

LUCIANA DOS SANTOS MACHADO CARVALHO

Altimetria por satélite na determinação do nível de reservatórios hídricos

Luciana dos Santos Machado Carvalho

Altimetria por satélite na determinação do nível de reservatórios hídricos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho

Coorientador: Prof. Dr. Javier Tomasella

C331a	Carvalho, Luciana dos Santos Machado Altimetria por satélite na determinação do nível de reservatórios hídricos / Luciana dos Santos Machado Carvalho – Guaratinguetá, 2020. 108 f : il. Bibliografia: f. 90-95 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020. Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho Coorientador: Prof. Dr. Javier Tomasella 1. Hidrologia. 2. Sensoriamento remoto. 3. Desenvolvimento de recursos hídricos. I. Título. CDU 556(043)
-------	--

LUCIANA DOS SANTOS MACHADO CARVALHO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dra. Ivonete Avila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência



Prof. Dr. ISABEL CRISTINA DE BARROS TRANNIN
UNESP/FEG
participou por videoconferência



Prof. Dr. ALEX OVANDO LEYTON
CEMADEM
participou por videoconferência

Dezembro de 2020

DADOS CURRICULARES

LUCIANA DOS SANTOS MACHADO CARVALHO

NASCIMENTO	09.06.1971 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Nélio Machado Terezinha dos Santos Machado
1990/1992	Curso de Graduação Processamento de Dados – Universidade de Taubaté
1994/1996	Curso de pós-graduação em Técnicas de Computação Avançadas, em nível de especialização lato-sensu, Universidade de Taubaté

dedico este trabalho de modo especial, ao meu
esposo João Henrique e as minhas filhas
Manuela e Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida, sabedoria e graças.

Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

aos meus orientadores, Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho e Dr. Javier Tomasella, que me incentivaram a desenvolver este trabalho. Sem a orientação, dedicação e auxílio deles, o estudo aqui apresentado não teria sido possível;

ao meu esposo João Henrique que me apoiou e me incentivou nos momentos mais difíceis, além de ser compreensível e companheiro quando eu precisava me dedicar por horas ou dias exclusivamente a este estudo;

as minhas filhas Manuela e Fernanda, que são minhas fontes de inspiração e que me dão motivação e força para vencer todos os obstáculos. O apoio e incentivo que me deram fizeram toda a diferença;

a minha amiga Silvia, por ser minha primeira incentivadora a fazer este curso. Por me ajudar a abrir as portas dessa jornada e me fazer acreditar que seria possível;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá, em especial a Juciene, pela dedicação, presteza e principalmente pela disposição em ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e prontidão no atendimento.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

A altimetria espacial é uma tecnologia de sensoriamento remoto que, através do uso de radares altimétricos acoplados em plataformas orbitais, permite registrar a topografia da superfície ao longo da via terrestre do satélite. Esta tecnologia foi utilizada inicialmente para o monitoramento dos oceanos e geleiras, mas por possibilitar a cobertura global, apresenta grande potencial de aplicação em estudos de corpos d'água continentais. Apesar de pouco explorada, existem perspectivas de crescimento com as inovações tecnológicas e os lançamentos de satélites previstos para os próximos anos. O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade das medições altimétricas pelos radares altímetros das missões espaciais SARAL e Jason-2, na determinação dos níveis de reservatórios da região Sudeste do Brasil, a qual apresenta características diferentes das regiões comumente analisadas, como a bacia Amazônica. O estudo foi realizado no período da crise hídrica que atingiu o Estado de São Paulo, entre os anos de 2014 e 2016, quando foram registradas grandes variações dos níveis de água desses reservatórios. Para a validação dos dados altimétricos, foram utilizadas as medidas de níveis de água produzidas pelas estações convencionais (*in situ*) dos reservatórios de Atibainha, Paraibuna e Jaguari-Jacareí comparadas às obtidas pela altimetria espacial, realizada a partir da criação de estações virtuais (EV) e suas respectivas séries temporais, por meio do cálculo do Root Mean Square (RMS). Para o reservatório de Paraibuna os valores RMS foram de 0,20 e 0,82 m para a missão altimétrica SARAL e 0,84 e 1,05 m para a Jason-2; para os reservatórios de Atibainha e Jaguari-Jacareí, os valores de RMS foram de 0,73 m e de 1,13 m respectivamente, ambos para a missão SARAL. Os resultados obtidos com as estações altimétricas virtuais foram similares às registradas pelas estações *in situ*, indicando que as informações da altimetria espacial podem contribuir nos processos de caracterização e monitoramento dos recursos hidrológicos, principalmente em áreas de difícil acesso ao monitoramento. Para divulgar essa informação científica, foi desenvolvido um portal na internet para disponibilização das séries de dados altimétricas obtidas nesse estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Altimetria espacial. Hidrologia. Monitoramento hídrico.

ABSTRACT

Spatial altimetry is a remote sensing technology that, through the use of altimetric radars coupled to orbital platforms, allows to register the surface topography along the satellite's terrestrial path. This technology was initially used to monitor the oceans and glaciers, but because it allows global coverage, it has great potential for application in studies of continental water bodies. Although little explored, there are prospects for growth with technological innovations and the launch of satellites planned for the coming years. The aim of this study was to evaluate the quality of altimetric measurements by the altimeter radars of the SARAL and Jason-2 space missions, in determining the levels of reservoirs in the Southeast region of Brazil, which has different characteristics from the regions commonly analyzed, such as the Amazon basin. The study was carried out in the period of the water crisis that hit the State of São Paulo, between the years 2014 and 2016, when large variations in the water levels of these reservoirs were recorded. For the validation of altimetric data, measurements of water levels produced by conventional stations (*in situ*) of the Atibainha, Paraibuna and Jaguari-Jacareí reservoirs were used compared to those obtained by spatial altimetry, performed from the creation of virtual stations (EV) and their respective time series, by calculating the Root Mean Square (RMS). For the Paraibuna reservoir, the RMS values were 0.20 and 0.82 m for the SARAL altimetric mission and 0.84 and 1.05 m for the Jason-2; for the Atibainha and Jaguari-Jacareí reservoirs, the RMS values were 0.73 m and 1.13 m respectively, both for the SARAL mission. The results obtained with the virtual altimetric stations were similar to those recorded by the *in situ* stations, indicating that the spatial altimetry information can contribute to the processes of characterization and monitoring of hydrological resources, especially in areas with difficult access to monitoring. To disseminate this scientific information, an internet portal was developed to make available the series of altimetric data obtained in this study.

KEYWORDS: Spatial altimetry. Hydrology. Monitoring. Water levels. Reservoirs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Resolução espacial das trajetórias: Jason-2 (vermelho) e SARAL (amarelo)	20
Figura 2 – Componentes do princípio da altimetria por satélite.....	22
Figura 3 - Medidas altimétricas em sistemas hidrológicos continentais	23
Figura 4 – Missões altimétricas a partir dos anos 80.....	33
Figura 5 – Impressão artística do futuro satélite SWOT	36
Figura 6– Instrumentação da missão Jason-2/OSTM.....	38
Figura 7 – Instrumentação da missão SARAL	40
Figura 8 – Trilhas das missões SARAL e Jason-2 sobre os reservatórios estudados.....	42
Figura 9 – Imagem da área do reservatório de Paraibuna, em destaque a barragem e o vertedouro tulipa.....	43
Figura 10 – Trilhas das missões Jason-2 (vermelho) e SARAL (amarelo) sobre o reservatório de Paraibuna	44
Figura 11 – Vista panorâmica do reservatório de Paraibuna (SP).....	45
Figura 12 – Vista panorâmica do reservatório de Atibainha (SP).....	46
Figura 13 – Trilha do satélite SARAL sobre o reservatório de Atibainha (SP)	46
Figura 14 – Trilha do satélite SARAL sobre o reservatório de Jaguari-Jacareí.....	48
Figura 15 – Canal de interligação dos reservatórios Jaguari-Jacareí.....	48
Figura 16 – Vista panorâmica do reservatório Jaguari-Jacareí.....	49
Figura 17– Fluxograma da metodologia utilizada para validação dos dados altimétricos	52
Figura 18 – Visualização da área do reservatório de Paraibuna pelo Google Earth	55
Figura 19 – Áreas definidas para a criação das estações virtuais para o reservatório de Paraibuna	56
Figura 20 – Área da estação virtual do reservatório de Atibainha	57
Figura 21 – Área da estação virtual do reservatório de Jacareí-Jaguari	57
Figura 22 – Processamento dos dados de uma estação virtual (VALS).....	59
Figura 23 – Medições altimétricas georreferenciadas, sobre a área da EV, aplicativo VALS.....	61
Figura 24 – Visualização das medições da missão altimétrica Jason-2	62
Figura 25 – Visualização das medições da missão altimétrica Jason-2	63
Figura 26 – Médias mensais do nível de água do reservatório de Paraibuna, de 2014 a 2016	66
Figura 27 – Médias mensais do nível de água do reservatório de Atibainha, de 2014 a 2016.....	67
Figura 28 – Médias mensais dos níveis do reservatório de Jaguari-Jacareí de 2014 a 2016....	67
Figura 29 – Trilhas do satélite Jason-2, destacando as medições incorretas	69

Figura 30 – Visualização das medições altimétricas pelo programa VALS, destaque para as medidas inconsistentes: a) EV_J001, b) EV_J003	70
Figura 31 – Pontos selecionados para as estações EV_J003 e EV_S003, reservatório de Paraibuna: a) Trilhas do Jason-2; b) Trilhas do SARAL.....	71
Figura 32 – Área das estações virtuais EV_J003 e EV_S003 com os pontos selecionados: a) Trilhas do Jason-2; b) Trilhas do SARAL.....	71
Figura 33 – Série de dados gerada pelo VALS para a EV_J003.....	72
Figura 34 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	77
Figura 35 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados <i>in situ</i> x missão Jason-2.....	77
Figura 36 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	78
Figura 37 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados <i>in situ</i> x missão Jason-2.....	78
Figura 38 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	79
Figura 39 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados <i>in situ</i> x missão Jason-2.....	79
Figura 40 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	80
Figura 41 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados <i>in situ</i> x missão Jason-2.....	80
Figura 42 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	81
Figura 43 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados <i>in situ</i> x missão Jason-2.....	81
Figura 44 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	82
Figura 45 – Comparação dos níveis do reservatório: dados <i>in situ</i> x missão SARAL.....	83
Figura 46 – Aplicação na internet para disponibilização de dados altimétricos dos reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacaré e Paraibuna	86
Figura 47 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J001, do reservatório de Paraibuna	96
Figura 48 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J001 do reservatório de Paraibuna	96
Figura 49 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J002, do reservatório de Paraibuna	97
Figura 50 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J002 do reservatório de Paraibuna.	97

Figura 51 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J003, do reservatório de Paraibuna	98
Figura 52 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d’água da estação virtual EV_J003 do reservatório de Paraibuna.	98
Figura 53 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J004, do reservatório de Paraibuna	99
Figura 54 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d’água da estação virtual EV_J004 do reservatório de Paraibuna.	99
Figura 55 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J005, do reservatório de Paraibuna	100
Figura 56 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d’água da estação virtual EV_J005 do reservatório de Paraibuna.	100
Figura 57 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S001, do reservatório de Paraibuna.....	101
Figura 58 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S001 do reservatório de Paraibuna.....	101
Figura 59 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S002, do reservatório de Paraibuna.....	102
Figura 60 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S002 do reservatório de Paraibuna.....	102
Figura 61 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S003, do reservatório de Paraibuna.....	103
Figura 62 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S003 do reservatório de Paraibuna.....	103
Figura 63 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S004, do reservatório de Paraibuna.....	104
Figura 64 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S004 do reservatório de Paraibuna.....	104
Figura 65 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S005, do reservatório de Paraibuna.....	105
Figura 66 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S005 do reservatório de Paraibuna.....	105
Figura 67 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S006, do reservatório de Atibainha	106

Figura 68 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S006 do reservatório de Atibainha	106
Figura 69 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S007, do reservatório de Jaguari-Jacareí.....	107
Figura 70 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d’água da estação virtual EV_S007 do reservatório de Jaguari-Jacareí.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVISO	Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data
CAST	China Academy of Space Technology
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNSA	China National Space Administration
CTOH	Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère
DORIS	Doppler Orbit Determination Radiopositioning Integrated on Satellite
ENVISAT	Environmental Satellite
ERS	European Remote Sensing Satellite
ERTS-1	Earth Resources Technology Satellite
ESA	European Space Agency
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
GEOS-3	Geodetic and Earth Orbiting Satellite 3
GPS	Global Positioning System
IGDR	Interim Geophysical data record
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISRO	Indian Space Research Organisation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NMM	Nível médio do mar
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PISTACH	Processing for Coastal and Hydrology Products
RANSAC	Random Sample Consensus
RMS	Root Mean Square
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SARAL	Satellite with Argos and AltiKa
SWOT	Surface Water Ocean Topography
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVO.....	18
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	ALTIMETRIA ESPACIAL	19
3.1.1	O princípio da altimetria espacial	20
3.1.2	Medições altimétricas em águas continentais.....	22
3.1.3	Correções das medidas altimétricas.....	23
3.1.4	Estudos de altimetria espacial em águas continentais.....	24
3.1.5	Limitações do uso da altimetria espacial em águas continentais.....	30
3.1.6	Aplicações de altimetria espacial.....	32
3.2	AS DIFERENTES MISSÕES DE ALTIMETRIA ESPACIAL.....	32
3.2.1	As primeiras missões altimétricas	33
3.2.2	Missões altimétricas recentes e atuais.....	34
3.2.3	As futuras missões de altimetria espacial	35
3.2.4	A missão altimétrica Jason-2	36
3.2.5	A missão altimétrica SARAL.....	39
4	MATERIAL E MÉTODOS	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.1.1	Represa de Paraibuna	42
4.1.2	Represa de Atibainha	45
4.1.3	Represa de Jaguari-Jacareí.....	47
4.1.4	Níveis dos reservatórios durante a crise hídrica (2014-2016).....	49
4.2	METODOLOGIA.....	51
4.3	DADOS ALTIMÉTRICOS	53
4.3.1	Definição das estações virtuais.....	54
4.3.2	Criação da base de dados altimétricos.....	58
4.3.3	Análise do perfil hidrológico altimétrico	61
4.3.4	Geração das séries de dados.....	63
4.4	DADOS HIDROLÓGICOS.....	64
4.5	VALIDAÇÃO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS	65
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66

5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6	CONCLUSÃO	89
	REFERÊNCIAS.....	90
	APÊNDICE A - Composição das estações virtuais dos reservatórios estudados .	96

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de valor inestimável. Apesar de sua extrema importância, a água tem sido utilizada em discordância com sua capacidade de renovação natural (POSTEL; REEVE; MCGUIGAN, 2014). Para garantir a continuidade desse recurso, sua utilização deve ocorrer de maneira sustentável, de modo a evitar seu desperdício e sua degradação, haja vista a comprovação que o crescimento da demanda por água, seja para o abastecimento da população ou para atender à crescente cadeia de produção, é desproporcional ao aumento da oferta desse recurso.

Problemas de abastecimento de água têm sido observados em um panorama mundial e no Brasil a situação não é diferente. Mesmo sendo detentor da maior reserva de água doce do mundo, nosso país vem sofrendo ao longo da última década com uma sequência de crises hídricas. Um destes episódios ocorreu entre os anos de 2014 e 2016 e atingiu o estado de São Paulo, causando impactos diretos na economia e no abastecimento da população. Muitas são as especulações sobre as causas dessa seca histórica: variação natural do clima, desmatamento da Amazônia, mudanças climáticas globais, entre outras, mas em geral, pode-se dizer que a crise hídrica é gerada por uma conjunção de fatores como a escassez de chuva e a falta de gerenciamento dos recursos hídricos (MARENGO et al., 2015).

Com muitos usos competitivos da água e poucas políticas de preservação, é essencial o monitoramento dos recursos hídricos existentes. Para melhorar o conhecimento sobre a quantidade e qualidade da água disponível ao longo do espaço e tempo, são requeridas medições detalhadas através de sistemas confiáveis de monitoramento.

