for the study of inland water bodies and river floods. **Journal of Hydrology**, v 505, p. 78-90, 2013.

KRAMER, Herbert J.; CRACKNELL, Arthur P. An overview of small satellites in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, issue 15, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160801914952>

LANDSAT - **Land Remote Sensing Satellite**. Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html. Acesso em: 17 abr. 2019.

YANG, LEE; MINGSEN, LIN; LIU, QINHUO; PAN, DELU. A coastal altimetry retracking strategy based on waveform classification and sub-waveform extraction. **International Journal of Remote Sensing**. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.701350>. 2012.

MCFEETERS, S. K. O Uso do Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI) no Delineamento de Recursos de Águas Abertas. **International Journal of Remote Sensing**, 17, p. 1425-1432, 1996. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Relatório Final, Grupo de Trabalho Interministerial para Redelimitação do Semiárido Nordeste e do Polígono das Secas**, 2005.

MELO, Cristiane Ribeiro de. **Análise do Eixo Leste da Transposição do Rio São Francisco Face aos Cenários de Uso Previstos**. 2010. 201 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2010.

MOREIRA, D. M. **Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica**. 2010. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MOURA, Magna Soelma Beserra de; GALVINCIO, Josiclêda Domiciano; BRITO, Luiza Teixeira de Lima; SOUZA, Luciana Sandra Bastos de; SÁ, Ivan Ighour Silva; SILVA, Thieres George Freire da. Clima e água de chuva no Semiárido. In: BRITO, L. T. de L.; MOURA, M. S. B. de; GAMA, G. F. B. (Ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007.

Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/159649/1/OPB1515.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2019.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NASA. **Visão geral das missões de altimetria “status do programa CNES**. 2009.

Disponível em:

<https://sealevel.jpl.nasa.gov/science/ostscienceteam/scienceteammeetings/teammeeting2009/>. Acesso em: 20 jan. 2019.

NOVO, E. M. L. M.; HANSON, J. D.; CURRAN, P. J. The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. **International Journal of Remote Sensing**, 10(8), p. 1357-1372, 1989.

OLIVEIRA, Bernardo Luiz Ferreira de. **Monitoramento Hidrológico Transfronteiriço da Bacia Amazônica por Altimetria Espacial**. 2018. 67 p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, Universidade do Estado do Amazonas (UEA), 2018.

OLIVEIRA CAMPOS, I.; MERCIER, F.; MAHEU, C.; COCHONNEAU, G.; KOSUTH, P.; BLITZKOW, D.; CAZENAVE, A. Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon Basin. **C. R. Acad. Sci. Series II A Earth and Planetary Science**, 333 (10), p. 663-643, 2001.

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; GONÇALVES, L. G. G.; CALMANT, S.; GETIRANA, A.; SANTOS DA SILVA, J. Assimilating in situ and radaraltimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the Amazon. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 17, p. 2929-946, 2013. DOI: 10.5194/hess17 2929-2013.

PAVLIS, N. K., HOLMES, S. A., KENYON, S. C. AND FACTOR, J. K. 2008. “**An earth gravitational model to detree 2160: EGM2008**”. Vienna, , Austria Paper presented at the 2008 general assembly of the European Geosciences Union, April 13–18, in [Google Scholar]

PERNAMBUCO. **Plano de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco**. Recife: Governo do Estado, 1998. Disponível em: http://www.apac.pe.gov.br/down/PERHPE_volume8.pdf. Acesso em: 10 jan. 2019.

PEREIRA, Gabriel Henrique de Almeida; LOHMANN, Marciel; MAGANHOTTO, Ronaldo Ferreira. Proposta e avaliação de índices para delimitar e mapear corpos d'água utilizando imagens do satélite LANDSAT 8. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 6, p. 1956-1968, 2016.

RAMALHO, M. F. A fragilidade ambiental do nordeste brasileiro: o clima semiárido e as imprevisões das grandes estiagens. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 104-115, 29 jul. 2013.

REBOUÇAS, A. C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. **Estudos avançados**, 11 (29), 1997. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141997000100007>.

RICHTER, R.; SCHLÄPFER, D. ATCOR-2/3 User Guide (ver. 8.3.1). **ReSe Applications**. Schläpfer. Suíça, 2014.

RICKO, M.; BIRKETT, J. A.; CARTON, J. A.; CRÉTAUX, J. F. C. Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 6, p. 6 – 24, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.6.061710>.

ROBINOVE, C. J. Computation with physical values from Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 48, n. 5, p. 781-784, 1982.

ROBINOVE, C. J. **The Role of Remote Sensing and Satellite Monitoring System in Hydrologic Hazard Management**. US Department of the Interior Geological Survey, 1984.

ROCA, M.; FRANCIS, R.; FONT, J.; RIUS, A.; CARDELLACH, E.; SCHULLER, T.; HEIN, G.; LEFEVRE, F.; DURANDEU, J.; LE TRAON, P.-Y.; BOUZINAC, C.; GMOIS, D.; RUIZ, S.; MARCOS, M.; MONSERRAT, S.; SCHARROO, R.; DOORNBOS, E.; RICHTER, A.; LIEBSCH, G.; DIETRICH, R.; MARTELLUCCI, A. RA-2 absolute range calibration. In: **ENVISAT VALIDATION WORKSHOP**, Frascati, Italy, Proc... p. 9-13, december 2002.

PAIVA, R. C. D., DURAND, M. T., HOSSAIN, F. (2015), Spatiotemporal interpolation of discharge across a river network by using synthetic SWOT satellite data, **Water Resour. Res.**, 51, 430– 449, doi:10.1002/2014WR015618.

SANTOS DA SILVA, J.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; ROTUNNO FILHO, O. C.; COCHONNEAU, G.; MANSUR, W. J. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. **Remote Sensing of Environment**, 114 (10), p. 2160-2181, 2010.

SANTOS DA SILVA, JOECILA; CALMANT, STEPHANE; MEDEIROS MOREIRA, DANIEL; OLIVEIRA, ROBSON; CONCHY, TAINA; GENNERO, MARIE-CLAUDE; SEYLER, FREDERIQUE. **Validation of SARAL/AltiKa data in the Amazon basin.** EGU General Assembly 2015, held 12-17 April, 2015 in Vienna, Austria. id.2593. 04/2015

SULISTIOADI, OHANES BUDI. **Satellite altimetry and hydrologic modeling of Poorly gauged tropical watershed.** Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University. The Ohio State University 2013.

SARAL AltiKa Products Handbook. Disponível em: http://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/SARAL_Altika_products_handbook_01.pdf. Acesso em: 10 jan. 2019.

SCHWATKE, Cristão; BOSCH, Wolfgang; SAVCENKO, Romano; DETTMERING, Denise. OpenADB: **Um banco de dados aberto para altimetria multi-missão.** In: ASSEMBLÉIA GERAL DA EGU 2010, 2 a 7 de maio de 2010, Viena, Áustria, p.12077.

SHARING EARTH OBSERVATION RESSOURCES (EO). SARAL (Satellite with ARgos and ALtiKa). Disponível em: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/saral>. Acesso em: 15 jan. 2019.

SHUM, C. K.; YI, Y.; K. CHENG, K.; KUO, C.; BRAUN, A.; CALMANT, S.; CHAMBERS, D. Absolute Calibration of JASON-1 Altimeter over Lake Erie. **Marine Geodesy**, v. 26, issue 3-4, p. 335-354, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1080/714044525>.

STEFFEN, Carlos Alberto. **Introdução ao Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos: INPE, S/D, 1981. Disponível em: <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SUASSUNA, João. Água: um fator limitante para o desenvolvimento do Nordeste. In: FUNDAÇÃO KONRAD ADENAUER. **Água e desenvolvimento sustentável no Semi-Árido.** Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002. (Série Debates n. 24). p. 117-132.

TOLEDO, C. E.; ARAÚJO, J. C.; ALMEIDA, C. L. The use of remote-sensing techniques to monitor dense reservoir newtorks in the Brazilian semiarid region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 10, p. 3683-3699, 2014.

USGS. **Launch Readiness:** December 2013. Disponível em: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-9?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con. Acesso em 10 jan. 2019.

USGS (2013) **LANDSAT MISSION**. Disponível em: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-7?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con. Acesso em: 01 jan. 2019.

VALLADARES NETO, JOSÉ; SANTOS, CRISTIANE BARBOSA DOS; TORRES, ÉRICA MIRANDA; ESTRELA, CARLOS. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Rev Odontol Bras Central**, 2017; 26(76): 1-6. 1. Revisão. ISSN 1981-3708.

VERRON, Jacques et al. The Benefits of the Ka-Band as Evidenced from the SARAL/AltiKa Altimetric Mission: Scientific Applications. **Remote Sens.**, v. 10, p. 163, 2018. DOI: 10.3390/rs10020163, 2018. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/10/2/163/pdf>.

VISÃOGEO. **Relatório de Elaboração da CAV. ANA CAV – Açudes**. Contrato nº 006/2017/ANA. Lote 02 – Açude Poço da Cruz. 2018.

WATSON, C.; WHITE, R.N.; COLEMAN, R.; CHURCH, J.; MORGAN, P.; GOVIND, R. Topex/Poseidon and Jason-1: absolute calibration in Bass Strait Australia. **Marine Geodesy**, 27, issue 1-2, p. 107-131, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490410490465373>.

WATSON, CHRISTOPHER; WHITE, NEIL; COLEMAN, RICHARD; MORGAN, PETER; GOVIND, RAMESH. TOPEX/Poseidon and Jason-1: Absolute Calibration in Bass Strait, **Australia. Marine Geodesy**, Volume 27, 2004.

WINGHAM, D. J.; RAPLEY, C. G.; GRIFFITHS, H. New techniques in satellite altimeter tracking systems. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS '86). **On Remote Sensing: Today's Solution for Tomorrow's Information Needs** (ESA SP-254). Proceedings, september 1986.

YI, Y.; BRAUN, A.; SHUM, C. K.; CHENG, K.; CALMANT, S. **Envisat RA2 cal/val results**. Envisat RA2/MWR CCVT Sixth Plenary Meeting, ESA/ ESRIN, Frascati, Italy, March 25-27, 2003.

ZHANG, S.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P.; ARAÚJO, J.C.; MOTAGH, M.; WASKE, B. Bathymetric survey of water reservoirs in north-eastern Brazil based on **TanDEM-X satellite data**. **The Science of the Total Environment**, v. 571, p. 575-593, 2016. PMID:27418521. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.02>

**APÊNDICE A – DIFERENÇAS PERCENTUAIS ENTRE NÍVEIS ALTIMÉTRICOS
POR SATÉLITE E IN SITU**

Data satélite	Satélite	régua (m)	régua corrigida GPS (m)	Cotas satélites (m)	Cotas satélites corrigidas o viés (m)	Diferença percentual
10/07/2002	ENVISAT	425,56	418,27	419,40	418,15	-0,03%
12/03/2003	ENVISAT	424,65	417,36	418,79	417,54	0,04%
16/04/2003	ENVISAT	425,20	417,91	419,39	418,14	0,06%
21/05/2003	ENVISAT	424,85	417,56	418,89	417,64	0,02%
12/11/2003	ENVISAT	424,80	417,51	418,87	417,62	0,03%
17/12/2003	ENVISAT	424,12	416,83	418,29	417,04	0,05%
25/02/2004	ENVISAT	435,11	427,82	429,14	427,89	0,02%
31/03/2004	ENVISAT	435,09	427,80	429,00	427,75	-0,01%
05/05/2004	ENVISAT	434,82	427,53	428,74	427,49	-0,01%
09/06/2004	ENVISAT	434,66	427,37	428,72	427,47	0,02%
14/07/2004	ENVISAT	434,55	427,26	428,42	427,17	-0,02%
18/08/2004	ENVISAT	434,40	427,11	428,35	427,10	0,00%
22/09/2004	ENVISAT	434,22	426,93	428,16	426,91	0,00%
27/10/2004	ENVISAT	433,99	426,70	427,86	426,61	-0,02%
05/01/2005	ENVISAT	433,54	426,25	427,25	426,00	-0,06%
16/03/2005	ENVISAT	433,09	425,80	426,87	425,62	-0,04%
20/04/2005	ENVISAT	433,87	426,58	427,55	426,30	-0,07%
29/06/2005	ENVISAT	433,80	426,51	427,53	426,28	-0,05%
07/09/2005	ENVISAT	433,47	426,18	427,25	426,00	-0,04%
12/10/2005	ENVISAT	433,21	425,92	427,10	425,85	-0,02%
16/11/2005	ENVISAT	432,97	425,68	426,70	425,45	-0,05%
21/12/2005	ENVISAT	432,86	425,57	426,63	425,38	-0,04%
25/01/2006	ENVISAT	432,49	425,20	426,43	425,18	0,00%
01/03/2006	ENVISAT	432,23	424,94	426,21	424,96	0,00%
05/04/2006	ENVISAT	432,57	425,28	426,46	425,21	-0,02%
10/05/2006	ENVISAT	432,67	425,38	426,41	425,16	-0,05%
14/06/2006	ENVISAT	432,54	425,25	426,48	425,23	0,00%
19/07/2006	ENVISAT	432,40	425,11	426,09	424,84	-0,06%
23/08/2006	ENVISAT	432,22	424,93	425,89	424,64	-0,07%
27/09/2006	ENVISAT	432,00	424,71	425,74	424,49	-0,05%
01/11/2006	ENVISAT	431,48	424,19	425,56	424,31	0,03%
06/12/2006	ENVISAT	431,15	423,86	425,48	424,23	0,09%
10/01/2007	ENVISAT	430,90	423,61	424,92	423,67	0,01%
14/02/2007	ENVISAT	430,53	423,24	424,94	423,69	0,11%
21/03/2007	ENVISAT	431,10	423,81	425,16	423,91	0,02%
25/04/2007	ENVISAT	430,89	423,60	424,89	423,64	0,01%
30/05/2007	ENVISAT	430,75	423,46	424,89	423,64	0,04%

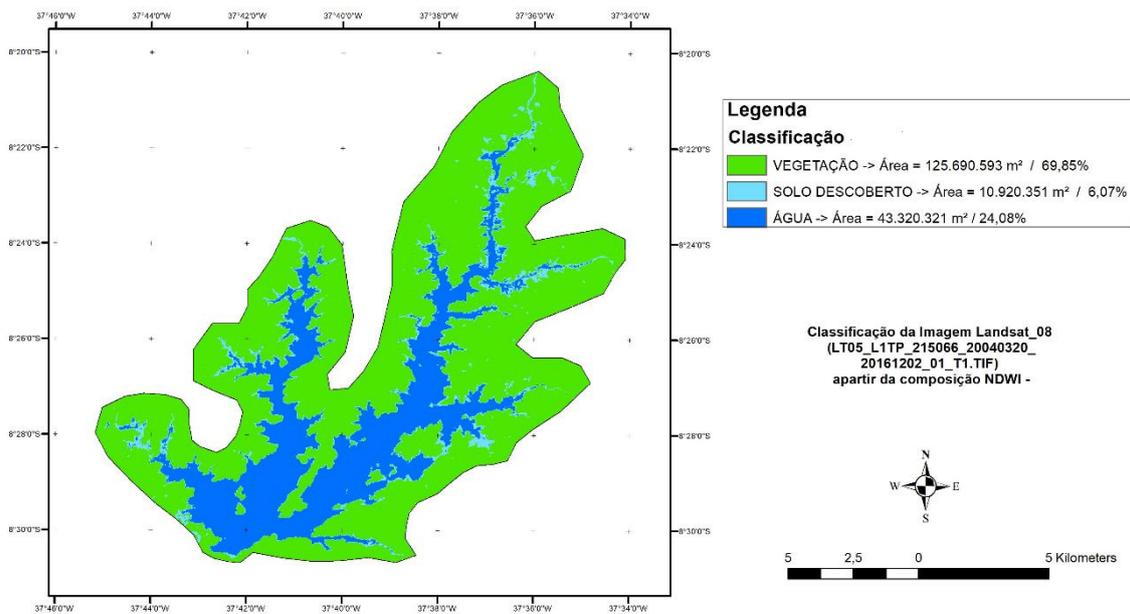
04/07/2007	ENVISAT	430,45	423,16	424,34	423,09	-0,02%
08/08/2007	ENVISAT	430,26	422,97	424,13	422,88	-0,02%
12/09/2007	ENVISAT	429,91	422,62	423,81	422,56	-0,01%
17/10/2007	ENVISAT	429,56	422,27	423,50	422,25	0,00%
21/11/2007	ENVISAT	429,21	421,92	423,01	421,76	-0,04%
26/12/2007	ENVISAT	428,86	421,57	422,71	421,46	-0,03%
30/01/2008	ENVISAT	428,51	421,22	422,71	421,46	0,06%
05/03/2008	ENVISAT	429,50	422,21	423,53	422,28	0,02%
09/04/2008	ENVISAT	435,46	428,17	429,51	428,26	0,02%
18/06/2008	ENVISAT	435,11	427,82	428,87	427,62	-0,05%
23/07/2008	ENVISAT	434,64	427,35	428,55	427,30	-0,01%
27/08/2008	ENVISAT	434,50	427,21	428,62	427,37	0,04%
01/10/2008	ENVISAT	434,11	426,82	428,15	426,90	0,02%
05/11/2008	ENVISAT	433,85	426,56	427,70	426,45	-0,03%
10/12/2008	ENVISAT	433,40	426,11	427,54	426,29	0,04%
14/01/2009	ENVISAT	433,09	425,80	426,95	425,70	-0,02%
18/02/2009	ENVISAT	432,83	425,54	426,79	425,54	0,00%
25/03/2009	ENVISAT	432,60	425,31	426,62	425,37	0,01%
29/04/2009	ENVISAT	433,40	426,11	427,35	426,10	0,00%
03/06/2009	ENVISAT	435,25	427,96	429,41	428,16	0,05%
08/07/2009	ENVISAT	434,95	427,66	428,95	427,70	0,01%
12/08/2009	ENVISAT	434,70	427,41	428,75	427,50	0,02%
16/09/2009	ENVISAT	434,57	427,28	428,66	427,41	0,03%
21/10/2009	ENVISAT	434,23	426,94	428,17	426,92	0,00%
25/11/2009	ENVISAT	433,96	426,67	427,67	426,42	-0,06%
03/02/2010	ENVISAT	433,25	425,96	427,16	425,91	-0,01%
10/03/2010	ENVISAT	432,90	425,61	427,01	425,76	0,04%
14/04/2010	ENVISAT	433,50	426,21	427,54	426,29	0,02%
19/05/2010	ENVISAT	433,15	425,86	427,21	425,96	0,02%
23/06/2010	ENVISAT	433,00	425,71	427,05	425,80	0,02%
28/07/2010	ENVISAT	432,65	425,36	426,76	425,51	0,04%
01/09/2010	ENVISAT	432,30	425,01	426,32	425,07	0,01%
06/10/2010	ENVISAT	432,28	424,99	426,30	425,05	0,01%
05/04/2013	SARAL	423,60	416,31	416,90	416,22	-0,02%
10/05/2013	SARAL	423,24	415,95	416,67	415,99	0,01%
19/07/2013	SARAL	422,51	415,22	415,81	415,13	-0,02%
23/08/2013	SARAL	422,19	414,90	415,56	414,88	0,00%
27/09/2013	SARAL	421,46	414,17	414,95	414,27	0,02%
01/11/2013	SARAL	421,21	413,92	414,34	413,66	-0,06%
06/12/2013	SARAL	420,61	413,32	413,97	413,29	-0,01%
10/01/2014	SARAL	420,48	413,19	413,77	413,09	-0,02%
14/02/2014	SARAL	420,15	412,86	413,33	412,65	-0,05%
21/03/2014	SARAL	419,90	412,61	413,18	412,50	-0,03%
25/04/2014	SARAL	420,10	412,81	413,42	412,74	-0,02%
30/05/2014	SARAL	419,70	412,41	412,97	412,29	-0,03%