Atualmente, a aquisição de dados é realizada por meio do monitoramento hidrológico, a partir de estações de medição instaladas ao longo dos cursos d'água. Estas estações podem ser convencionais ou automáticas, formando uma rede hidrológica. A área de cobertura dessa rede ao longo do território nacional se dá de forma desigual, com uma alta concentração na região leste e baixa densidade nas outras regiões do país (ANA, 2016). Entretanto, está ocorrendo uma diminuição do número de estações em operação, isso se deve em partes à depredação, a dificuldade de coleta dos dados e ao custo inerente de manutenção e operação destas, comprometendo a eficácia do monitoramento feito através da rede hidrológica (CALMANT; SEYLER; CRETAUX, 2009; MAILLARD; BERCHER; CALMANT, 2015).

Nos últimos anos, os satélites de observação da Terra, através do emprego da altimetria espacial (AS), estão se tornando meios importantes para fornecer informações hidrológicas com aceitável resolução espacial e temporal, especialmente em áreas com limitada

infraestrutura (SILVA, 2010). Os dados gerados pela AS são semelhantes aos obtidos de forma convencional e podem ser uma alternativa para minimizar os problemas enfrentados no monitoramento dos recursos hídricos (PEREIRA, 2018), principalmente dos corpos d'água não monitorados e dos localizados em regiões de difícil acesso.

A atual disponibilidade de dados altimétricos, de forma pública e gratuita, apresenta vantagens como a visualização da superfície em escala continental, ampliação das áreas de monitoramento, realização de medidas absolutas de nível, obtenção de dados transfronteiriços e a globalização das informações hidrológicas (PEREIRA, 2018). A AS fornece dados sobre as águas continentais, de maneira eficaz e homogênea, viabilizando a aplicação em estudos nas diversas áreas da hidrologia (FRAPPART et al., 2005; OVANDO; TEJADA; TOMASELLA, 2015; PEREIRA; ABREU; MAILLARD, 2017).

2 OBJETIVO

Avaliar a qualidade das medições altimétricas obtidas pelos satélites das missões SARAL e Jason-2 para determinar os níveis dos reservatórios de Atibainha, Paraibuna e Jaguari-Jacareí, para o período de 2014 à 2016, visando avaliar a viabilidade da aplicação desta técnica para a medição dos níveis de água de reservatórios de médio porte em áreas continentais.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo proposto, foram estabelecidas as seguintes etapas:

- Definir estações virtuais (EV) para as áreas dos reservatórios;
- Construir séries altimétricas de níveis de água para as EV dos reservatórios, a partir dos dados das missões Jason-2 e SARAL;
- Avaliar a precisão das medições altimétricas, comparando-os com medidas realizadas *in situ*;
- Disponibilizar as séries de dados altimétricos geradas pelas estações virtuais, em um portal na internet.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos relacionados à altimetria por satélite, bem como as componentes associadas à determinação do nível dos reservatórios e as correções utilizadas para garantir qualidade das medições altimétricas. Será também apresentado um breve histórico da AS e as principais características das missões altimétricas utilizadas neste estudo.

3.1 ALTIMETRIA ESPACIAL

A altimetria por satélite surgiu no início dos anos 70, com objetivo de obter informações sobre a química, física e a dinâmica das terras continentais, da atmosfera e da biosfera. Nesse mesmo período, iniciaram-se as primeiras medições altimétricas para determinar a topografia e a superfície dos oceanos (SILVA, 2010). Entretanto, somente a partir dos anos 2000, vários grupos científicos no mundo, passaram a utilizar a AS em pesquisas na área de glaciologia e nos estudos de águas continentais como, rios, lagos, planícies de inundação e reservatórios (FRAPPART et al., 2005; CALMANT; SEYLER; CRETAUX, 2009; GETIRANA, 2009; SILVA, 2017).

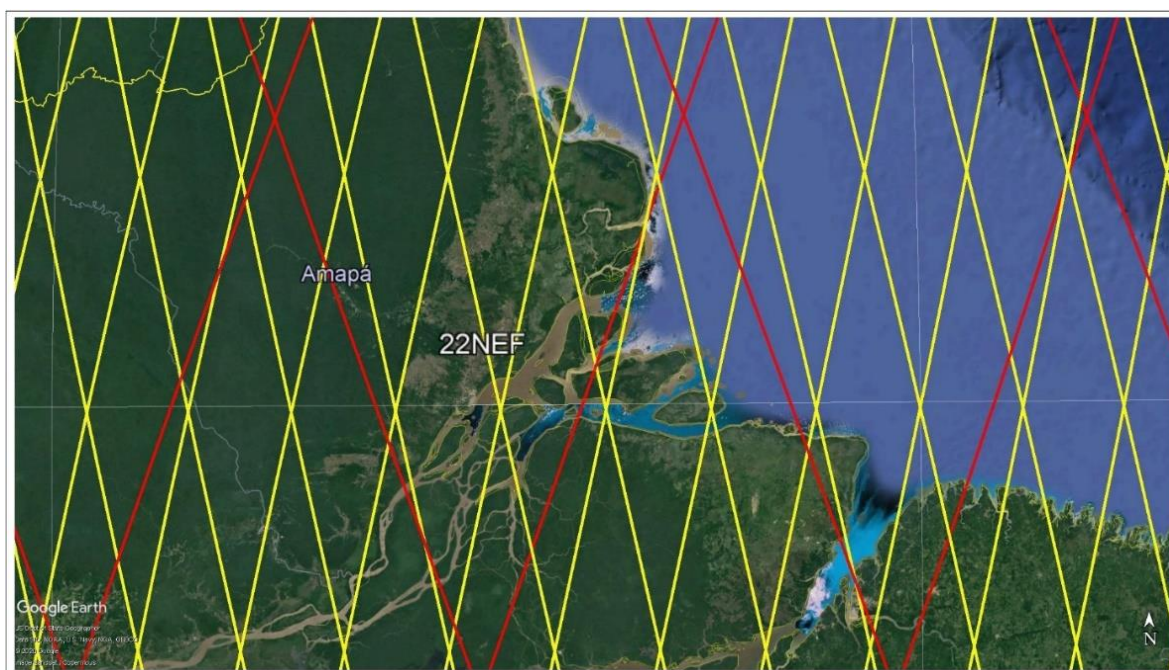
O principal objetivo da AS é medir a distância do satélite em relação a um referencial terrestre. Essa medida é realizada pelos altímetros de radar. Esses instrumentos apontam ao nadir do satélite e determinam, basicamente, a distância vertical do satélite até a superfície de destino, medindo o tempo que um pulso de radar demora para ir do satélite até a superfície e de volta para o satélite, geralmente sobre trilhas pré-definidas (SILVA; FREITAS; DALAZOANA, 2010).

Os radares altimétricos são sistemas ativos que utilizam uma fonte de radiação própria, comumente, oferecem vantagens como medições independentemente das condições meteorológicas, através das nuvens, inclusive com capacidade de penetração ao longo da atmosfera, tanto de dia como de noite (AVISO, 2020). Estes instrumentos utilizam diferentes frequências, sendo que, cada banda de frequência oferece vantagens e desvantagens, como, sensibilidade às perturbações atmosféricas para banda Ku e por sua vez, a banda Ka, melhor observação de gelo, chuva, zonas costeiras e massas terrestres (AVISO, 2020). Em geral, os altímetros de radar calculam a altura instantânea da superfície oceânica com precisão de centímetros (SILVA, 2010).

Os satélites das missões de AS possuem uma cobertura global e repetitividade regular, pois são colocados em órbitas repetidas onde, cada passagem sobre uma dada região ocorre em intervalos regulares de tempo, chamados de ciclos orbitais, estes são caracterizados por um número do ciclo orbital. A cada ciclo, uma completa cobertura da Terra é realizada (CAMPOS et al., 2001). Desta maneira, os dados gerados pela altimetria espacial são adquiridos de forma contínua sobre o globo terrestre, por longos períodos de tempo. Contudo, cada local tem um período de revisita específico, de acordo com a missão do satélite, sendo, um intervalo de 10 dias para a missão Jason-2 e de 35 dias para a SARAL (AVISO, 2020).

A resolução espacial das missões de AS está ligada à distância entre as linhas de passagem do satélite, também chamadas de trilhas ou traços (do inglês track). Igualmente nesse aspecto, cada missão adota uma determinada resolução, assim sendo, a Jason-2 possui uma distância de 315 quilômetros entre suas trilhas, enquanto a SARAL possui uma distância mais curta entre seus traços, com cerca de 75 quilômetros, tendo como referência a linha do Equador, Figura 1, (AVISO, 2020).

Figura 1- Resolução espacial das trajetórias: Jason-2 (vermelho) e SARAL (amarelo)



Fonte: Autora.

3.1.1 O princípio da altimetria espacial

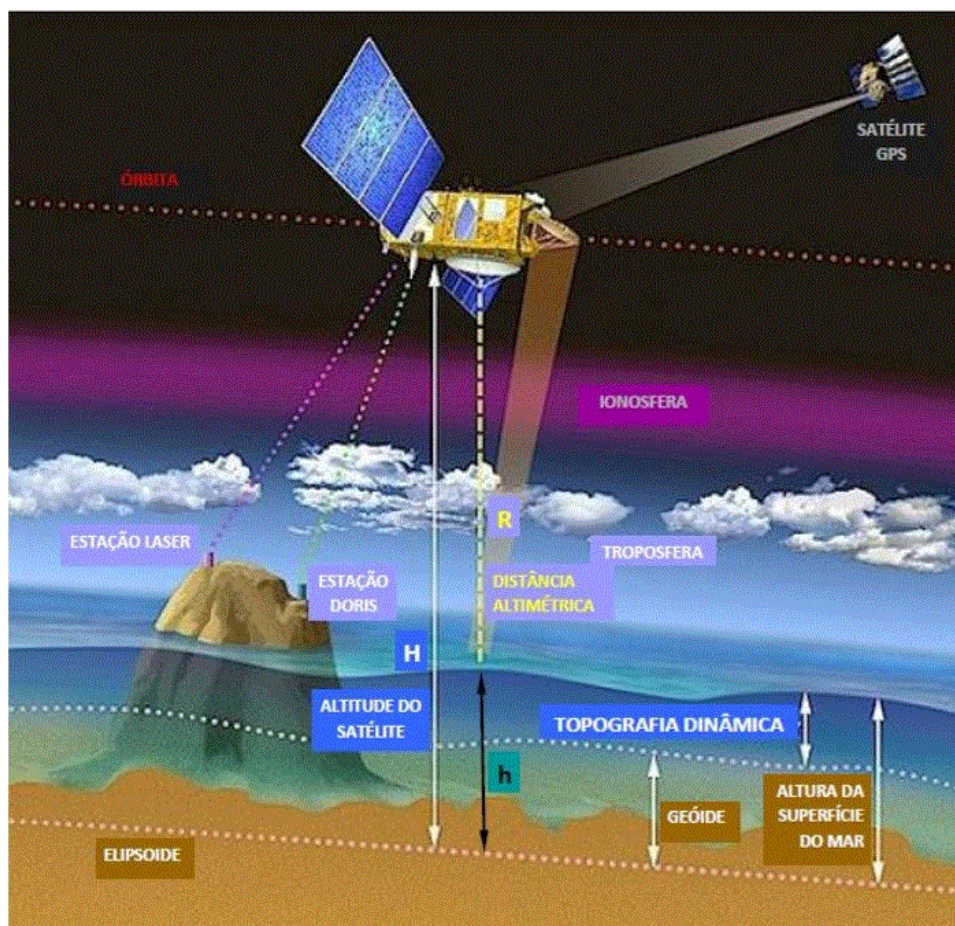
O princípio da altimetria espacial ou altimetria por satélite é relativamente simples, em linhas gerais, utiliza-se um satélite como plataforma para um sensor, chamado de radar altímetro. Este sensor calcula a distância entre o satélite e a superfície abaixo, através emissão de pulsos de energia na frequência das micro-ondas e recebe o sinal de retorno, ou seja, os ecos refletidos pela superfície como oceano, geleiras, desertos, rios ou lagos (ABREU, 2016; MOREIRA, 2010).

Essa distância, também chamada de alcance ou range, possui duas extremidades. Acima, é a posição do satélite conhecida de modo preciso através da sua órbita, referente ao elipsoide, com a contribuição de um ou vários dispositivos de navegação a bordo do satélite como, o Orbit Determination Radiopositioning Integrated on Satellite (DORIS) ou Global Positioning System (GPS) (ABREU, 2016). A posição abaixo, no nadir do satélite, é a elevação absoluta da superfície, seja qual for a cobertura. O cálculo da distância entre essas extremidades é baseado na velocidade do pulso mensurado por meio do tempo de trajeto de ida e volta entre o satélite e a superfície. Neste cálculo são aplicadas diversas correções, incluindo correções da velocidade do pulso devido aos efeitos de refrações ionosféricas e troposféricas, efeitos atmosféricos de propagação e reflexão na superfície e a movimentos da Terra (MOREIRA, 2010; VIGNUDELLI et al., 2011).

A distância entre o satélite e a superfície terrestre é calculada com precisão de centímetros, isso requer medições independentes da trajetória orbital do satélite, ou seja, coordenadas exatas de latitude, longitude e altitude (AVISO, 2020). A determinação precisa da órbita é resultante do uso de sistemas de localização. No caso do sistema francês DORIS, é utilizado um receptor de bi frequência (401,25 MHz e 2036,25 MHz) para absorver um sinal Doppler, proveniente de uma rede de balizas instaladas na superfície terrestre. Esse sistema é capaz de obter exatidão de aproximadamente 1 cm para a componente radial da direção do satélite (DOW; MARTÍNEZ; ZANDBERGEN, 1999).

Os componentes do princípio da altimetria por satélite são apresentados na Figura 2. A altura dos níveis de planos de água oceânicos, representada por h , é obtida pela diferença entre a órbita do satélite em relação a uma superfície matemática de referência (elipsoide) H e a distância altimétrica R , considerando as interações com a atmosfera (CAZENAVE; FU, 2000; COSTI, 2012).

Figura 2 – Componentes do princípio da altimetria por satélite



Fonte: AVISO (2020).

O nível do mar estimado pela altimetria por radar é calculado pela diferença entre a órbita do satélite, ou seja, a distância do satélite em relação a uma superfície de referência (elipsoide) e a distância do satélite até a superfície refletora abaixo, conhecida como nadir do satélite. A equação (1) demonstra como é o cálculo para determinar a altura do nível do mar.

$$h = H - R \quad (1)$$

O elipsoide de referência padrão utilizado é o WGS-84.

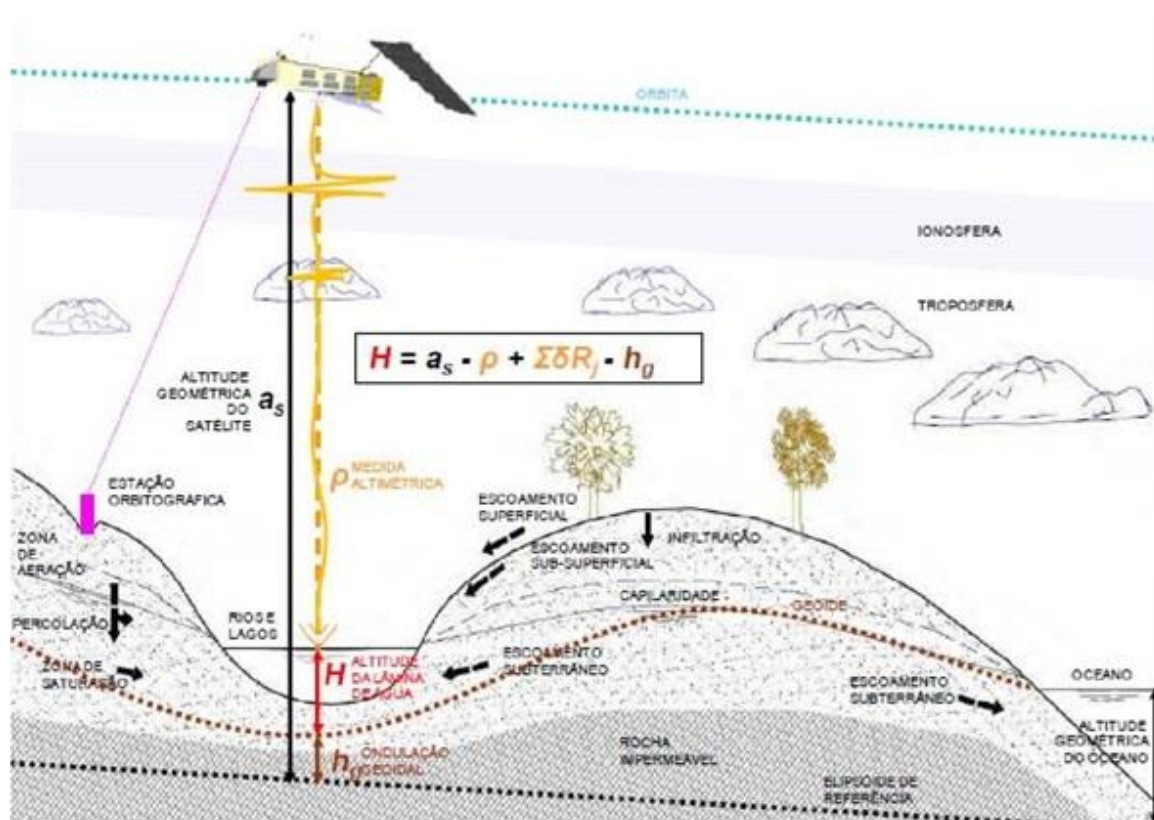
No entanto, essa não é a única medida feita no processo, outras informações podem ser extraídas da altimetria, tal como, as características da superfície refletora obtidas através da magnitude e da forma das ondas (AVISO, 2020).