04/07/2014	SARAL	419,41	412,12	412,83	412,15	0,01%
08/08/2014	SARAL	419,13	411,84	412,42	411,74	-0,02%
12/09/2014	SARAL	418,78	411,49	412,20	411,52	0,01%
17/10/2014	SARAL	418,58	411,29	412,30	411,62	0,08%
21/11/2014	SARAL	418,12	410,83	411,53	410,85	0,00%
26/12/2014	SARAL	417,78	410,49	411,03	410,35	-0,03%
30/01/2015	SARAL	417,30	410,01	411,10	410,42	0,10%
25/03/2016	SARAL	416,35	409,06	409,78	409,10	0,01%
12/08/2016	Sentinel-3A	415,82	408,53	408,51	408,51	0,00%
08/09/2016	Sentinel-3A	415,62	408,33	408,32	408,32	0,00%
05/10/2016	Sentinel-3A	415,25	407,96	407,96	407,96	0,00%
28/11/2016	Sentinel-3A	414,73	407,44	407,49	407,49	0,01%
21/01/2017	Sentinel-3A	413,75	406,46	406,48	406,48	0,00%
17/02/2017	Sentinel-3A	413,60	406,31	406,35	406,35	0,01%
16/03/2017	Sentinel-3A	413,32	406,03	406,01	406,01	0,00%
12/04/2017	Sentinel-3A	413,32	406,03	406,03	406,03	0,00%
09/05/2017	Sentinel-3A	413,05	405,76	406,36	406,02	0,06%
02/07/2017	Sentinel-3A	412,97	405,68	406,12	405,78	0,02%
29/07/2017	Sentinel-3A	412,70	405,41	406,09	405,75	0,08%
25/08/2017	Sentinel-3A	412,43	405,14	405,68	405,34	0,05%
18/10/2017	Sentinel-3A	412,16	404,87	404,98	404,64	-0,06%
14/11/2017	Sentinel-3A	411,89	404,60	404,72	404,38	-0,05%
11/12/2017	Sentinel-3A	411,62	404,33	404,51	404,17	-0,04%
25/04/2018	Sentinel-3A	420,04	412,75	413,32	412,98	0,06%
22/05/2018	Sentinel-3A	419,82	412,53	413,10	412,76	0,06%