3.1.2 Medições altimétricas em águas continentais

Segundo Silva (2010), os níveis dos planos de água em áreas continentais (H), são estimados através das medidas altimétricas obtidas pela diferença entre a órbita do satélite em relação a um elipsoide de referência (as), menos a distância altimétrica (ρ) e a ondulação geoidal (hg), somado a correções instrumentais, ambientais ou geofísicas (δR_j), conforme apresentado na equação 2 e Figura 3.

$$H = as - \rho + \sum \delta R_j - hg \quad (2)$$

Figura 3 - Medidas altimétricas em sistemas hidrológicos continentais



Fonte: Silva (2010).

3.1.3 Correções das medidas altimétricas

Ao longo do trajeto de ida e volta do satélite até a superfície terrestre, a radiação radioelétrica emitida pelo altímetro e refletida em seguida pela superfície terrestre, atravessa a atmosfera da Terra sendo retardada pelos conteúdos gasosos ou eletrônicos das diferentes camadas encontradas. Para uma melhor precisão nas medidas altimétricas em águas

continentais, se faz necessária a aplicação de correções para reduzir os erros introduzidos pelos efeitos atmosféricos, geofísicos e instrumentais, os quais podem se traduzir em um alongamento da distância em vários metros (GETIRANA, 2009; SILVA, 2010).

Alguns dos tratamentos corretivos são efetuados pelos centros e agências responsáveis pela operação das missões altimétricas, diretamente no satélite ou na recepção e avaliação dos dados, visando garantir melhor qualidade na informação altimétrica gerada. Os procedimentos de correção realizados após o recebimento dos dados, permitem classificar as informações altimétricas em níveis 1 e 2, denominados, respectivamente, de registros de dados geofísicos intermediários (IGDR) (Interim Geophysical Data Records) e registros de dados geofísicos (GDR). Os dados de nível 1, possuem datas e posicionamentos expressos nas unidades adequadas e correções atmosféricas para variáveis geofísicas como, velocidade do vento, conteúdo da água troposférica e altura significativa das ondas do oceano (AVISO, 2020). Os dados de nível 2, além das correções anteriores, contêm outras para tratamento dos erros instrumentais, os erros de propagação através da atmosfera, as perturbações devidas à reflexão sobre a superfície e as correções geofísicas de deslocamento da Terra em relação ao elipsoide de referência (SILVA, 2010).

Em águas continentais, os sinais altimétricos obtidos são muito diferentes dos observados em regiões de mar aberto, recebendo diversos tipos de ruídos, sendo estes, sugestivos de ilhas, vegetação ciliar e margens. Esses ruídos podem ser minimizados, através do reprocessamento dos dados, fazendo-se uso de algoritmos apropriados, como o ICE-1, ICE-2, ICE-3, RANSAC e Sea-Ice, conhecidos por algoritmos de “*retracking*” (MOREIRA, 2010; SILVA, 2010).

3.1.4 Estudos de altimetria espacial em águas continentais

Nos últimos 10 anos, a altimetria espacial tem sido uma técnica bem-sucedida para monitorar a variação na elevação das águas superficiais continentais, como mares interiores, lagos, rios e, mais recentemente, zonas úmidas. Devido a sua cobertura global, a altimetria por radar apresenta uma série de vantagens auxiliando no entendimento e caracterização de processos hidrológicos, principalmente em áreas continentais de difícil acesso (ABILEAH; VIGNUDELLI; SCOZZARI, 2011; DAMASCENO, 2017; PEREIRA, 2018;).

A aplicação dos dados altimétricos em hidrologia pode ser destacada em diferentes áreas de pesquisa, como modelagem; estudos de vazão; variações de nível de água; planícies de inundação; e, ainda, podem ser utilizados para complementar dados convencionais

produzidos nas estações fluviométricas; na elaboração de perfis altimétricos de rios e para o nivelamento de estações *in situ* (CALMANT; SEYLER, 2006; PEREIRA, 2018; SILVA, 2019). No Brasil, a maioria dos estudos voltados à calibração ou validação dos dados altimétricos concentram-se na bacia Amazônica, devido à sua importância e visibilidade mundial, além da escala dos rios permitirem o uso direto da altimetria por radar. Grande parte desses estudos foram realizados com as medições provenientes das missões altimétricas Topex/Poseidon, Envisat, SARAL Jason-1 e Jason-2 (CALMANT et al., 2013; DA SILVA; CALMANT; SEYLER, 2013; SEYLER et al., 2013; CONCHY et al., 2017).

A validação dos dados altimétricos normalmente é realizada pela comparação com medidas diárias dos níveis de água locais obtidos a partir de uma régua bastante próxima ao traçado de passagem do satélite. Os resultados dessas comparações podem ser influenciados pela falta de uma referência padrão para realização destas medições. Enquanto a medida da estação fluviométrica é realizada em um local geográfico exato, as medidas dos altímetros representam uma média de todas as alturas obtidas da topografia ao longo da trilha da passagem do satélite definida para estação virtual. O tempo também pode influenciar nos resultados, uma vez que a maioria das medidas diárias *in situ* são médias geradas a partir de várias medições realizadas ao longo do dia, enquanto as medições altimétricas são baseadas nas medições obtidas em um único horário, conforme a passagem do satélite.

A grande maioria dos estudos de calibração e validação dos dados altimétricos, utilizam dados de estações convencionais *in situ* para validar as medidas dos altímetros por radar. Para quantificar a qualidade da informação altimétrica, normalmente, utiliza-se a raiz da média dos quadrados (RMS) das diferenças entre os níveis altimétricos e os níveis *in situ*. Esta é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável, útil quando as variações podem ser positivas e negativas.

SILVA (2010) conseguiu avaliar dados de altimetria em sua capacidade de realizar medições hidrológicas, mais especificamente, mensurações de variações volumétricas de áreas úmidas e corpos hídricos na região Amazônia. Esse estudo abrangeu uma extensiva validação de dados altimétricos dos satélites ENVISAT e ERS-2, avaliações essas realizadas utilizando algoritmos de correção ICE-1 e ICE-2. As medições altimétricas foram avaliadas por meio de dois métodos de validação: interna e externa. A validação interna consistia em comparar os dados dos pontos de cruzamento entre as trilhas das missões altimétricas e a validação externa foi realizada comparando as séries temporais altimétricas com os dados das estações *in situ*. A comparação realizada entre os pontos de cruzamento, em sua maioria, tratava-se de dados com maiores diferenças temporal, pois os cruzamentos das trilhas sob o

mesmo corpo d'água ocorrem geralmente em um intervalo de vários dias. Os resultados obtidos da validação interna e externa denotaram erros médios quadráticos, variando entre 12 a 226 cm para o satélite ENVISAT (algoritmos ICE-1 e ICE-2) e de 32 a 197 cm para o satélite ERS-2 (algoritmo ICE-2).

Ricko et al. (2012) analisaram a possibilidade de utilizar os dados de altimetria espacial em conjunto com imagens de satélite para medir o nível de água e a capacidade de armazenamento dos reservatórios. Baseando-se somente em dados e imagens geradas por satélites, eliminou-se a necessidade de levantamentos no solo. Foram geradas duas séries temporais com os dados dos satélites. Porém como esses dados não possuíam a mesma referência temporal, pois cada um possui um intervalo de tempo específico para revisitar o mesmo local, foi feita uma interpolação em uma das séries para que pudessem utilizar os dados na mesma referência. O estudo foi realizado em 18 lagos localizados em diferentes continentes. Visando uma cobertura maior das áreas analisadas, utilizou-se dados de diferentes missões altimétricas como ENVISAT, Jason-1/2, entre outras. Os resultados demonstraram um RMS entre 0,11 e 1,41 m, onde os maiores reservatórios e lagos obtiveram os melhores resultados. Os piores resultados ocorreram para os lagos que congelavam.

Essa característica de obter os melhores resultados para os grandes lagos e reservatórios, ocorre porque em rios ou lagos estreitos não é possível realizar muitas medições ao longo da trilha do satélite, devido ao espaçamento mínimo entre as medições realizadas pelo altímetro em uma mesma trilha. Outros fatores que influenciam os resultados é a presença de vegetação formada pela copa das árvores nos terrenos próximos as margens dos rios e lagos e a presença de uma topografia irregular, produzindo reflexões parasitas que deterioram os ecos do radar. Assim, os rios e lagos mais extensos possuem algumas vantagens na observação por meio dos altímetros de radar.

Costi (2012) analisou dados altimétricos da missão ENVISAT para o período de 2002 a 2008 para a região do rio Madeira, no Amazonas. Foram estabelecidas três estações virtuais para a comparação com os dados das estações fluviométricas da região. Para a definição das áreas das estações virtuais utilizou-se o programa Google Earth. Já a seleção dos dados e a geração das séries temporais altimétricas foram realizadas por meio do aplicativo VALS, que permite identificar os pontos dentro da área de interesse e apresenta os respectivos valores de níveis em cada tempo.

Em seu estudo Costi analisou os períodos de cheias e secas, que possuem um intervalo médio de 180 dias (6 meses). Como o tempo de revisita da missão analisada é de trinta e cinco dias, foi possível obter aproximadamente cinco medições altimétricas por ano, para cada um

dos regimes analisados. Foram criadas séries temporais dos dados altimétricos, geradas a partir da mediana de todos os dados existentes no interior da janela de interesse e associada uma dispersão à mediana, para caracterização da qualidade dos resultados. Antes de realizar as comparações entre os dados altimétricos e fluviométricos, estes foram colocados na mesma referência, calculando a média das diferenças entre essas medidas e somando esse valor as medições registradas pelas réguas fluviométricas. Os resultados da validação dos dados altimétricos obtiveram RMS de 12, 32 e 35 cm para cada uma das três estações analisadas.

Costi observou que o menor valor de RMS pode estar ligado ao fato de a área analisada possuir a menor amplitude de variação de níveis entre os períodos de secas e cheias. Concluiu-se também que as estações que possuíam as maiores variações de níveis foram as que apresentaram os maiores desvios entre os dados altimétricos e os *in situ*, podendo ser relacionados ao estreitamento da área alagada nos períodos de seca, prejudicando a aquisição de dados pelo altímetro e aumentando a possibilidade de ruídos.

O resultado do estudo de Costi (2012) assemelha-se ao de Ricko (2012) onde ambos apresentam os melhores resultados de validação dos dados altimétricos em áreas com as maiores extensões de água.

Seyler et al (2013) realizaram um estudo de validação dos dados de altimetria, analisando uma área da região Amazônica onde os dados convencionais estavam disponíveis, visando estimar o erro potencial cometido na estimativa dos níveis de água por radares altimétricos das missões Topex/Poseidon e Jason-2. A qualidade dos resultados obtidos com Jason-2 foi incomparavelmente melhor do que a obtida com Topex/Poseidon. Apesar de nenhuma calibração absoluta ter sido avaliada neste estudo, o viés calculado para a diferença entre as medidas dos altímetros e das estações *in situ*, ficou em torno de 0,35 m (SEYLER et al., 2013).

Em 2014, pesquisadores da Universidade de Toulouse conduziram um estudo utilizando dados de altimetria por radar combinados com imagens de satélites de alta resolução e dados *in situ*, para determinar o volume de água em pequenos lagos (<100 ha). Como caso de estudo, foi selecionado o lago La Bure localizado no sudoeste da França, utilizado apenas para fins de irrigação agrícola. Foram analisados 3 métodos para estimar as mudanças de volume do lago, o melhor resultado foi produzido pelo método que combina altimetria (medidas do nível do lago) e imagens de satélite da superfície do lago. A ferramenta de visualização VALS foi usada para obter uma seleção refinada dos níveis de água derivados da altimetria, nos quais os outliers foram removidos e os efeitos de “enganchamento” (distorção off-nadir das medições de altimetria ocorrida na transição entre água e terra) provavelmente

corrigidos. Esse método demonstrou ser eficaz para monitorar as variações temporais do lago e confirma o potencial das futuras missões Sentinela e SWOT para monitorar pequenos lagos e reservatórios para aplicações agrícolas e de irrigação (BAUP; FRAPPART; MAUBANT, 2014).

Arsen et al. (2015) analisaram os dados do altímetro de banda Ka da missão SARAL/AltiKa, a qual oferece pegada de radar reduzida em comparação aos altímetros de banda Ku. O estudo foi aplicado em 17 lagos de vários tamanhos, localizados na cadeia andina na América do Sul. As séries temporais dos níveis de água obtidas com o altímetro, foram calculadas e comparadas com observações *in situ*. Como os dados da SARAL são baseados no geóide específico definido para a missão Topex/Poseidon, foi necessário a aplicação de correções geoidais com base no modelo EGM08, para cada trilha da série temporal. Já os dados *in situ* são fornecidos em seu próprio referencial, neste caso, as séries temporais obtidas com altimetria de radar foram ajustadas aos níveis de água *in situ* removendo o viés. O viés foi calculado simplesmente pela diferença entre a média de duas séries temporais. Esse método foi o mesmo utilizado por Costi (2012), para aproximar o referencial das séries de dados altimétrica e *in situ*.

Para cada trilha de altímetro de radar, foram calculados o coeficiente de correlação de Pearson e o erro RMS. Um resultado importante deste estudo foi a conclusão que a missão SARAL/AltiKa tem boa capacidade para medir pequenos lagos até 3,3 km, inclusive em regiões montanhosas. Essa avaliação foi realizada comparando os dados da missão SARAL com os da ENVISAT, que operam nas mesmas trilhas. Do total de 15 séries temporais obtidas com SARAL, 12 foram extremamente bem correlacionadas com as medições *in situ*, com RMS entre 5 e 17 cm. O pior resultado dessas comparações chegou a um RMS de 1,18 m (ARSEN; CRÉTAUX; ABARCA DEL RIO, 2015).

Boergens et al (2016) investigaram o potencial da altimetria por satélite para a estimativa de séries temporais no nível de água em corpos d'água interiores pequenos, onde estão disponíveis apenas poucas medidas acima da superfície da água. Desenvolveram um método usando medições off-nadir para estimar a parábola gerada pelo efeito de enganchamento. Para esse fim, foi utilizado um novo retracker de forma de onda, bem como uma versão adotada do algoritmo RANdom SAmple Consensus (RANSAC). Os resultados evidenciaram que as séries temporais altimétricas resultantes das missões ENVISAT, ERS-2 e SARAL, apresentaram valores de acordo com os dados de medição disponíveis no local, apresentando o valor médio do RMS de 1,22 m, sendo o melhor resultado de 0,34 m e o pior

2,26 m, onde 80% das séries temporais mantiveram um RMS abaixo de 1,5 m (BOERGENS et al., 2016).

Abreu (2016) analisou dados da missão ENVISAT para o período de 2002 a 2010 e da missão SARAL entre 2013 a 2016, tendo como área de estudo o lago do reservatório da Usina Hidrelétrica de Três Marias. Nesse estudo, Abreu apresentou um método que combina altimetria e imagens, ambos gerados por satélite, para criar um modelo no qual o nível e a área podem ser computados um a partir do outro, assim como a variação de volume do reservatório. Para o processamento dos dados altimétricos foi desenvolvido o aplicativo SWGTOOL, permitindo a extração dos dados de altimetria para áreas analisadas. Foram geradas medidas de nível de água para doze pontos diferentes, correspondentes ao ENVISAT e SARAL e a partir destes foram geradas as médias para comparação com os dados *in situ*. A comparação dos dados permitiu observar um desvio sistemático de aproximadamente 0,56 m, que foi posteriormente subtraído dos dados altimétricos. Após essa subtração, Abreu (2016) encontrou erros médios quadráticos de 0,70 m.