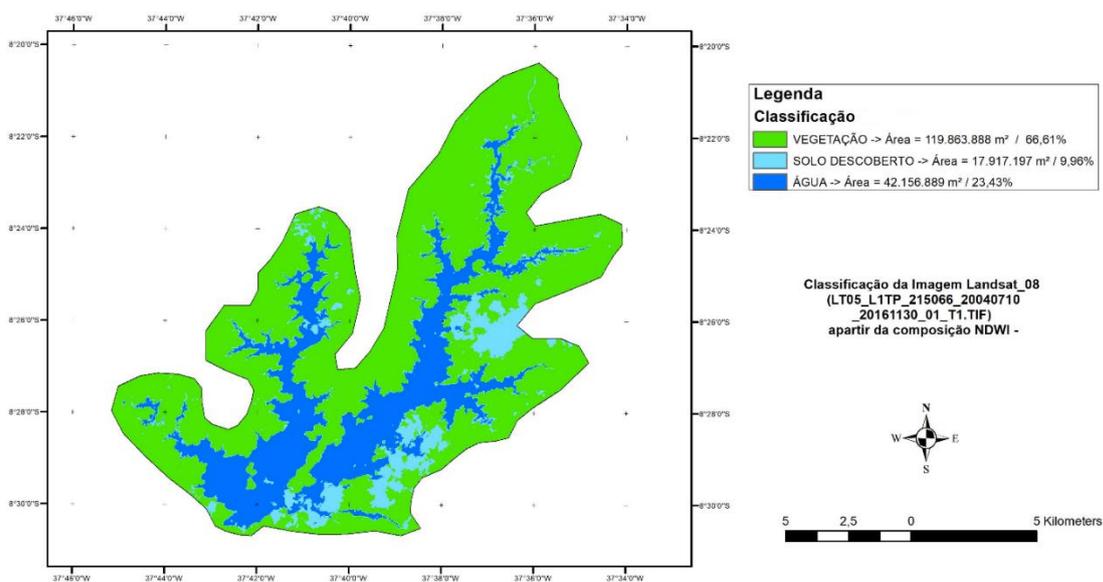
APÊNDICE B - IMAGENS CLASSIFICADAS

LANDSAT 5

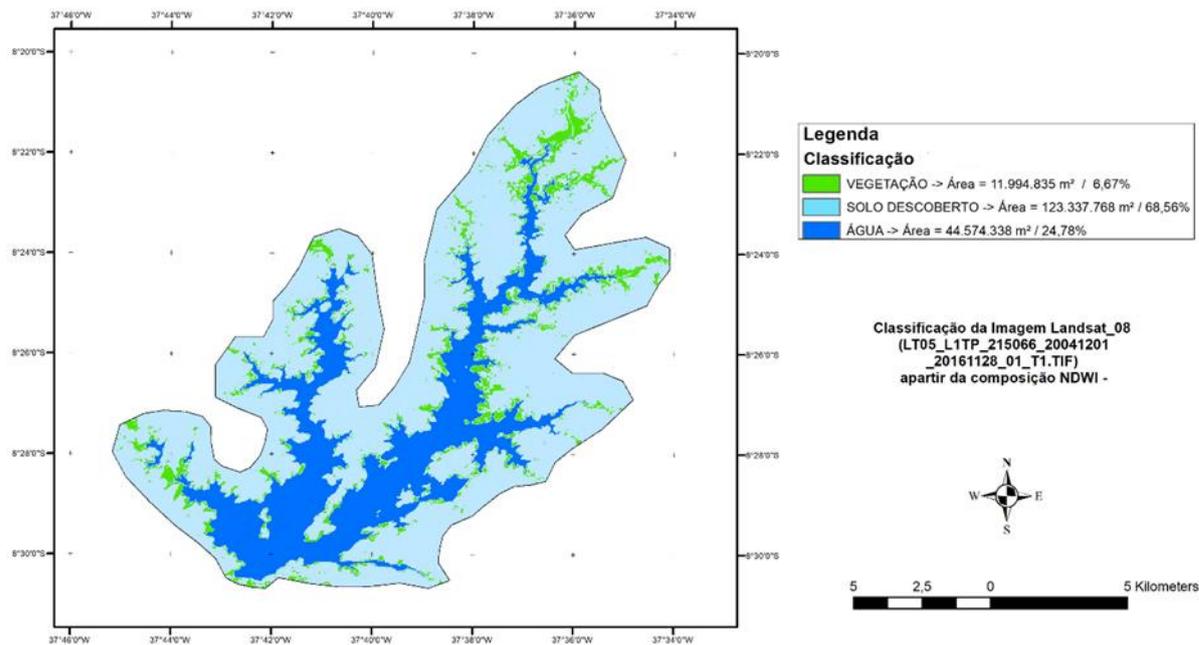
DATA : 2004-03-20



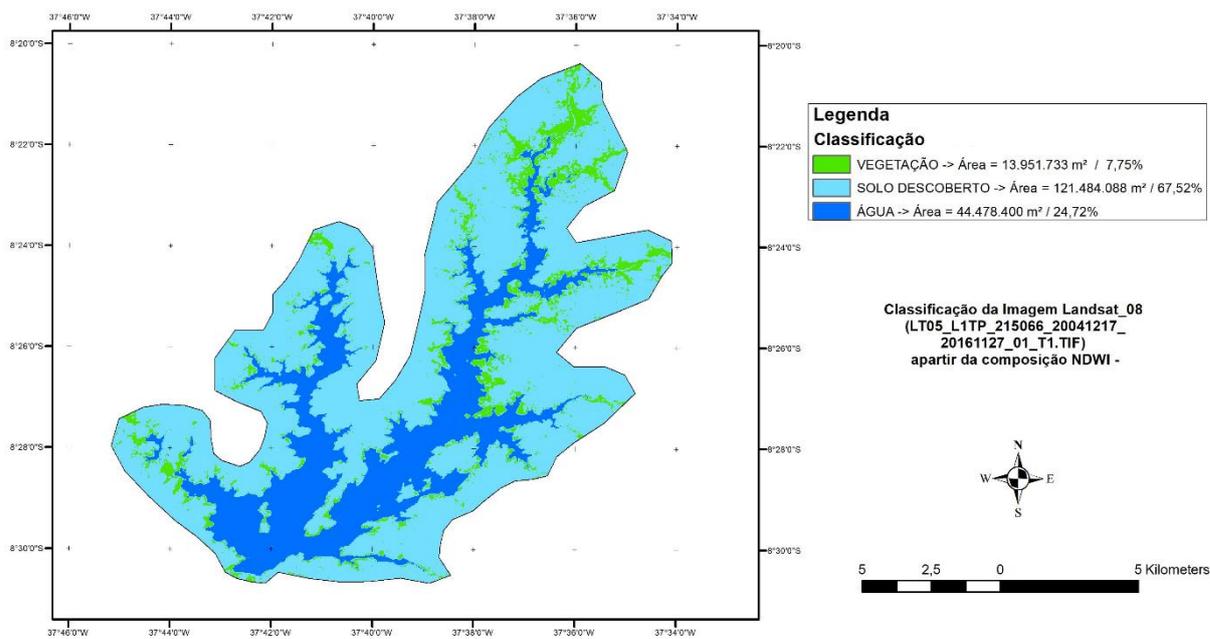
DATA : 2004-07-10



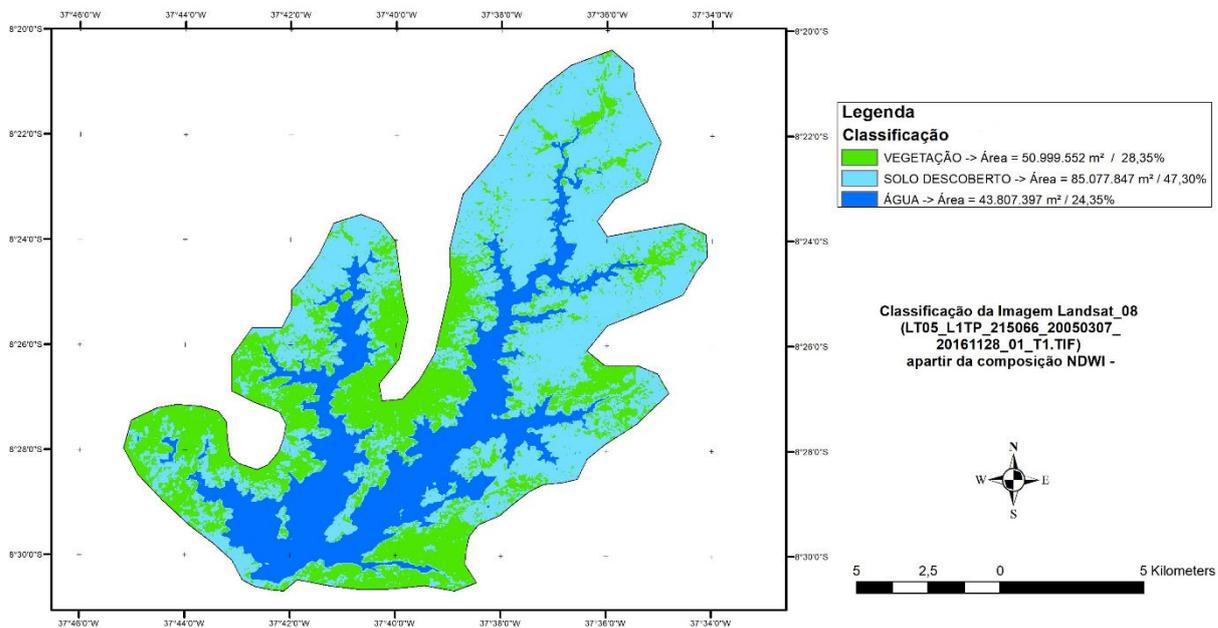
DATA : 2004-12-01



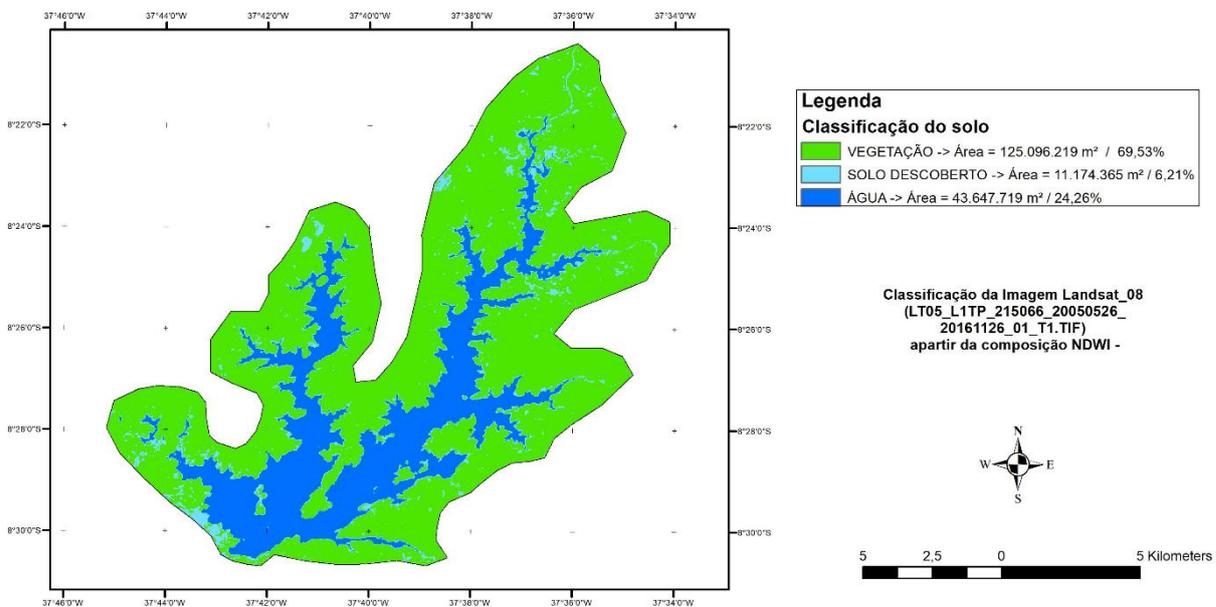