Conchy et al (2017) fizeram um estudo semelhante ao de Arsen et al. (2015), validaram os dados altimétricos das missões ENVISAT e SARAL, por meio de comparações das medidas dos pontos de cruzamento das órbitas dos respectivos satélites com os corpos hídricos na região da bacia Amazônica. Verificou-se que os valores de desvio padrão para bacia amazônica variaram entre 0,16 e 1,19 m, em rios com larguras distintas, de 40 m e superior a 6000 m. Distribuíram-se os resultados em três classes com 90% dos resultados apresentando desvio padrão inferior a 40 cm. Observou-se um considerável desempenho melhor do satélite SARAL, para rios estreitos e em regiões de elevação. Supõe-se que essas peculiaridades estejam relacionadas à largura da faixa imageada dos satélites analisados: SARAL de 100 m, enquanto o ENVISAT possui 4 km. Por fim, notou-se que o satélite SARAL se mostra confiável e é fonte de dados importantes, oferecendo a possibilidade da utilização dessas medições como parte de um sistema de monitoramento integrado com os dados *in situ*.

Os resultados dos estudos de Conchy et al (2017) foram similares ao de Arsen et al. (2015), ambos analisaram os dados altimétricos das missões SARAL e ENVISAT visando estimar o nível de água de rios e lagos de diversas dimensões e chegaram à conclusão de que a missão SARAL apresenta melhor capacidade que a ENVISAT para medir rios e lagos de menores extensões inclusive em áreas com elevação.

Pereira (2018) utilizou dados das missões altimétricas ENVISAT, SARAL e Sentinel-3 para a obtenção do nível d'água do rio São Francisco. Foi desenvolvido um método para

seleção e correção dos dados que pudesse ser aplicado de forma sistemática ao longo do rio, utilizando linguagem de programação, arquivos shapefile e banco de dados. Esse método consistiu em critérios específicos e baseava-se em três informações iniciais: coordenada do centro do rio, número da trilha da missão altimétrica que cruza o rio e a distância dos dados ao longo da trilha a partir da coordenada central. As séries de dados altimétricas foram geradas para as estações virtuais definidas nos pontos de cruzamento entre as trilhas dos satélites e o rio. Os dados gerados por altimetria de radar foram comparados com os dados *in situ*, calculando o Erro Médio Quadrático (RMS). Para minimização dos erros dos dados altimétricos, foi utilizado os algoritmos de correção ICE-1 e RANSAC. Ao todo foram criadas 21 estações virtuais e os resultados das comparações dos dados altimétricos com os dados das estações *in situ* apresentaram um erro médio quadrático variando entre 0,22 e 1,16 m.

Silva (2019) validou os dados das missões altimétricas Jason-1/2/3 entre os anos de 2002 a 2018, para a região da bacia Amazônica. Para a elaboração das estações virtuais foi utilizado o aplicativo MAPS, permitindo a seleção e o processamento dos dados altimétricos. O MAPS realiza o cálculo da medida altimétrica com data, latitude, longitude e altitude do plano de água. Para a geração das séries temporais das estações virtuais, Silva optou por utilizar as medianas das medidas altimétricas e associar uma dispersão à mediana, calculada pelo desvio absoluto da mediana, o mesmo utilizado por Silva (2010). Em seu estudo, Silva (2019) elaborou dois tipos de validação dos dados altimétricos, externa e interna. A validação externa é realizada comparando os dados altimétricos com os dados obtidos das estações limimétricas instaladas nas áreas analisadas e a validação interna que corresponde a comparação das estimativas altimétricas de níveis de água nos pontos de cruzamento de dois traços das missões Jason-1/2/3, todas estas comparações foram avaliadas por meio do cálculo do RMS. Os resultados foram similares às séries temporais das estações linimétricas, com valores de RMS abaixo de 0,40m para todas as estações, tanto na validação externa e interna dos satélites Jason-1/2/3.

3.1.5 Limitações do uso da altimetria espacial em águas continentais

Embora o uso desta tecnologia venha apresentando grandes avanços em diferentes áreas de estudos e aplicações hidrológicas, as medições altimétricas apresentam algumas limitações. A principal delas está ligada à baixa resolução temporal, limitada ao período de amostragem das missões por satélite, normalmente de alguns dias, destacando a resolução temporal de 35

dias para a SARAL e de 10 dias para a Jason-2. Esta baixa resolução temporal limita os estudos que necessitam de amostragens dinâmicas e de curto período, como é o caso de monitoramento de grandes cheias e análise da continuidade de fortes estiagens (SILVA, 2010, 2017).

A aquisição de dados não é afetada pelas condições climáticas, porém pode encontrar algumas limitações para recuperar dados com precisão dependendo do tamanho do alvo, da rugosidade da superfície e em topografias com variação rápida (terrenos complexos) (CRETAUX; BIRKETT, 2006).

Outro fator limitador é a incerteza, pois o erro das medições em águas interiores pode variar de poucos centímetros a alguns metros (MAILLARD; BERCHER; CALMANT, 2015; PEREIRA, 2018). Entretanto, ressalta-se a existência de inúmeros estudos para a validação dos métodos de tratamento dos dados altimétricos, com o objetivo de melhorar a confiabilidade e diminuir o nível de incerteza dos resultados.

CRETAUX et al. (2013) em seus estudos realizados no lago Issykkul, na Ásia Central, comprovaram a existência de erros sistemáticos nos dados de altimetria da ENVISAT, missão anterior a SARAL, que utilizava a mesma órbita. Esses erros foram calculados com a utilização de equipamentos de GPS da rede local, GPS móvel ao longo das trilhas dos satélites sobre o lago, medidores de nível *in situ* e estações meteorológicas. Crétaux et. al. (2013) mostraram que ao longo do Lago Issykkul há diferentes vieses que tiveram que ser considerados para os diferentes algoritmos de rastreamento propostos nos dados do Envisat. Foi encontrado um viés na faixa de $62,1$ e $63,4 \pm 3.7$ cm com o algoritmo Ice-1 e entre $46,9$ e $51,2$ cm com o algoritmo de correção Ocean, todos aplicados aos dados do Envisat sobre o Lago Issykkul.

Calmant et al (2013), utilizando dados de medidores colocados em 39 regiões da bacia Amazônica, todos estes referenciados ao geoide EGM08 através de GPS, calcularam, pela primeira vez, erros sistemáticos do satélite ENVISAT (mesma órbita do SARAL), para os rios amazônicos. O viés resultante da altimetria recuperada do ENVISAT utilizando o algoritmo ICE-1, ficou entre $0,212$ e $1,044$ m (CALMANT et al., 2013).

Moreira (2016) observou a inexistência de uma referência altimétrica comum entre a régua e o dado de altimetria, impossibilitando a detecção de erros sistemáticos, os quais podem estar contidos no dado de altimetria espacial e podem afetar, de forma significativa, a análise de dados de altimetria. Neste estudo, Moreira (2016) analisou a diferença entre a altitude determinada para várias estações convencionais da região Amazônica e a estimada pelo satélite, com a utilização de sistemas de GPS para reavaliar a altitude definida para as

estações. Os resultados encontrados dessa análise foi uma grande variação da altitude dos pontos observados, desde 1 cm até 89 cm, totalizando para todas as amostras analisadas uma média de 14 cm (MOREIRA, 2016).

3.1.6 Aplicações de altimetria espacial

Com o desenvolvimento da AS e a possibilidade de aplicações em diversas áreas, surgiram várias iniciativas ao redor do mundo, com a finalidade de difundir os conceitos de AS, bem como, expandir as áreas de atuação. O CNES da França, um dos precursores em AS, criou o portal AVISO, onde são disponibilizadas informações de várias missões de altimetria por satélite e produtos gerados por diversos projetos abrangendo as diferentes áreas de atuação da altimetria espacial (i.e., oceanografia, hidrologia, glaciologia).

No Brasil, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), responsável pela coordenação de uma grande rede de estações de monitoramento hidrológico distribuídas pelo país e, habituada a encontrar problemas no desempenho de suas atividades, como os elevados custos de instalação e monitoramento convencional e a existência de lacunas temporais e espaciais no monitoramento, compreendeu que os significativos avanços na área de sensoriamento remoto, proporcionam a produção de valiosas informações hidrológicas com baixo custo financeiro.

À vista disso, a ANA em parceria com o Institut de Recherche pour le Développement (IRD), instituto francês com destaque no campo da altimetria espacial em hidrologia, desenvolveram um projeto pioneiro, o HidroSat (ANA), onde foram criadas algumas estações de monitoramento hidrológico por satélite, denominadas estações virtuais (EV). Para ratificar a qualidade do monitoramento das estações virtuais, os dados foram validados por meio da comparação com dados de estações reais, de sua própria rede, situadas a montante ou a jusante das EVs. Neste projeto, foram utilizados dados dos satélites ENVISAT, SARAL, JASON-2 e JASON-3, com o enfoque principal na região amazônica. No desenvolvimento desse projeto, houve também a colaboração de outros institutos de pesquisas e universidades. Neste portal, podem ser consultados dados de 195 estações altimétricas definidas para a América do Sul, estas localizadas, em sua grande maioria, na região amazônica. Destaca-se a presença de uma única EV estabelecida na região sudeste do Brasil.

3.2 AS DIFERENTES MISSÕES DE ALTIMETRIA ESPACIAL

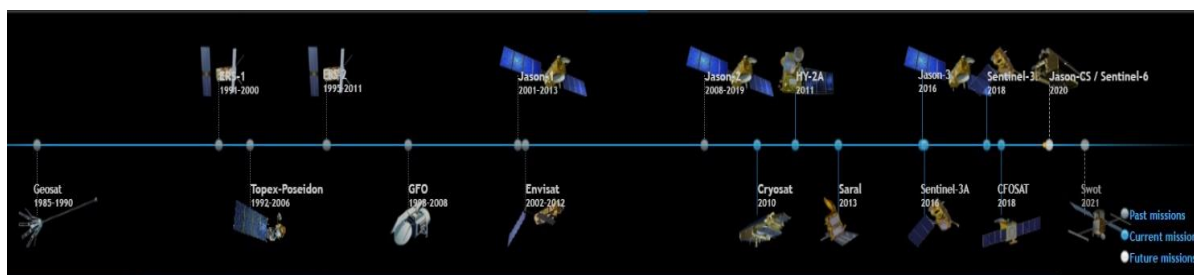
3.2.1 As primeiras missões altimétricas

Em 1973, um primeiro radar altímetro, acoplado a título experimental no satélite Skylab, permitiu a observação das ondulações do geoide associadas às grandes fossas oceânicas, evidenciando, assim, as potencialidades da altimetria por satélite na geofísica. Os Estados Unidos foram os primeiros a lançar um altímetro a bordo de um satélite, iniciando com o Skylab e na sequência os satélites GEOS3, em 1975 e Seasat, em 1978. Este último, lançado pela NASA, é reconhecido pela comunidade científica como o primeiro satélite a alcançar um grau tecnológico satisfatório em relação ao nível de ruído do radar altimétrico (inferior a 10 cm) para o estudo dos oceanos. Todos esses satélites possuíam a missão de realizar a medição da altitude para atender as demandas das áreas da Geodésia e Oceanografia.

Entre os anos de 1980 e 2000, iniciou-se a colaboração entre agências internacionais europeias e norte americanas, como NASA e o CNES, viabilizando investimentos significativos e o lançamento de várias missões (Figura 4), iniciando pelo satélite Geosat em 1985, seguido pelo satélite TOPEX/Poseidon (TOPography EXperiment), entre 1992 e 2003 e seus sucessores Jason-1 (2001-2013) e Jason-2 (2008-2019), esta família de satélites desenvolvida especificamente para estudos dos oceanos.

Neste mesmo período, foi concebida pela Agência Espacial Europeia (European Spatial Agency - ESA) uma outra família de satélites ERS (European Remote Sensing satellite) com períodos de duração entre 1991 e 1996 para o ERS-1 e de 1995 a 2003 para ERS-2 e finalizando com o ENVISAT (Environmental Satellite) entre 2002 e 2012. Esta família de satélites foi desenvolvida com foco nos estudos dos oceanos e de terras submersas, permitindo sob certas condições, a aquisição de medidas mais confiáveis nos continentes e calotas polares.

Figura 4 – Missões altimétricas a partir dos anos 80



Fonte: AVISO (2020).

3.2.2 Missões altimétricas recentes e atuais

Nos últimos 20 anos, a evolução da altimetria por satélite foi marcada pelos sucessivos avanços nas especificações dos altímetros e em tecnologias de posicionamento e de obtenção dos dados, contribuindo para a melhoria da qualidade das medições (PEREIRA, 2018). Apesar da principal aplicação da altimetria espacial ser o estudo do oceano, este progresso permitiu a realização de vários estudos em águas continentais, sobretudo na Região Amazônica (FRAPPART et al., 2005; GETIRANA, 2009; SILVA, 2010; ABILEAH; VIGNUDELLI; SCOZZARI, 2011, OVANDO et al., 2018).

Missões mais recentes, como a CrySat-2, desde 2010; SARAL, desde 2013; a Sentinel-3A, em 2016 e a missão Jason-3 iniciada em 2016, garantiram a continuidade das medições das missões antecessores das mesmas famílias de satélite. Outras informações sobre as missões altimétricas, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das missões altimétricas

(continua)

SATÉLITE	AGÊNCIA	LANÇAMENTO	ALTÍMETRO	BANDA	REVISITA
GEOSAT	US Navy	1985	-	-	17 dias
ERS-1	ESA	1991	RA	Ku	35 dias
TOPEX/POSEIDON	NASA e CNES	1992	NRA/SSALT	Ku e C	10 dias
ERS-2	ESA	1995	RA	Ku	35 dias
GFO	US Navy e NOAA	1998	-	-	17 dias
JASON-1	CNES e NASA	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 e NOAA	2008	Poseidon-3	Ku e C	10 dias
CRYOSAT-2	ESA	2008	Siral	Ku	369 dias
HY-2A	CAST	2011	-	Ku e C	14 dias
SARAL	CNES e ISRO	2013	AltiKa	Ka	35 dias
JASON-3	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA	2016	Poseidon-3B	Ku e C	10 dias
SENTINEL-3A	ESA	2016	SRAL	Ku e C	27 dias
SENTINEL-3B	ESA	2018	SRAL	Ku e C	27 dias
ICESAT-2	NASA	2018	Laser	-	-

Tabela 1 – Características das missões altimétricas

(conclusão)

SATÉLITE	AGÊNCIA	LANÇAMENTO	ALTÍMETRO	BANDA	REVISITA
CFOSAT	CNSA CNES	2018	SWIM / SCAT	Ku	13 dias
JASON-CS	CNES, ESA, NASA, EUMETSAT e NOAA	2020	Poseidon-4	-	10 dias
SWOT	CNES, NASA, CSA e UKSA	2021	Karin	Ka	1/21 dias

Fonte: AVISO (2020).

3.2.3 As futuras missões de altimetria espacial

Para o futuro próximo, há missões sendo planejadas, algumas para dar continuidade as existentes e outras inéditas. Entre as missões aguardadas, podemos citar a SWOT (Surface Water Ocean Topography), realizada em cooperação entre NASA, CNES, a Agência Espacial Canadense e a Agência Espacial do Reino Unido, programada para 2021 e a missão Jason-CS que é resultado da cooperação internacional entre ESA, EUMETSAT, NOAA, CNES e NASA/JPL (AVISO, 2020).

A missão Jason-CS/Sentinel-6 com dois lançamentos previstos, sendo o primeiro para 2020 (Jason-CS/Sentinel-6A) e o segundo para 2025 (Jason-CS/Sentinel-6B), é prenunciada como um "*divisor de águas*", pois garantirá o prosseguimento da missão da família de satélites Jason, dando continuidade as medições do nível do mar e de águas continentais até pelo menos 2030. Essa sequência de missões permitirá a criação de uma base de dados histórica de quase 40 anos de medições contínuas da elevação do nível do mar global, das mudanças nas correntes e condições oceânicas (vento e ondas), entre outras informações (Jet Propulsion Laboratory)].