DATA : 2004-12-17



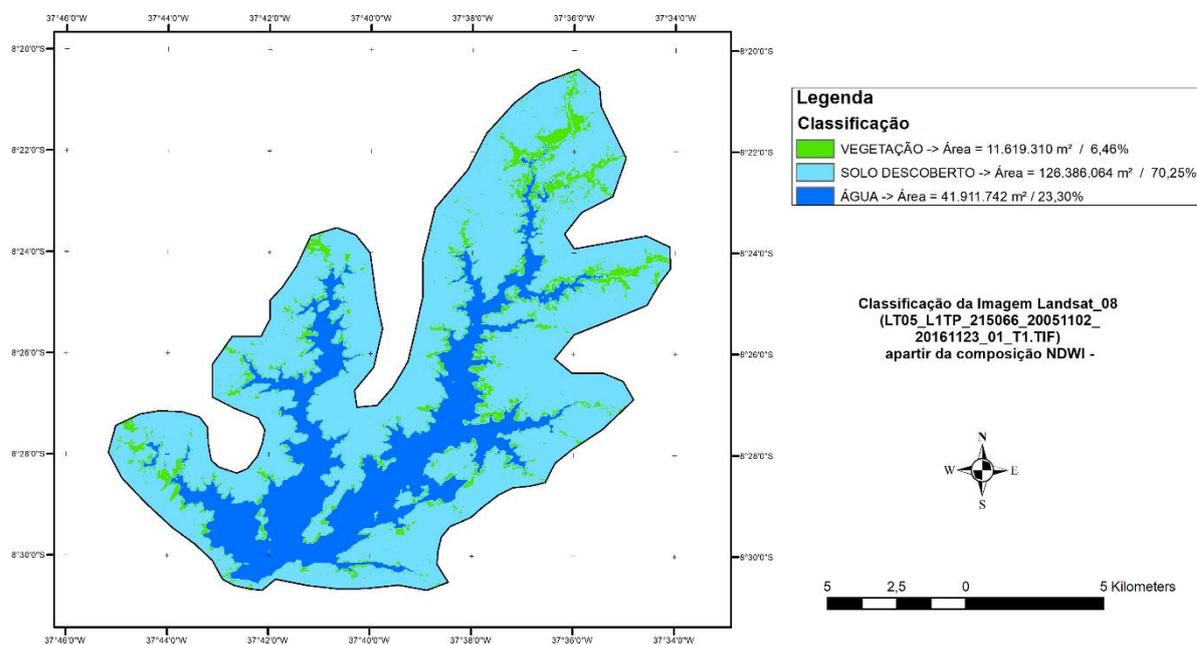
DATA : 2005-03-07



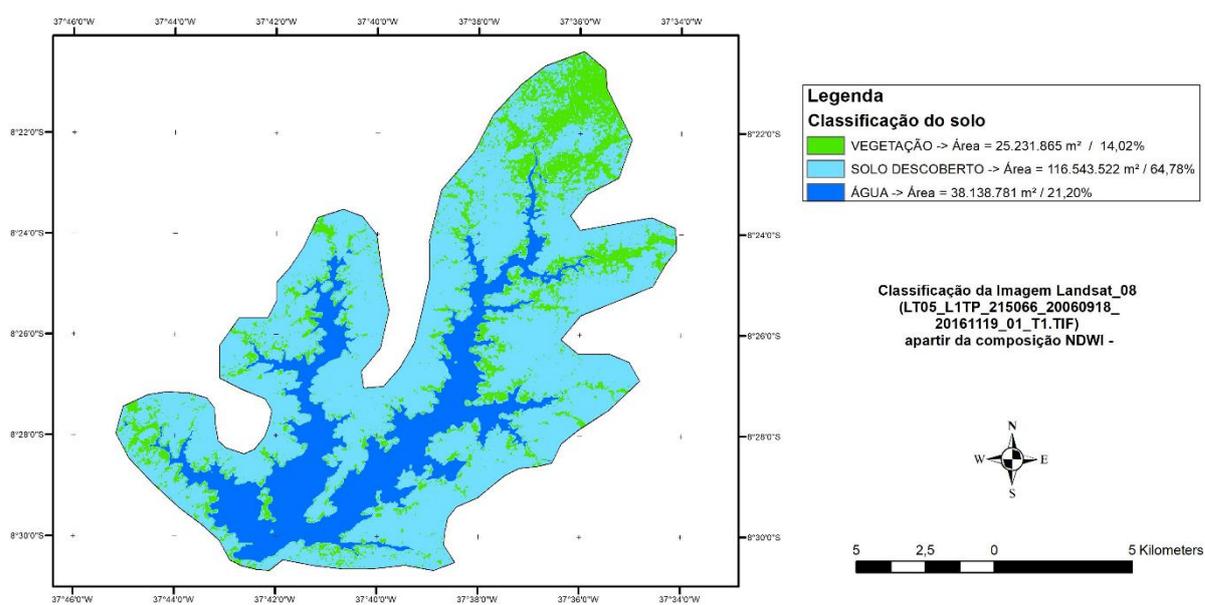
DATA : 2005-05-26



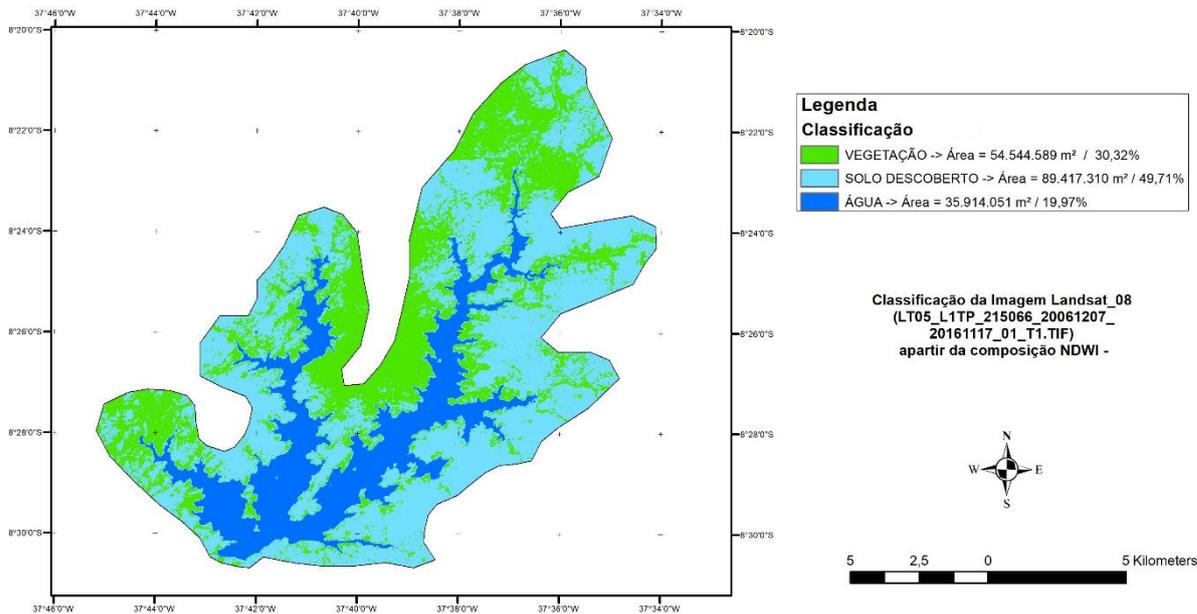
DATA : 2005-11-02



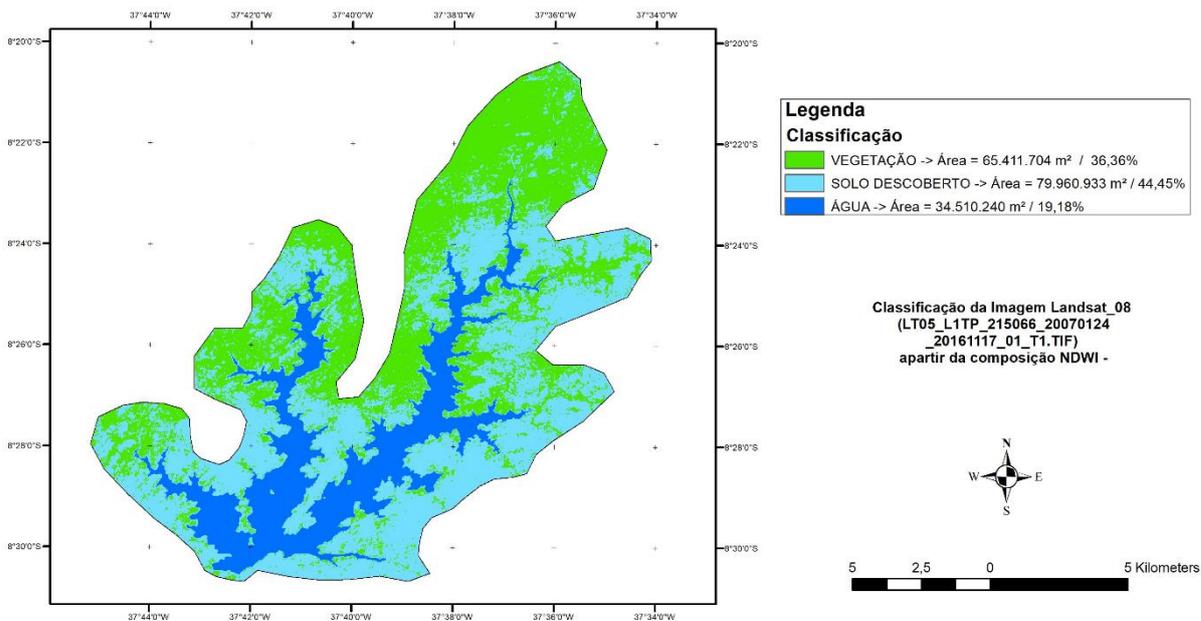
DATA : 2006-09-18



DATA : 2006-12-07

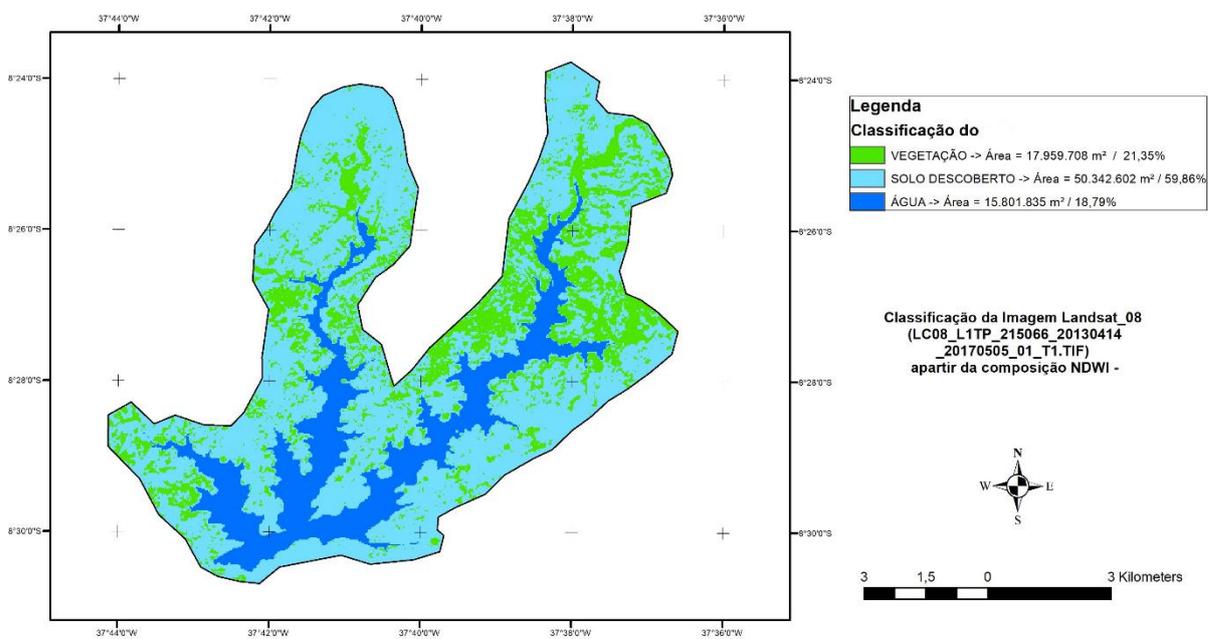


DATA : 2007-01-24

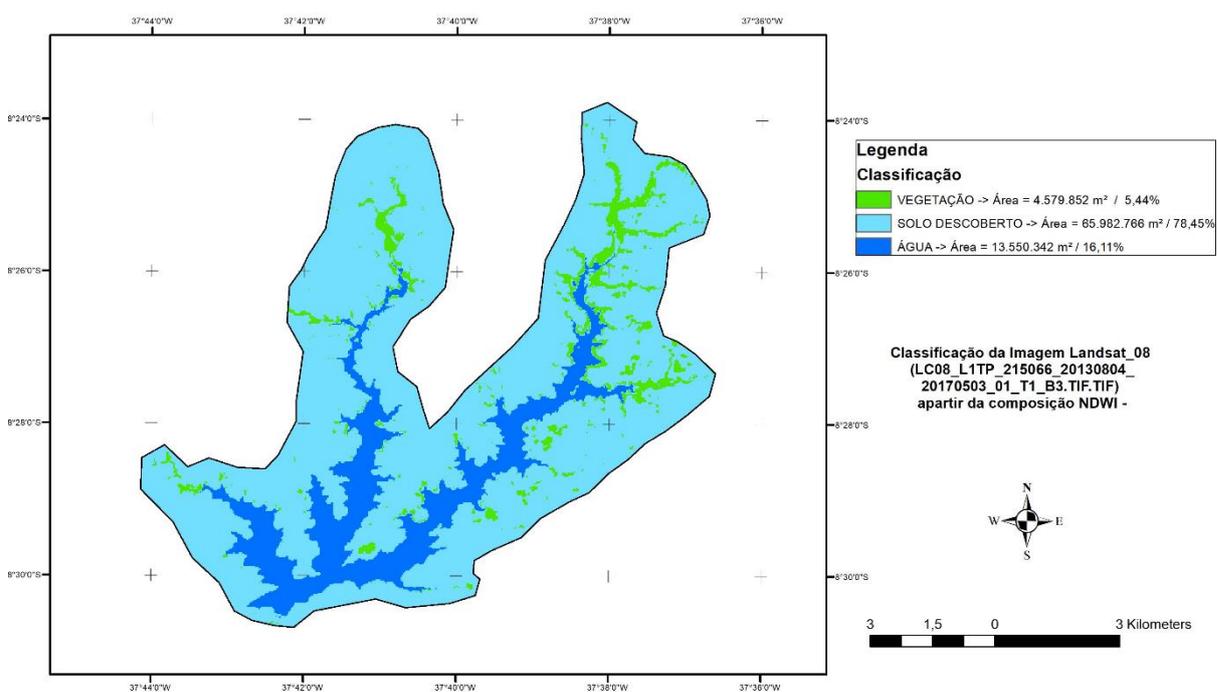


LANDSAT 8

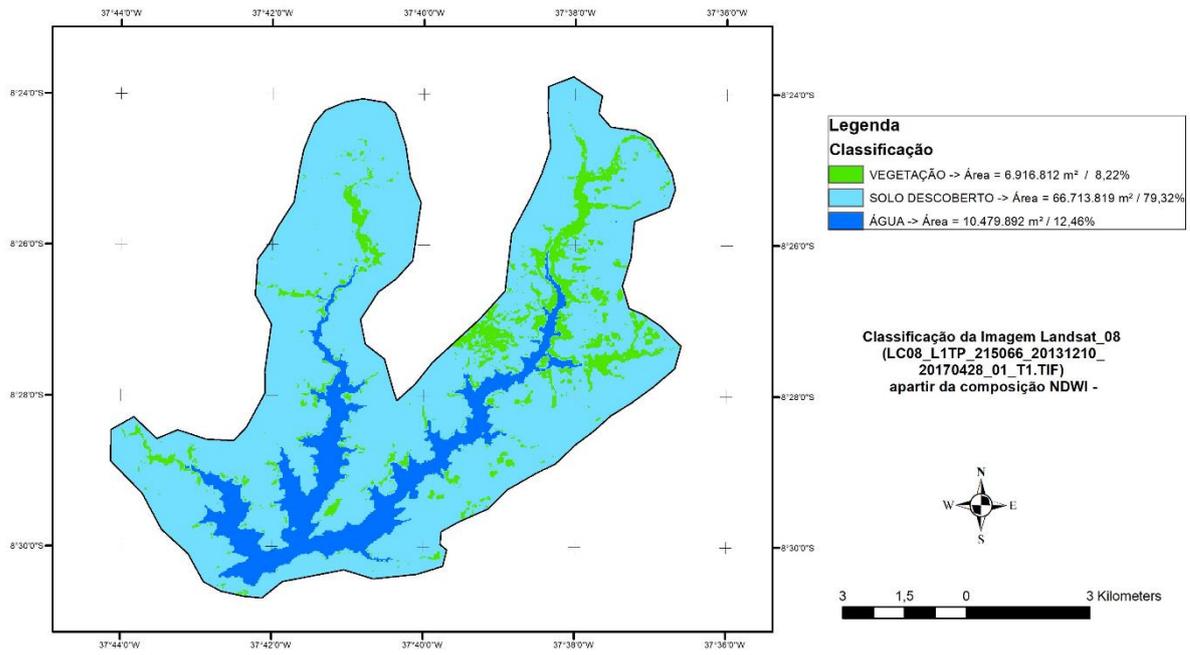
DATA : 2013-04-14



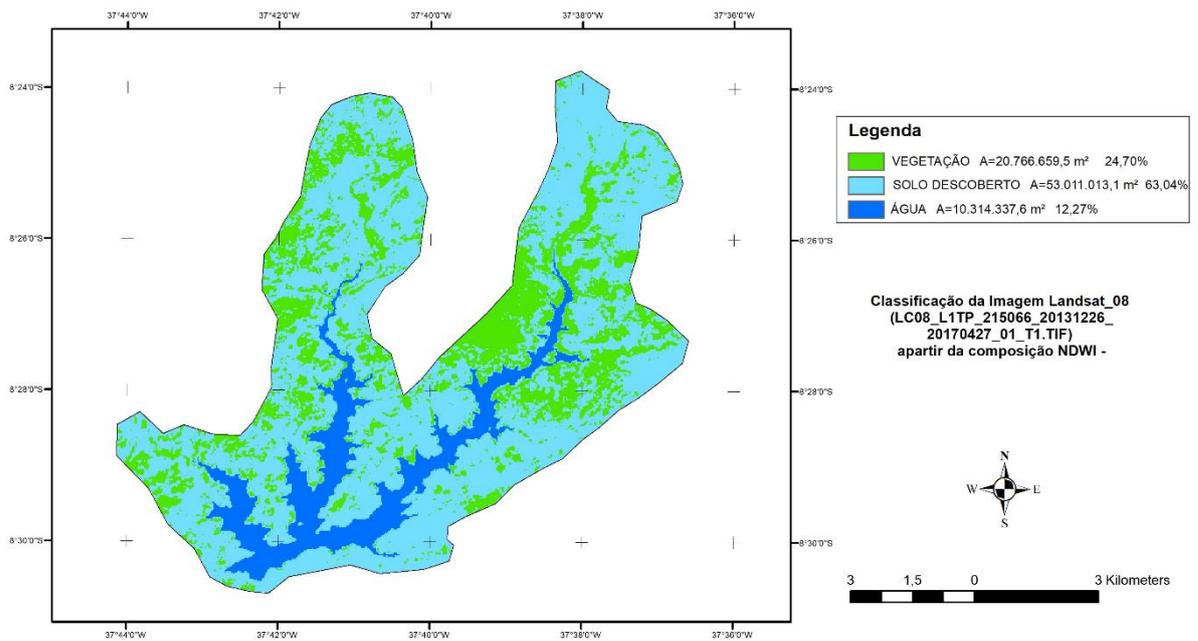
DATA : 2013-08-04



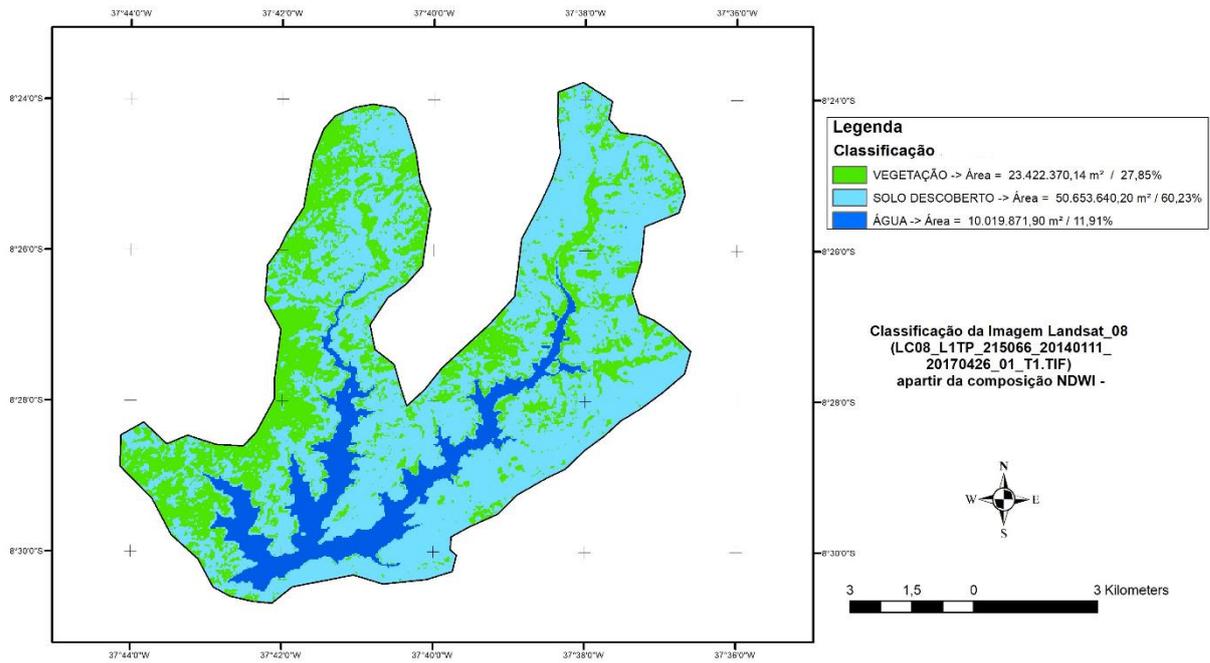
DATA : 2013-12-10