A missão SWOT tem como objetivo atender as comunidades de hidrologia terrestre e de oceanografia, focadas em uma melhor compreensão dos oceanos e das águas continentais de superfície. É previsto que essa missão altimétrica faça um levantamento de 90% da água da superfície da Terra, observe os detalhes da topografia da superfície do oceano e analise as mudanças ao longo do tempo dos oceanos, lagos, rios e reservatórios. Ao usar tecnologia inovadora, a SWOT medirá os recursos oceânicos com 10 vezes a resolução das tecnologias atuais (National Aeronautics and Space Administration).

Nos primeiros seis meses após o seu lançamento, previsto para 2021, o satélite estará em fase de amostragem rápida com uma órbita de repetição de 1 dia a uma altitude de 857 km. Este período inicial se concentrará em alcançar os objetivos de calibração e validação enquanto estuda alguns fenômenos naturais de variabilidade temporal alta. A segunda fase, com duração prevista de três anos, terá uma órbita de repetição de 21 dias para equilibrar a cobertura global e a amostragem frequente. Essa órbita não síncrona ao sol foi escolhida para minimizar o alias das marés e garantir a cobertura dos principais corpos d'água em terra. A faixa de 120 km de largura da SWOT (Figura 5) resultará em medições sobrepostas na maior parte do mundo, com um tempo médio de revisita de 11 dias. Essas medições precisas, fornecerão à comunidade científica uma melhor compreensão da dinâmica dos oceanos do mundo e a caracterização dos ciclos das águas superficiais terrestres, permitindo abordar questões globais importantes, como o desafio das mudanças climáticas e o gerenciamento sustentável da água como recurso estratégico.

Figura 5 – Impressão artística do futuro satélite SWOT



Fonte: NASA-SWOT (2020).

3.2.4 A missão altimétrica Jason-2

A Ocean Surface Topography Mission (OSTM) conduzida sobre o satélite Jason-2 é uma missão internacional de satélite de observação da Terra desenvolvida em colaboração entre a European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) da União Européia, o Centre National d'Études Spatiales (CNES) da França, a National Aeronautics and Space Administration (NASA) e a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), ambas norte-americanas.

As fases de projeto até a operação do satélite Jason-2 foram divididas entre esses centros, sendo que, o CNES forneceu a espaçonave e os instrumentos, estes em colaboração com a NASA. O Programa de Serviços de Lançamento da NASA no Centro Espacial Kennedy foi o responsável pelas operações de gerenciamento e de lançamento, enquanto NOAA e EUMETSAT foram os responsáveis pela geração dos produtos e a distribuição deles aos usuários (AVISO, 2020).

A missão Jason-2 foi uma continuação da missão franco-americana Topex/Poseidon, designada a coletar dados sobre o nível da superfície do mar em 1992 e continuada em 2001 pela missão Jason-1 da NASA/CNES. Esta sequência de missões, permitiu o registro de medições multi-decadal relativo à altura da superfície do mar e a entender melhor como a circulação oceânica e as mudanças climáticas estão relacionadas.

A Jason-2 é uma missão de altimetria de alta precisão e carrega o mesmo tipo de carga útil de seus dois antecessores, composta por oito instrumentos (Figura 6), descritos a seguir:

- altímetro Poseidon-3: principal instrumento da missão, mede com precisão a distância do satélite à superfície do oceano;
- o radiômetro AMR: mede a quantidade de vapor de água na atmosfera, evitando distorções das medidas do altímetro;
- três sistemas de localização DORIS, LRA e GPSP, que combinados entre si, possibilitam medir a posição precisa do satélite em órbita;
- três instrumentos experimentais Carmen-2, LPT e T2L2, estes a bordo para estudar as radiações no ambiente de satélite, medir o atraso no caminho do laser e permitir melhorar a qualidade e a precisão dos dados.

O principal instrumento, o altímetro de radar Poseidon-3, foi derivado do altímetro Poseidon-2 do Jason-1. É um instrumento compacto, de baixa potência e massa, oferecendo um alto grau de confiabilidade. O Poseidon-3 emite pulsos em duas frequências (13,6 e 5,3 GHz), a segunda frequência é usada para determinar o conteúdo de elétrons na atmosfera. O tempo de ida e volta do sinal é estimado após a aplicação das correções, com muita precisão.

O Poseidon-3 está acoplado ao sistema de localização DORIS, a fim de melhorar as medições em áreas costeiras, águas interiores e geleiras. (AVISO, 2020).

Desde meados de 2008 a outubro de 2016, o Jason-2 esteve localizado na mesma órbita (1.336 quilômetros da Terra) do Jason-1, com uma inclinação de 66 graus em relação ao Equador, repetindo sua trilha terrestre a cada 10 dias, cobrindo 95% dos oceanos sem gelo do mundo. A partir de outubro de 2016 (no final do ciclo 303 e até o ciclo 327), após mais de sete anos de serviço nessa órbita, foi direcionado para a órbita intercalada usada pelo Topex entre 2002-2005 e Jason-1 de 2009-2012. Em Julho de 2017 (início do ciclo 500) o Jason-2 foi alterado para operar em uma nova órbita de repetição longa (LRO) a aproximadamente 1309,5 km de altitude e finalmente em Julho de 2018 (início do ciclo 600) o Jason-2 começou a operar em uma órbita de repetição longa intercalada (i-LRO), para o segundo ciclo geodésico, em uma pista terrestre no meio da grade definida pelo primeiro ciclo geodésico (AVISO, 2020)

Figura 6— Instrumentação da missão Jason-2/OSTM



Fonte: AVISO (2020).

Os dados Jason-2, além de sua principal aplicação em estudos sobre o oceano e mudanças climáticas, podem ser usados em diversos tipos de aplicações como, encaminhamento de navios, melhoria da segurança e eficiência das operações da indústria

offshore, gerenciamento de pescas, previsão de furacões e monitoramento dos níveis de rios e lagos.

3.2.5 A missão altimétrica SARAL

A missão Satellite com ARGOS e ALtiKa (SARAL) é uma missão de tecnologia de altimetria cooperativa da Indian Space Research Organisation (ISRO) e da CNES, iniciado em 23 de fevereiro de 2007, pela assinatura do Memorando de Entendimento da CNES/ISRO, resultado do interesse comum destes centros, em estudar o oceano a partir do espaço usando o sistema de altimetria e em promover o uso máximo do sistema de coleta de dados Advanced Research and Global Observation Satellite (ARGOS).

Desde o seu lançamento em fevereiro de 2013, a missão SARAL é considerada uma componente essencial da constelação de satélites de altimetria operacional e como uma missão de preenchimento de lacunas entre as missões Envisat e Sentinel-3 do programa GMES europeu, reocupando a trilha de longo prazo destes satélites. Também é conhecida por complementar as missões dos satélites Jason-2 e Jason-3 da NASA/NOAA e CNES/EUMETSAT.

Inicialmente, a SARAL esteve em uma órbita síncrona ao sol, das 6h às 18h, a uma altitude de cerca de 800 km e repetitiva a cada 35 dias. Devido a problemas técnicos, encontrados nas rodas de reação em março de 2015, o CNES e o ISRO decidiram relaxar a órbita. Em julho de 2016, a SARAL deixou sua órbita repetitiva, iniciando uma nova fase denominada Saral-Drifting Phase (SARAL-DP) que significa, “SARAL em fase de derivação”. Nesta fase, o satélite da missão SARAL ficou livre de manobras de manutenção, ou seja, há uma deriva entre trilhas terrestres sucessivas que não são mais repetitivas. O processamento de dados permaneceu inalterado, assim como a latência dos dados e mesmo não estando mais ligado à pista terrestre, foi mantido um ciclo de duração de 35 dias e os produtos IGDR e GDR produzidos como antes. Com a decadência natural da órbita, a trilha terrestre será desviada (AVISO, 2020).

A carga útil do SARAL (Figura 7) é composta pelos módulos:

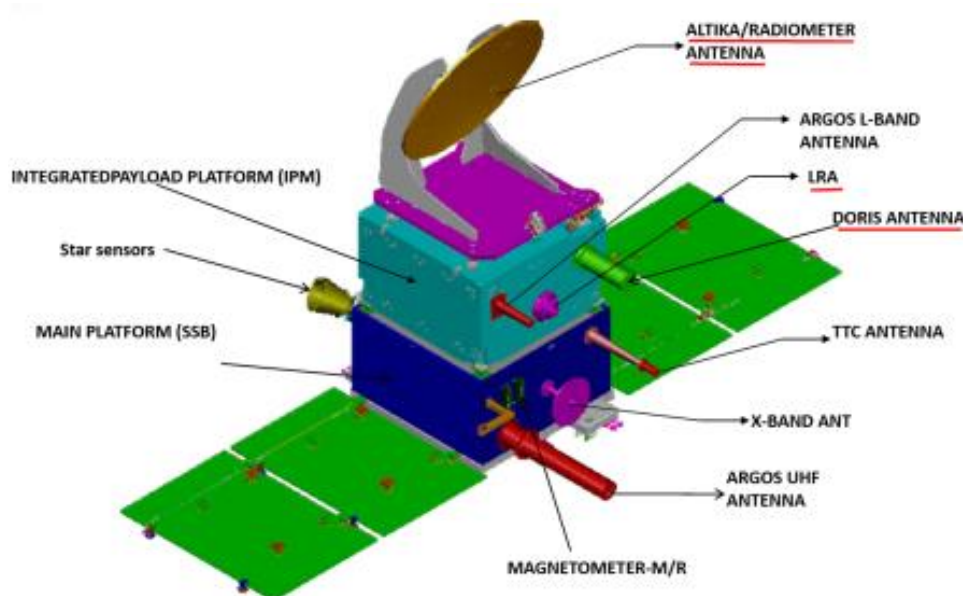
- um altímetro ALtiKa de alta resolução, incluindo uma função radiométrica de duas frequências;
- um sistema de orbitografia precisa DORIS;
- um retro-refletor a laser LRA (Array retro-refletor a laser);

- um sistema de coleta de dados Argos-3, de pesquisa avançada e observação global, fornecido pelo CNES.

O módulo AltiKa, desenvolvido pelo CNES, é baseado em um grande altímetro de banda Ka (35,75 GHz, 500 MHz), sendo o primeiro altímetro oceanográfico usando uma alta frequência. O uso da frequência da banda Ka fornecerá medições mais precisas (melhoria da resolução espacial e vertical), permitindo uma melhor observação de gelo, áreas costeiras, massas de água continentais, massas de terra e altura das ondas. Entretanto, a frequência da banda Ka tem sensibilidade à chuva, uma desvantagem que pode levar à atenuação do sinal. O altímetro de banda Ka, também fornece a primeira demonstração dos seus recursos para aplicações de resolução fina ao longo da pista, inclusive para aplicações costeiras e de águas interiores, as mesmas a serem desenvolvidas para a futura missão SWOT (AVISO, 2020).

Antes do lançamento, foram levantadas preocupações sobre a sensibilidade da banda Ka aos eventos de chuva, levando a medições ausentes e inválidas. No entanto, na prática, o retorno de dados da SARAL é notavelmente alto. No oceano, a cobertura de dados é superior a 99,5%, o que, mais uma vez, excede os requisitos da missão (BONNEFOND et al., 2018). Em geral, os desempenhos dessa missão parecem ser bastante semelhantes ou até mesmo melhores que as missões altimétricas de referência da banda Ku, como o Jason-2.

Figura 7 – Instrumentação da missão SARAL



Fonte: AVISO (2020).

O principal objetivo científico da SARAL, graças à melhoria na resolução espacial e vertical, é fornecer produtos à comunidade de pesquisadores da área oceanográfica, visando aprimorar os estudos e o conhecimento sobre a variabilidade da mesoescala oceânica. Isso levará a uma melhoria de compreensão do sistema climático, por meio de seu componente chave o oceano e também contribuirá para o estudo da dinâmica costeira, importante para muitas aplicações a jusante, incluindo oceanografia operacional, a qual busca grandes quantidades de informações (VERRON et al., 2015)

Os objetivos secundários da SARAL incluem:

- o monitoramento dos principais níveis de água continentais, como rios, lagos e mares fechados;
- o monitoramento de variações em larga escala do nível do mar;
- a observação de oceanos polares, graças à alta inclinação de sua órbita;
- a análise e previsão de campos de ondas e eólicas;
- o estudo do gelo continental e marinho, graças à menor penetração na banda Ka;
- o acesso à climatologia de baixas chuvas, possibilitado em contrapartida à sensibilidade da banda Ka à nuvens (VERRON et al., 2015).

E por fim, garantir em associação com Jason-2, a continuidade da observação oceânica atendendo aos requisitos expressos por vários programas internacionais de estudo sobre oceanos e clima, contribuindo para a construção de um sistema global de observação oceânica. Assim, os dados da SARAL, juntamente com dados de outras missões de altimetria, contribuirão para o desenvolvimento da oceanografia operacional e para o entendimento climático (“MOSDAC”, 2020).

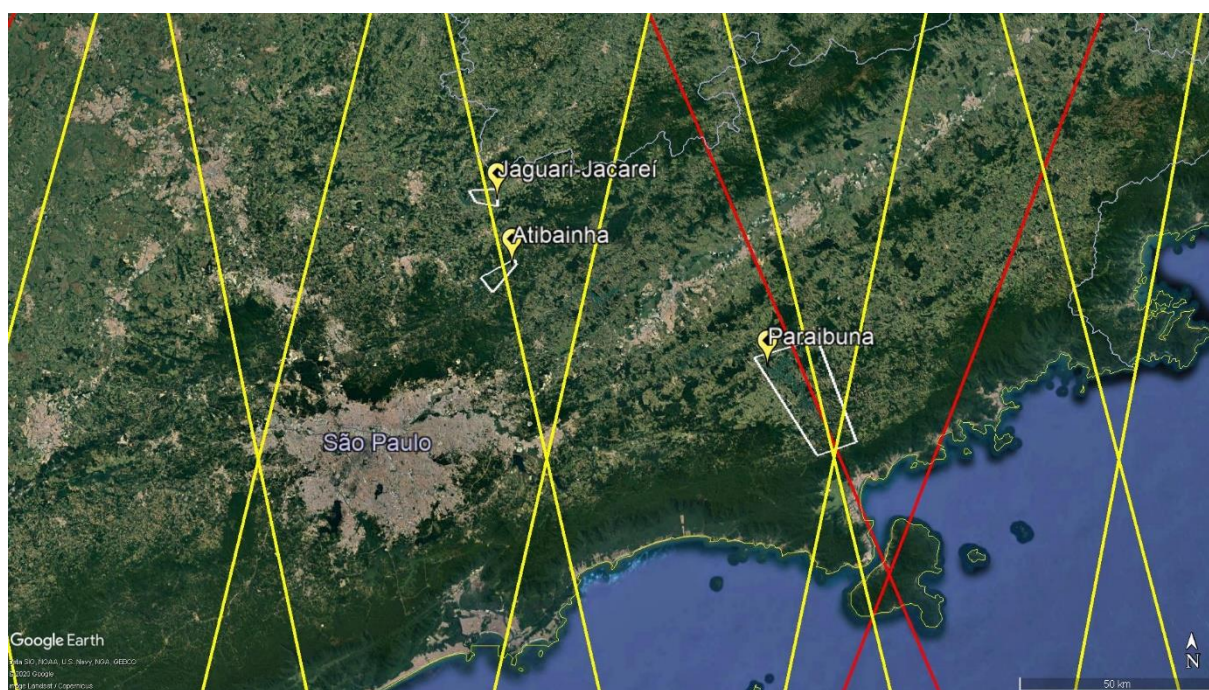
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As áreas de estudo desse trabalho, foram definidas por meio da análise das trilhas de passagem dos satélites sobre a região Sudeste. Consequentemente, foram encontradas três represas localizadas no Estado de São Paulo (Figura 8), que satisfaziam a condição de possuir uma ou mais trilhas das missões altimétricas, SARAL e/ou Jason-2, sobre suas áreas de espelho d'água. Assim, foram selecionadas as represas: Atibainha, Jaguari-Jacareí e Paraibuna

A seleção destas áreas, levou-se também em consideração, a existência de medições diárias dos níveis de seus respectivos reservatórios, realizadas por estações convencionais.

Figura 8 – Trilhas das missões SARAL e Jason-2 sobre os reservatórios estudados



Fonte: Autora.

4.1.1 Represa de Paraibuna

O reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Paraibuna ou comumente denominada “represa de Paraibuna”, está localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, no Vale do Paraíba, São Paulo, ocupando uma área de 177 km² (Figura 9). Este reservatório foi interligado ao reservatório de Paraitinga com 47 km², após parte do relevo próximo à

barragem que os separava ser dinamitado, formando um lago único totalizando um espelho d'água de 224 km² quando com 100% de sua capacidade (SOARES, 2011). As barragens destes reservatórios, concluídas em 1977, estão entre as mais altas do Brasil, com 104 m de altura. Estes reservatórios compõem a Usina Hidrelétrica de Paraibuna, com 2 unidades geradoras de energia e potência total instalada de 87,02 MW, administrado pela Companhia Energética de São Paulo (CESP).

A represa de Paraibuna foi construída com represamento dos rios Paraibuna e Paraitinga, além de seus afluentes, rio Lourenço Velho e rio do Peixe, isto a difere da maioria das represas existentes no país, as quais normalmente são criadas pelo represamento de um único rio. As nascentes do Rio Paraitinga situam-se na Serra da Bocaina, a 1800 m de altitude, enquanto o Paraibuna nasce na Serra do Mar, na divisa entre o Rio de Janeiro e São Paulo, a 1600 m de altitude.

Figura 9 – Imagem da área do reservatório de Paraibuna, em destaque a barragem e o vertedouro tulipa



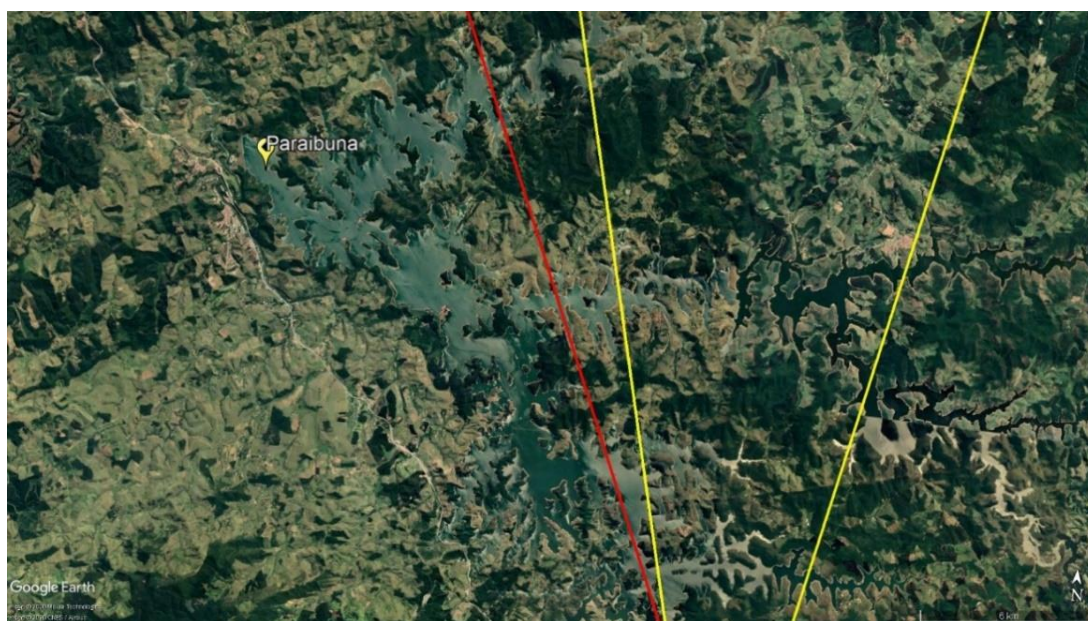
Fonte: CESP (2020).

As principais finalidades deste reservatório são regular a vazão do Rio Paraíba do Sul, para evitar a ocorrência de enchentes nas várzeas deste rio (SOARES, 2011); diluir a carga de esgoto urbano liberado *in natura* diretamente no rio e em seus afluentes (DIAS et al., 2005) e ser o responsável pelo fornecimento de água para várias cidades do Vale do Paraíba e do Estado do Rio de Janeiro.

O nível do reservatório de Paraibuna pode atingir em seu nível mínimo operativo 694,6 m e chegar até a cota de 714,0 m em seu nível máximo, tendo como cota de coroamento 719,0 m. Devido ao fato deste possuir vertedor de descarga livre (tulipa), quando o nível máximo normal é ultrapassado, a vazão defluente passa a ser função da capacidade de extravasamento deste órgão de descarga (ONS, 2019).

A área do reservatório de Paraibuna está sob as trilhas dos satélites de altimetria por radar, sendo a trilha de número 50 do satélite Jason-2 e as trilhas 549 e 906 para o SARAL. A Figura 10 apresenta a área do espelho d'água deste reservatório, destacando as linhas de passagens das trilhas das missões Jason-2 (vermelho) e SARAL (amarelo) e a Figura 11 exibe vista panorâmica deste reservatório.

Figura 10 – Trilhas das missões Jason-2 (vermelho) e SARAL (amarelo) sobre o reservatório de Paraibuna



Fonte: Autora.

Figura 11 – Vista panorâmica do reservatório de Paraibuna (SP)



Fonte: CESP (2020).

4.1.2 Represa de Atibainha

Construída entre os anos de 1969 e 1973, no rio Atibainha, um afluente do rio Atibaia, a represa de Atibainha foi inaugurada em fevereiro de 1975. Essa represa faz parte do Sistema Cantareira, o qual é formado por cinco reservatórios, os quais estão conectados através de túneis subterrâneos e canais para a passagem de água de um reservatório para outro. Este sistema, é o maior produtor de água da área metropolitana de São Paulo, abastecendo aproximadamente 46% da população dessa região e pertence a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

A área inundada do reservatório de Atibainha está localizada no município de Nazaré Paulista (Figura 12). Além das contribuições naturais do Rio Atibainha, recebe as águas provenientes dos rios Jaguari, Jacaré e Cachoeira (WHATELY; CUNHA, 2006). Em março de 2018, após a crise hídrica ocorrida no estado de São Paulo entre 2014 e 2016, entrou em operação a interligação dos reservatórios da UHE Jaguari (CESP) e Atibainha, fazendo transferência de cerca de 5,1 mil litros de água por segundo da bacia do rio Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira.

Este reservatório possui uma barragem 38 metros de altura, área inundada mínima de 17,5 km² e máxima de 22,5 km². Os níveis de água podem atingir 786,86 m como máximo

normal e 781,88 m como mínimo normal, tendo como cota de coroamento 791m. Possui vertedoura tulipa com crista na cota 786,87m e diâmetro de 6,50m (“Relatorio Conjunto Cantareira”, 2004; SABESP, 2014).

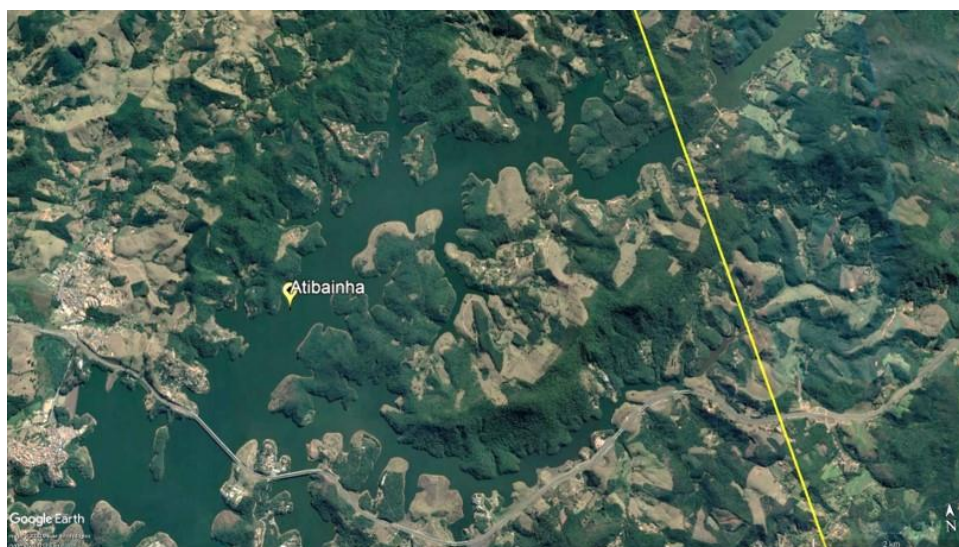
Figura 12 – Vista panorâmica do reservatório de Atibainha (SP)



Fonte: SABESP (2020).

O reservatório de Atibainha está na área da passagem da trilha 91 do satélite SARAL, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Trilha do satélite SARAL sobre o reservatório de Atibainha (SP)



Fonte: Autora.

4.1.3 Represa de Jaguari-Jacareí

A represa de Jaguari-Jacareí é formada por duas barragens e um canal de interligação de 670m de extensão, o qual conecta os dois corpos d'água centrais receptores dos rios Jaguari e Jacareí, formando um único reservatório, o maior do Sistema Cantareira. A área de inundação estende-se por parte dos municípios de Vargem, Bragança Paulista, Joanópolis e Piracaia (WHATELY; CUNHA, 2006). Construída entre os anos de 1977 e 1982, entrou em operação em maio de 1982 e pertence a SABESP.

A Bacia hidrográfica do rio Jaguari abrange 1032,4 km² e compreende total ou parcialmente os municípios de Camanducaia, Extrema, Itapeva, Sapucaí-Mirim, Joanópolis e Vargem. Suas nascentes estão localizadas no Estado de Minas Gerais. No entanto, dentro do Estado de São Paulo, o rio Jaguari é represado, constituindo o primeiro dos reservatórios do Sistema Cantareira. A Bacia Hidrográfica do rio Jacareí abrange uma área de 20.290,7 hectares e sua bacia compreende parcialmente os municípios de Bragança Paulista, Joanópolis, Piracaia e Vargem. A maioria de suas nascentes está localizada no município de Joanópolis (HACKBART et al., 2015).

Pelo fato dos dois reservatórios serem interligados e funcionarem como um sistema de reservatório único, há algumas peculiaridades: a área do reservatório do Jacareí é maior do que a do Jaguari, mas a maior vazão afluente de água é produzida pelo rio Jaguari; a água chega pelo Jaguari e fica, em sua maior parte, reservada no Jacareí; o vertedor de proteção contra cheias está na barragem do Jaguari e a tomada de água de interligação destes reservatórios com o resto do sistema está no reservatório do Jacareí; ambos têm válvulas que possibilitam manutenção controlada da vazão à jusante dos reservatórios. Está ligado ao reservatório Cachoeira, também pertencente ao Sistema Cantareira (WHATELY; CUNHA, 2006). Na Tabela 2, são apresentadas algumas informações sobre estes reservatórios.

Tabela 2: Características dos reservatórios Jacareí e Jaguari

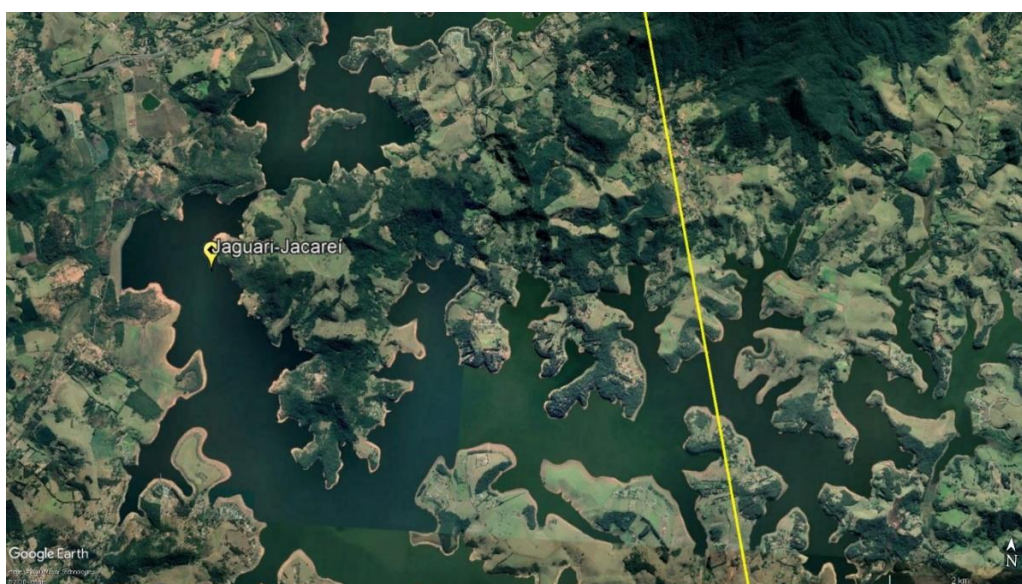
	Altura da Barragem	Cota de coroamento	Nível Mínimo - Máximo		Área inundada Mínima - Máxima	
Jacareí	50 m	847,0 m	820,80 m	844,00 m	20 km ²	43,7 km ²
Jaguari	55 m	847,0 m	820,80 m	844,00 m	3,7 km ²	5,6 km ²

Fonte: SABESP (2020).

Estes reservatórios estão enquadrados na Classe 1 (CONAMA n° 357/2005) com suas águas destinadas ao abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado, à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário e à irrigação de hortaliças e frutas (HACKBART et al., 2015).

O reservatório de Jaguari-Jacareí está sob a trilha 91 do satélite SARAL, conforme apresentado na Figura 14. O canal de interligação dos reservatórios Jaguari e Jacareí pode ser visualizado na Figura 15 e, na Figura 16 é exibida uma vista panorâmica deste reservatório.

Figura 14 – Trilha do satélite SARAL sobre o reservatório de Jaguari-Jacareí



Fonte: Autora.

Figura 15 – Canal de interligação dos reservatórios Jaguari-Jacareí



Fonte: Canal YouTube – Marcos Martins (2020).

Figura 16 – Vista panorâmica do reservatório Jaguari-Jacareí



Fonte: Site da Prefeitura da Estância Turística de Joanópolis (2020).

4.1.4 Níveis dos reservatórios durante a crise hídrica (2014-2016)

Entre os anos de 2014 e 2016, ocorreu uma grande escassez de chuva na região Sudeste do Brasil, afetando diretamente os reservatórios localizados no estado de São Paulo. O baixo volume de precipitações sucedidas naquele período, ocasionaram uma série de consequências imediatamente percebidas, afetando o cotidiano das pessoas, a produção econômica, em particular a produção alimentar e industrial (AGOPYAN; HERNANDES, 2018).

Essa estiagem resultou em uma redução significativa dos recursos hídricos, comprometendo o nível de armazenamento de água do sistema hidráulico da região. As bacias dos principais reservatórios de abastecimento urbano da região Sudeste, como o Sistema Cantareira e o Paraíba do Sul, contaram com vazões afluentes inferiores à média histórica, impedindo os reservatórios de receberem o volume de água esperado para essa época do ano (MARENGO et al., 2015). Esses fatores, exigiram a adoção de novas estratégias operacionais afim de evitar problemas de abastecimento de água à população.

Na ocasião, o reservatório de Paraibuna chegou a operar abaixo do seu nível mínimo operacional (volume morto), chegando atingir o menor valor observado de toda a série histórica de medições. Os reservatórios Atibainha e Jaguari-Jacareí também operaram abaixo do volume mínimo operacional. As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os menores volumes registrados em um período de 20 anos, para cada um dos reservatórios analisados. Pode-se

observar que os dez mínimos extremos de cotas dos níveis e de volume útil, ocorreram no período referente a crise hídrica, para todos os reservatórios.

Tabela 3: Menores níveis do Reservatório de Paraibuna (2000-2019)

Data da Medição	Cota (m)	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Volume Útil (%)
01/02/2015	694,43	38,61	50	-0,64
31/01/2015	694,44	38,60	50	-0,60
30/01/2015	694,45	27,19	50	-0,56
29/01/2015	694,47	38,59	50	-0,49
02/02/2015	694,47	95,60	50	-0,49
28/01/2015	694,48	27,17	50	-0,45
27/01/2015	694,50	27,15	50	-0,37
03/02/2015	694,51	95,66	50	-0,34
26/01/2015	694,52	27,14	50	-0,30
04/02/2015	694,53	72,86	50	-0,26

Fonte: ANA (2020).