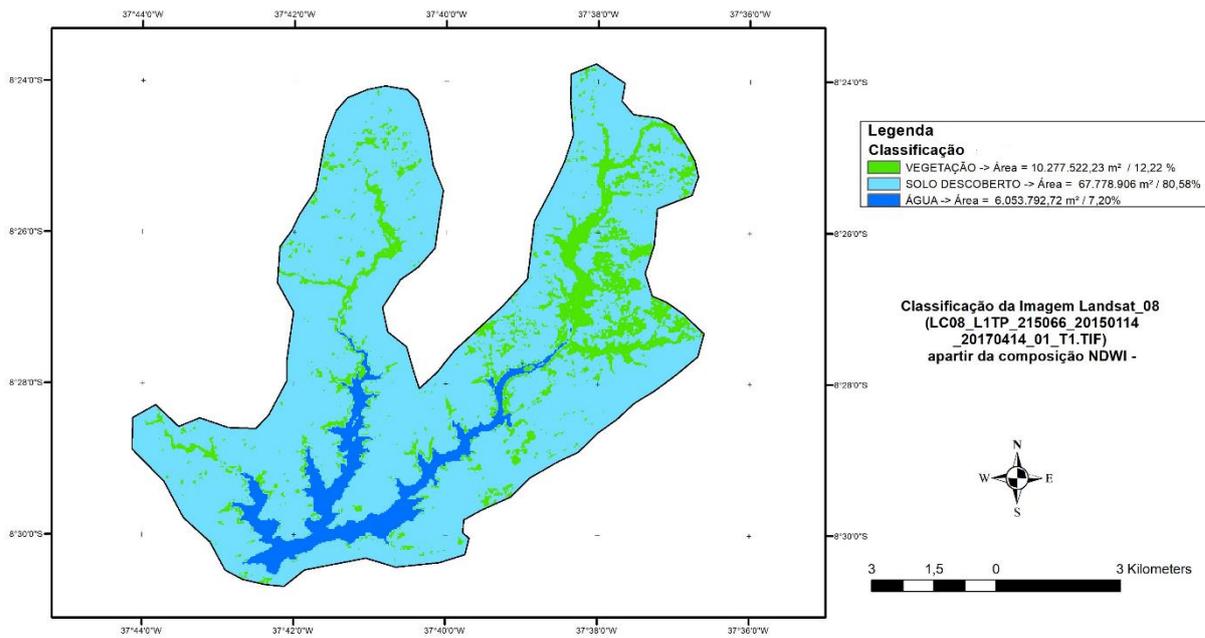
DATA : 2013-12-26



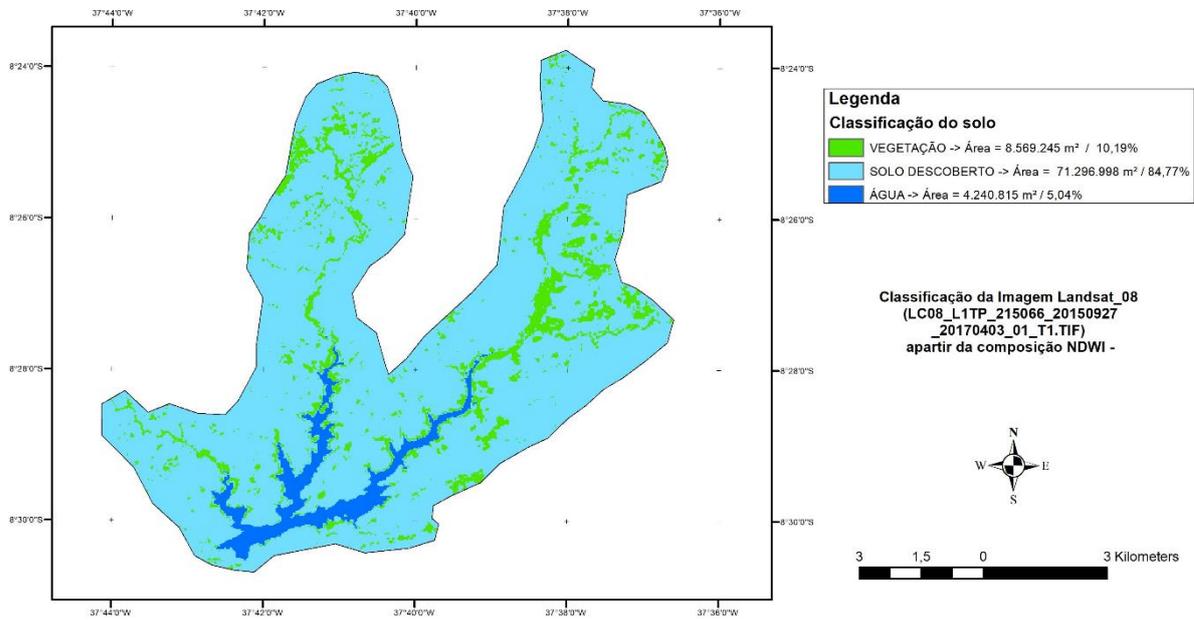
DATA : 2014-01-11



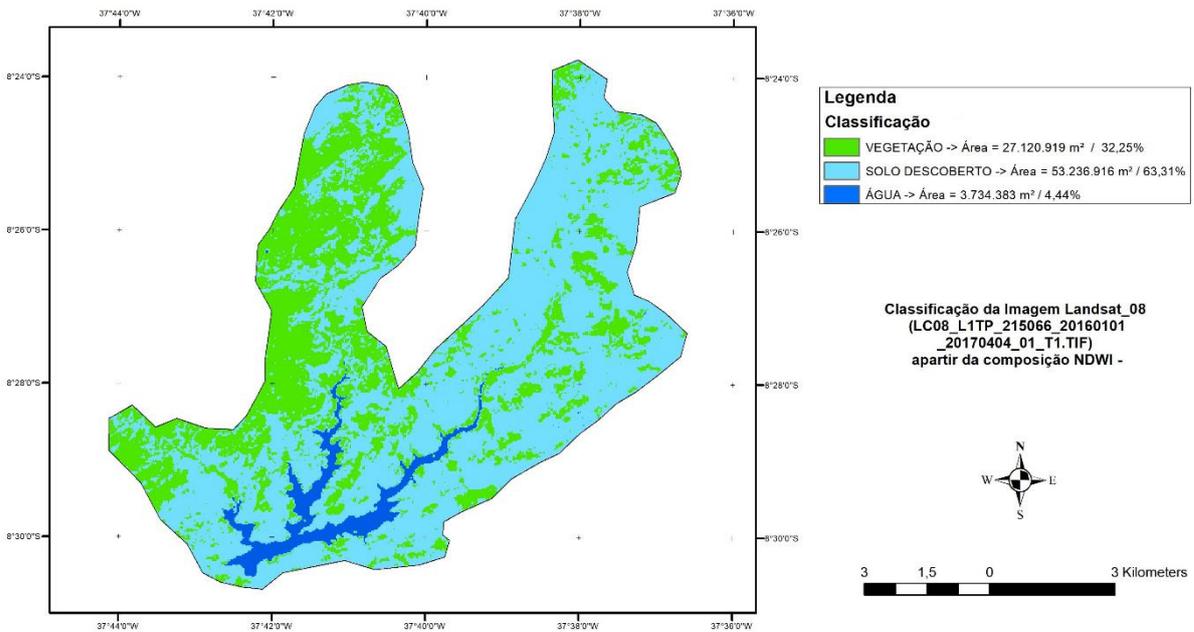
DATA : 2015-01-14



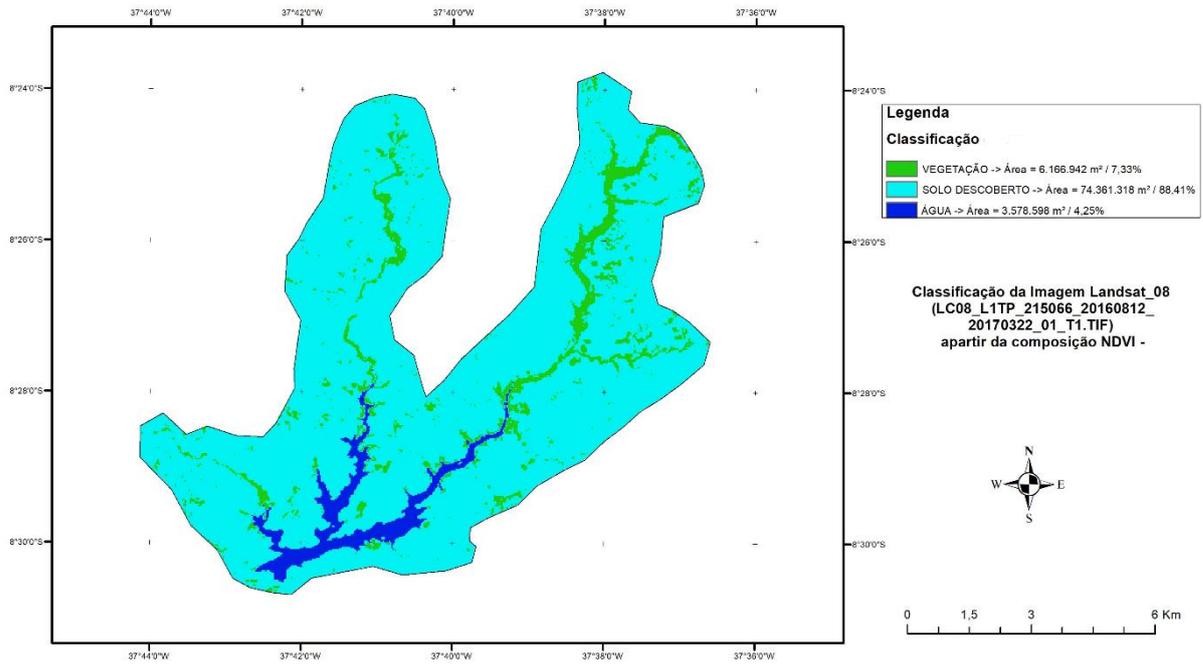
DATA : 2015-09-27



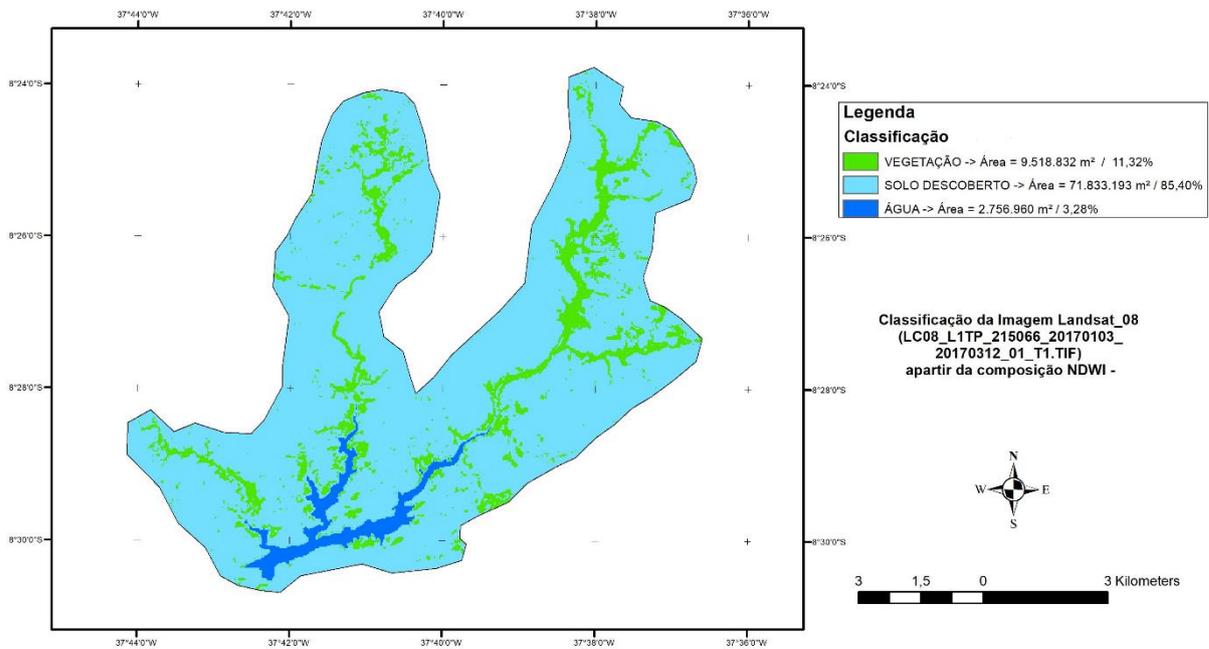
DATA : 2016-01-01