Tabela 4: Menores níveis do Reservatório de Atibainha (2000-2019)

Data da Medição	Cota (m)	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Volume Útil (%)
29/12/2014	775,13	1,09	0,50	-106,81
28/12/2014	775,14	1,13	0,25	-106,68
19/12/2014	775,15	0,77	0,75	-106,55
20/12/2014	775,16	3,53	0,75	-106,43
18/12/2014	775,18	0,86	0,75	-106,17
21/12/2014	775,18	3,92	0,61	-106,17
30/12/2014	775,19	3,55	0,59	-106,04
10/12/2014	775,20	0,50	1,00	-105,91
22/12/2014	775,20	2,13	0,64	-105,91
07/12/2014	775,21	0,66	1,00	-105,78

Fonte: ANA (2020).

Tabela 5: Menores níveis do Reservatório de Jaguari-Jacareí (2000-2019)

Data da Medição	Cota (m)	Afluência (m³/s)	Defluência (m³/s)	Volume Útil (%)
22/10/2015	809,99	4,34	0,5	-19,18
21/10/2015	810,00	3,57	0,5	-19,17
25/10/2015	810,00	5,54	0,5	-19,17
26/10/2015	810,00	6,00	0,5	-19,17
24/10/2015	810,01	7,04	0,5	-19,16
20/10/2015	810,02	3,42	0,5	-19,15
23/10/2015	810,02	6,99	0,5	-19,15
19/10/2015	810,04	3,46	0,5	-19,13
18/10/2015	810,06	3,66	0,5	-19,10
16/10/2015	810,08	5,21	0,5	-19,08

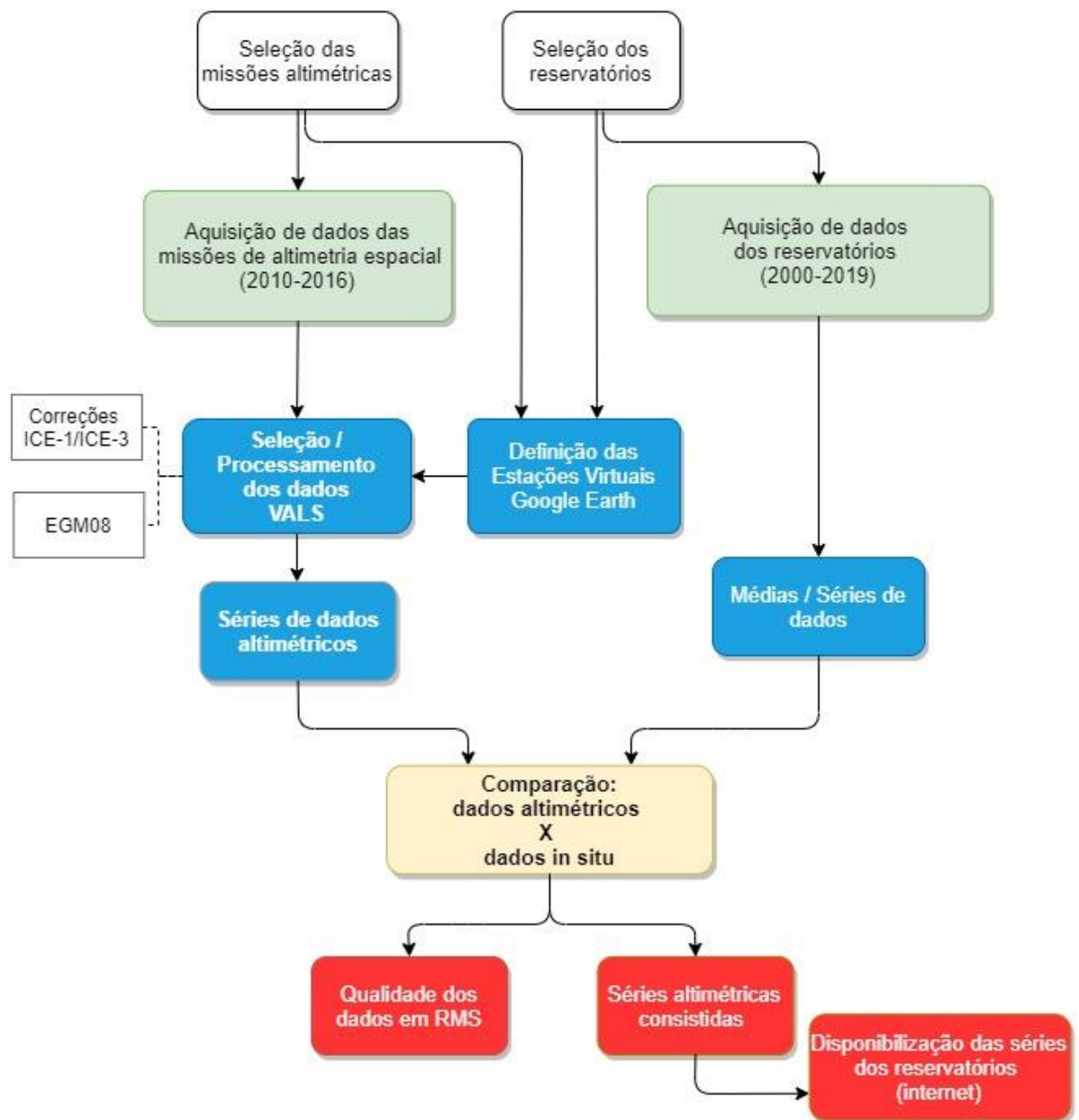
Fonte: ANA (2020).

Devido as significativas variações dos níveis de água armazenados por estes reservatórios, nos anos decorrentes da crise hídrica, optou-se nesse estudo por analisar este período, visando verificar se as medições altimétricas apresentam as mesmas variações registradas pelas estações convencionais.

4.2 METODOLOGIA

A seguir são apresentados os métodos e os procedimentos empregados nas etapas estabelecidas para obtenção e processamento dos dados de altimetria por satélite das missões SARAL e Jason-2. As etapas de elaboração das estações virtuais e criação das séries temporais de medições altimétricas e hidrológicas são descritas, bem como, o método utilizado para validação dos dados altimétricos, conforme ilustra o fluxograma da Figura 17.

Figura 17– Fluxograma da metodologia utilizada para validação dos dados altimétricos



Fonte: Autora.

4.3 DADOS ALTIMÉTRICOS

Neste estudo, foram utilizados os registros de dados geofísicos intermediários (IGDR) dos dados altimétricos dos satélites SARAL e Jason-2. Para a missão Jason-2, foram adquiridos os dados gerados pelo projeto Processing for Coastal and Hydrology Products (PISTACH) e para a missão SARAL os dados IGDR, processados pelo CNES, ambos disponibilizados pelo Archiving, Validation and Interpretation of Satellite data in Oceanography (AVISO), um portal da internet que atua como uma “vitrine” de produtos e projetos especializados em altimetria, desde 1998. Nos últimos anos, este portal tornou-se referência nas comunidades oceanográficas, hidrológicas e altimétricas internacionais. Os produtos altimétricos oferecidos por este portal, são processados pelo Serviço de Altimetro e Precisão de Localização (SALP), do CNES.

Os dados IGDR contém as correções relevantes necessárias para calcular a altura da superfície do mar, as mesmas consideradas para o cálculo dos níveis das águas continentais. Estas correções estão detalhadas no capítulo 2 deste estudo. Este produto é gerado pelo CNES e está disponível com uma latência inferior a 1,5 dias, após realizada a medição. Embora inclua várias correções ambientais e geofísicas e possua uma órbita preliminar, não é um produto totalmente validado (CNES, 2013). Após 40 dias são liberados, por ciclo de repetição, os registros de dados geofísicos (GDR) processados pelo CNES e ISRO. Este produto utiliza uma órbita precisa e melhores correções ambientais e geofísicas. As informações altimétricas utilizadas neste estudo são do tipo IGDR, com o objetivo de avaliar se esses dados, disponibilizados com uma latência menor, possuem qualidade representativa para determinar os níveis dos reservatórios.

Foram obtidos dados entre as coordenadas geográficas 46°W a 44°W e 24°S a 22°S, levando em consideração as trilhas de passagens dos satélites sobre as áreas dos reservatórios. O termo trilha ou traço, se refere à projeção de meia órbita do satélite no solo, entre a latitude mais ao sul e a latitude mais ao norte da trajetória, como também o oposto, sendo que, o conjunto de dois traços corresponde a uma revolução do satélite ao redor da Terra (órbita). Todos os traços dos satélites possuem uma numeração, identificando-os segundo sua localização na superfície terrestre. No presente trabalho, serão utilizadas as medições das trilhas 91, 549 e 906 da SARAL e da trilha 50 da Jason-2. Cada satélite possui uma configuração diferente de espaçamento entre as trilhas e estão posicionados em diferentes altitudes e inclinação da órbita, desta forma, é diferente o tempo que cada satélite demora para fazer uma cobertura global da Terra, ou seja, um ciclo. Assim sendo, a quantidade de ciclos

em um mesmo período varia de acordo com a missão. Nesse estudo, serão usadas medições de 17 ciclos da missão SARAL e de 101 ciclos da Jason-2.

Para avaliar os dados de altimetria por radar, primeiramente se faz necessário, a definição de estações virtuais e a elaboração de séries temporais do nível de água estimadas pelo altímetro. Estas atividades envolvem uma série de etapas.

- **1ª etapa:** Definição das estações virtuais;
- **2ª etapa:** Criação da base de dados altimétrica;
- **3ª etapa:** Análise do perfil hidrológico altimétrico e seleção dos dados;
- **4ª etapa:** Geração das séries temporais dos níveis de água.

4.3.1 Definição das estações virtuais

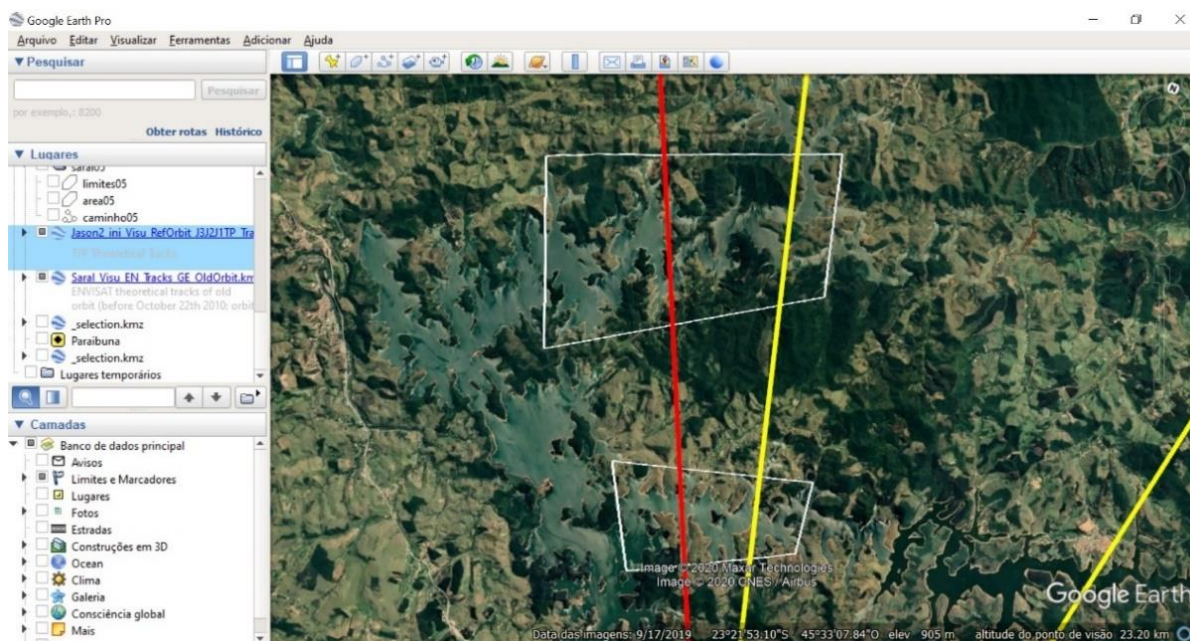
Estação virtual (EV) pode ser definida como uma área onde ocorre a interseção do traço do satélite com um plano de água (CALMANT; SEYLER, 2006; SILVA, 2010). A estação virtual representa uma janela retangular que, potencialmente, permite obter uma série temporal dos planos de água. As estações virtuais viabilizam a ampliação do monitoramento hidrológico, sem necessidade de implantação de novas estações de medições em campo, como também, proporciona a obtenção de vários parâmetros para estudos hidrológicos, como: turbidez, concentração de material em suspensão e clorofila.

As estações virtuais deste estudo, foram definidas através da análise das áreas de cruzamento da trilha do satélite sobre o espelho d'água dos reservatórios, delimitando polígonos por meio de latitudes e longitudes mínimas e máximas. Aplicou-se a mesma metodologia adotada por Silva (2010), Damasceno (2017) e Costi (2012), utilizando o mosaico de imagem do aplicativo Google Earth (Figura 18), programa de computador desenvolvido e distribuído pela empresa Google, que permite visualizar imagens de satélites por meio de um modelo tridimensional do globo terrestre. A finalidade da utilização deste aplicativo é identificar as áreas de planos d'água dos reservatórios sob a projeção das trilhas das missões Jason-2 e SARAL.

Cada missão de altimetria por satélite possui seu próprio mapeamento de trilhas, disponibilizados pelo portal AVISO, em arquivos no formato reconhecido pelo Google Earth. A partir da visualização das trajetórias dos satélites sobre as áreas de estudo, é possível demarcar a área geográfica em torno da interseção da trilha com a superfície de água. Esta delimitação é realizada traçando o desenho de um polígono ao redor da interseção. Como a

trilha do satélite sofre um deslocamento entre um ciclo e outro, ou seja, nunca passa exatamente na mesma trajetória, a largura do polígono deve ser estabelecida com alguns quilômetros de distância da trilha originalmente definida (COSTI, 2012).

Figura 18 – Visualização da área do reservatório de Paraibuna pelo Google Earth

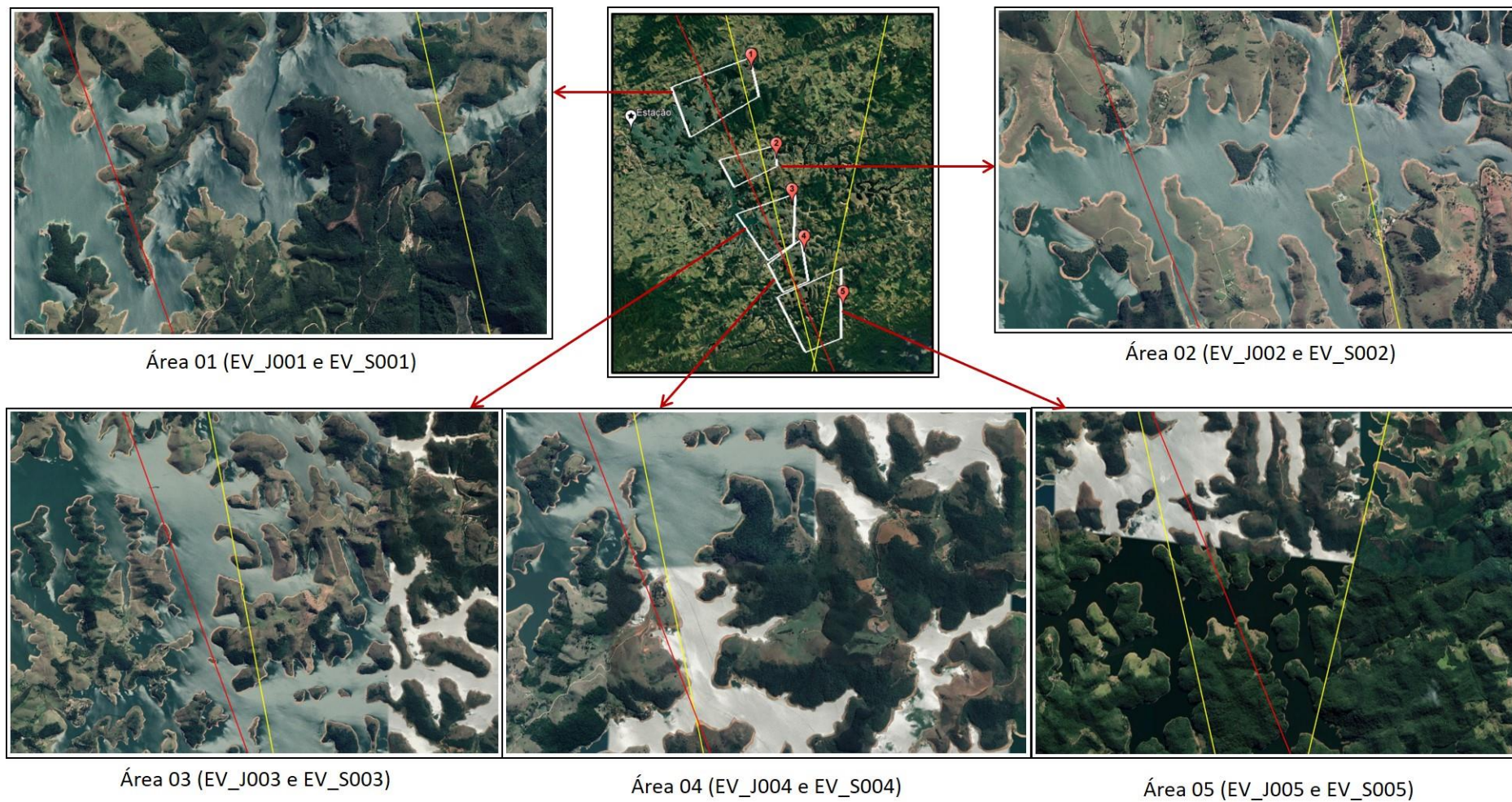


Fonte: Autora.