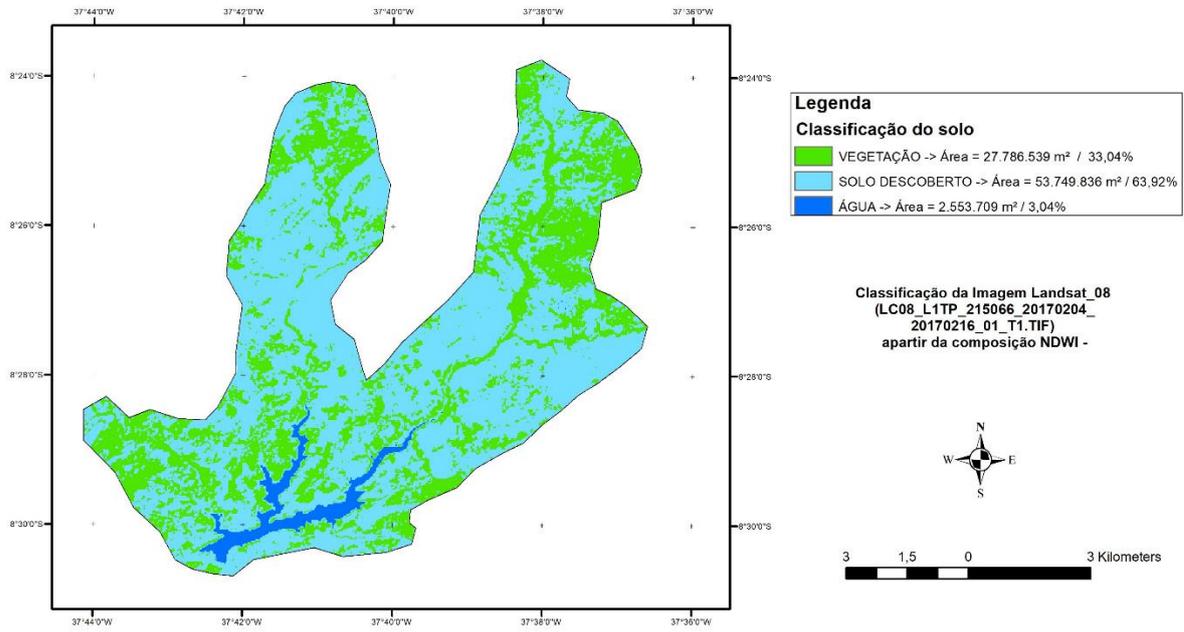
DATA : 2016-08-12



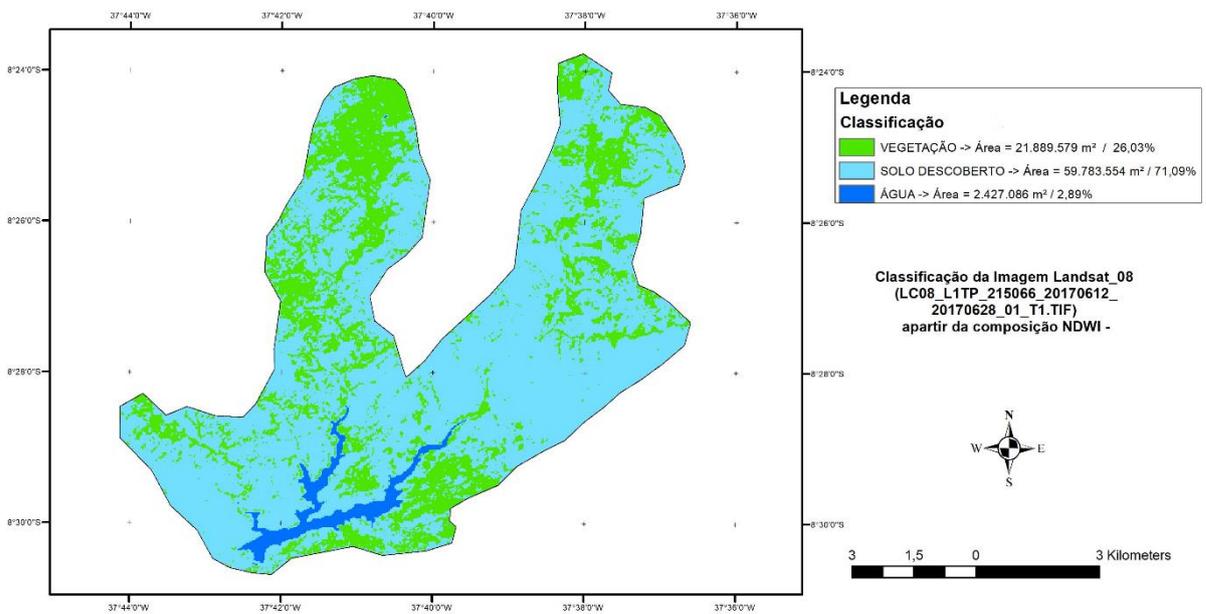
DATA : 2017-01-03



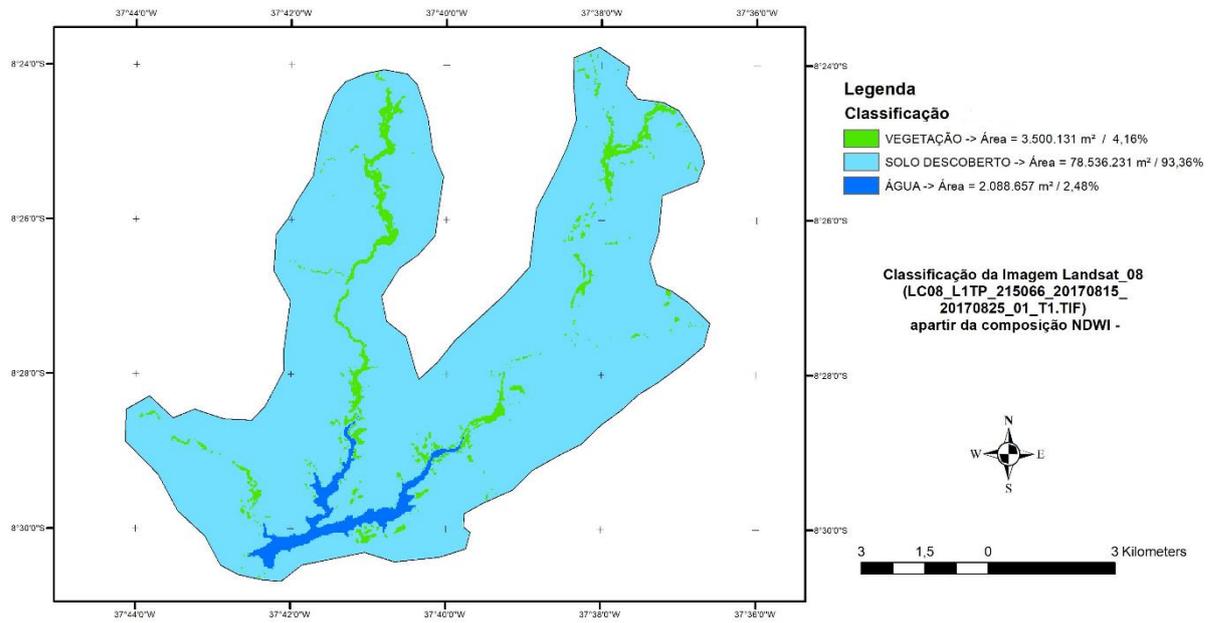
DATA : 2017-02-04



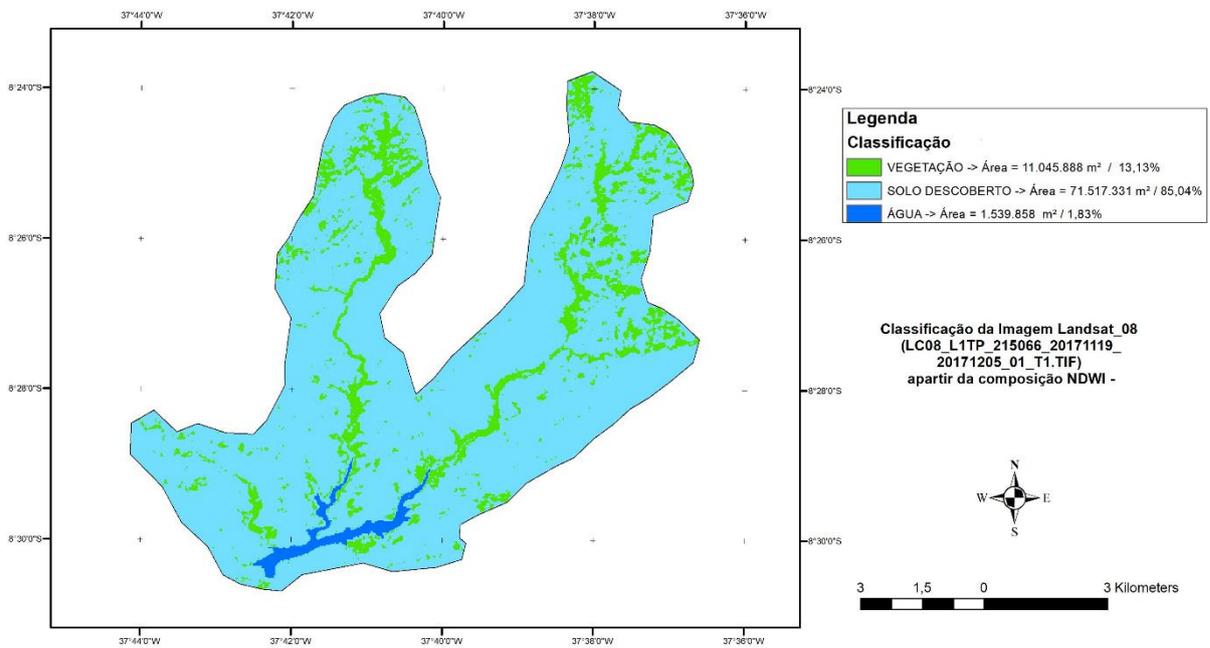
DATA : 2017-06-12



DATA : 2017-08-15



DATA : 2017-11-19



DATA : 2017-12-05