Devido à grande dimensão do reservatório de Paraibuna e o fato da área alagada deste estar entre uma região de serras, foi possível identificar várias áreas com grandes extensões das trilhas dos satélites sobre o espelho d'água do reservatório. Consequentemente, foram eleitas 5 áreas para aquisição dos dados de satélite, conforme apresentadas na Figura 19. Essas áreas possuem distâncias entre 8 e 25 km da estação fluviométrica do reservatório (usada como referência para validação dos dados altimétricos) e estão em um raio de no máximo 4 km de distância da trilha de referência do satélite, de forma a evitar a perda de dados dos ciclos. As 5 áreas definidas para o reservatório de Paraibuna são contempladas pelas passagens das trilhas das missões SARAL e Jason-2, sendo a área 5 a única beneficiada com duas trilhas da SARAL. Estas áreas irão formar as estações virtuais desse reservatório.

Na Figura 19, pode ser observado que, em todas as áreas definidas para o reservatório, as trilhas das missões altimétricas passam sobre trechos de área alagada e de vegetação, este fato ocasiona perturbações na regularidade da aquisição de dados.

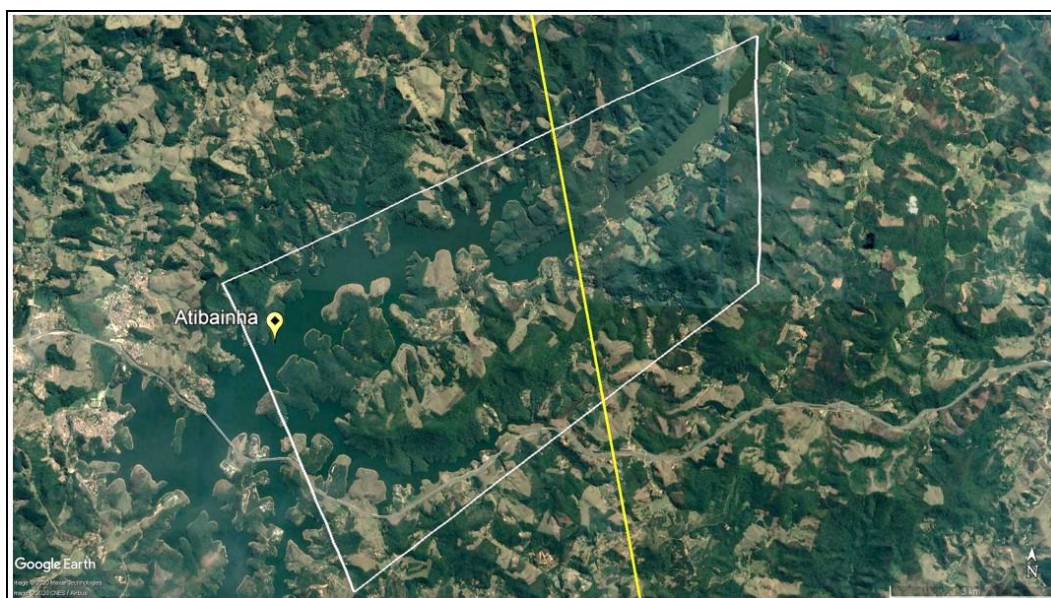
Figura 19 – Áreas definidas para a criação das estações virtuais para o reservatório de Paraibuna



Fonte: Autora.

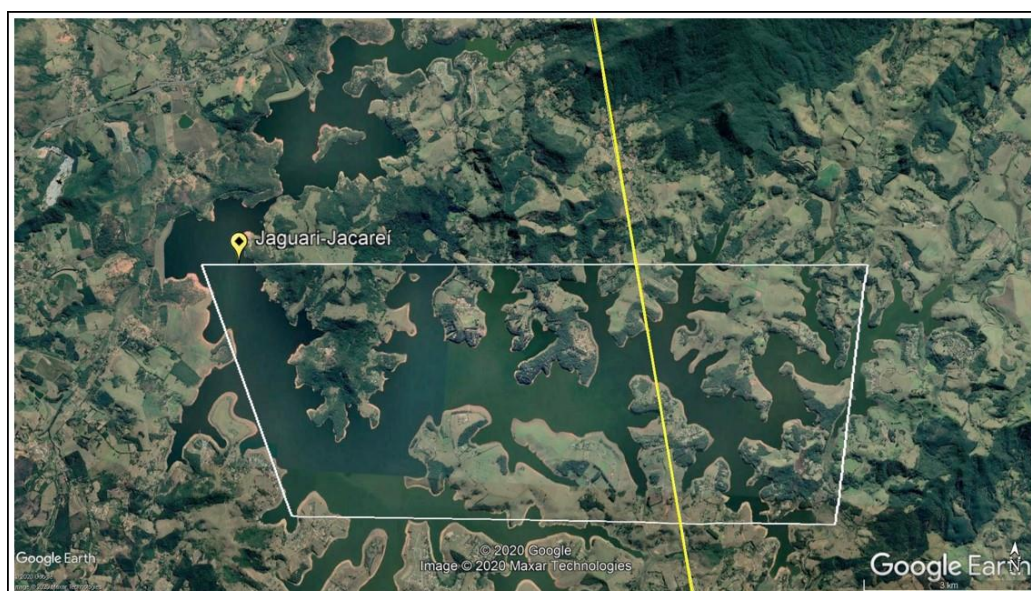
Devido a menor dimensão dos reservatórios Atibainha e Jaguari-Jacaré e por compreenderem a passagem de apenas uma trilha da missão SARAL sobre suas áreas alagadas, foi encontrada apenas uma região, para cada reservatório, de interseção da trilha com o espelho d'água, consequentemente, ambos reservatórios tiveram definida uma única estação virtual (Figuras 20 e 21).

Figura 20 – Área da estação virtual do reservatório de Atibainha



Fonte: Autora.

Figura 21 – Área da estação virtual do reservatório de Jacaré-Jaguari



Fonte: Autora.

Na Tabela 6 são apresentadas as estações virtuais definidas para os reservatórios analisados neste estudo.

Tabela 6 – Estações virtuais estabelecidas para os reservatórios analisados

Missão	Código EV	Reservatório	Longitude*	Latitude*	Traço (km)	Área (km ²)
JASON	EV_J 001	Paraibuna	-45,5763	-23,3425	4,6	37,0
	EV_j002	Paraibuna	-45,5450	-23,2412	2,5	12,9
	EV_J003	Paraibuna	-45,5233	-23,4611	4,8	22,7
	EV_J004	Paraibuna	-45,3032	-23,2956	3,5	12,0
	EV_J005	Paraibuna	-45,4833	-23,3230	6,0	33,6
SARAL	EV_S001	Paraibuna	-45,5763	-23,3425	4,6	37,0
	EV_S002	Paraibuna	-45,5450	-23,2412	2,5	12,9
	EV_S003	Paraibuna	-45,5233	-23,4611	4,8	22,7
	EV_S004	Paraibuna	-45,3032	-23,2956	3,5	12,0
	EV_S005	Paraibuna	-45,4833	-23,3230	6,0	33,6
	EV_S006	Atibainha	-46,3133	-23,1466	0,41	30,8
	EV_S007	Jaguari-Jacaré	-46,3588	-22,9625	0,89	24,5

*Latitude e longitude médias da área.

Fonte: Autora.

4.3.2 Criação da base de dados altimétricos

Inicialmente, foram obtidas as medições altimétricas do tipo IGDR para as missões SARAL e Jason-2, disponibilizadas pelo CNES, por meio do serviço *Online Data Extraction Service* (<http://odes.altimetry.cnes.fr/>), que faz parte do portal AVISO. Após aquisição destes dados, estes foram importados para o aplicativo VALS (Virtual Altimetry Station), permitindo a criação de bases de dados altimétricas para diferentes missões de altimetria espacial.

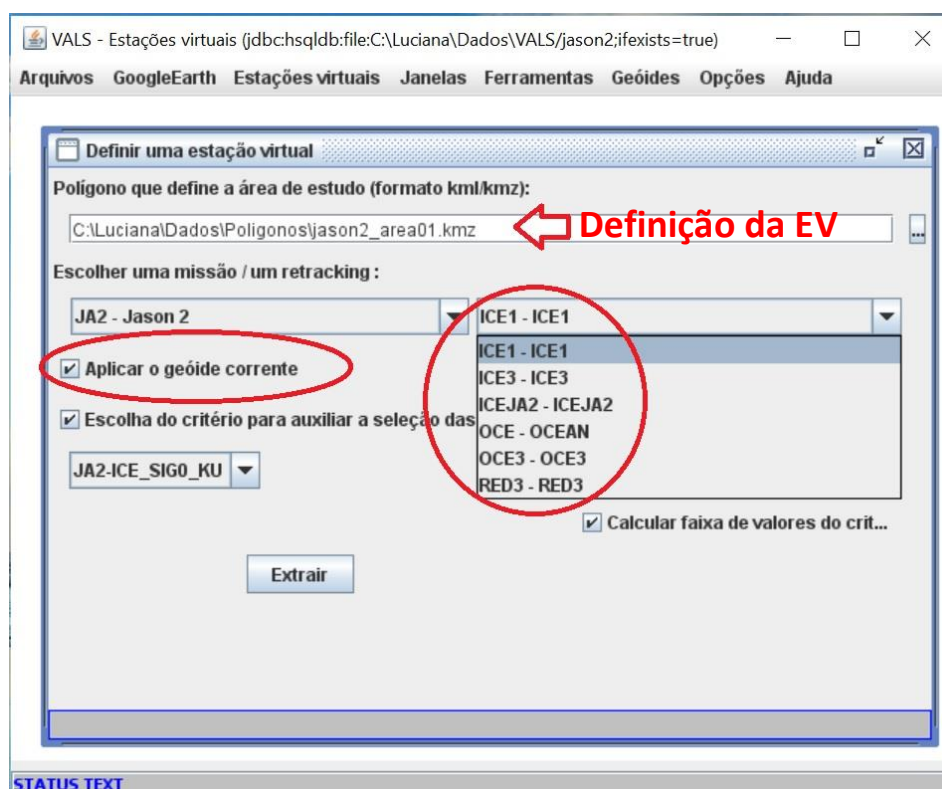
O VALS é um programa, disponibilizado gratuitamente, dedicado estritamente ao processamento de informações resultantes das missões altimétricas e tem como função principal a elaboração de séries temporais de dados altimétricos, baseando-se em estações virtuais (“VALS - Manual de utilização”, 2018). É desenvolvido em Java e distribuído via internet. Pode-se destacar as seguintes funcionalidades:

- Gerenciamento de bases de dados, local e centralizada;
- Aplicação de algoritmos de correção das medições altimétricas e conversão da superfície terrestre de referência.

- Visualização do perfil hidrológico altimétrico ao longo do traço e seleção das medições em modo interativo;
- Extração das séries temporais das medidas altimétricas com data, latitude, longitude, altura do plano de água e valores estatísticos como, médias e medianas.

Após a importação dos dados e criação de uma base de dados local no VALS, torna-se possível o processamento das informações altimétricas para dar início a criação da série de dados para as estações virtuais. A partir do polígono definido para cada EV, o VALS identifica os pontos dentro da área de interesse e apresenta seus respectivos valores de níveis em cada traço. Não é permitido combinar dados de diferentes missões de satélites para cada EV, desse modo, serão criadas várias séries de dados, conforme a quantidade de EVs definidas para as áreas dos reservatórios. No momento do processamento dos dados altimétricos de cada EV, alguns requisitos devem ser considerados, como definição do algoritmo utilizado para refinamento das correções das medições altimétricas, bem como, a escolha da superfície terrestre de referência (Figura 22). Esses requisitos irão assegurar maior consistência e qualidade nos dados altimétricos.

Figura 22 – Processamento dos dados de uma estação virtual (VALS)



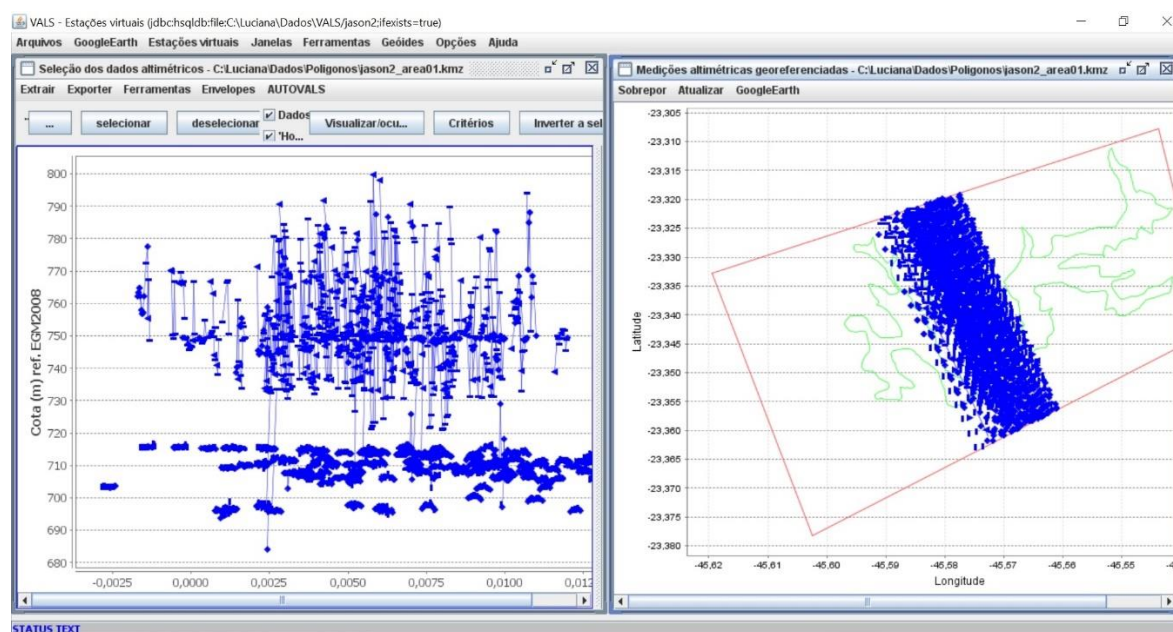
Fonte: Autora.

Para o tratamento dos dados altimétricos adotou-se os algoritmos ICE-1 e ICE-3, para as respectivas missões de altimetria SARAL e Jason-2. O primeiro algoritmo, desenvolvido para o estudo das calotas polares, consiste no pós-processamento de ecos do radar, de maneira a obter melhores estimativas que aquelas fornecidas pelos algoritmos de tratamento a bordo do satélite. O algoritmo ICE-1 necessita de uma estimativa prévia da amplitude da forma de onda e do maior número possível de pontos de amostragem para diminuir os ruídos. Segundo as comparações realizadas por Frappart et. al. (2006) esse algoritmo, baseado na técnica “Offset Center of Gravity” (conhecida como deslocamento do centro de gravidade), é o que melhor se adapta às medições altimétricas em águas continentais e o que produz séries mais consistentes com os dados observados *in situ* (GETIRANA, 2009; SILVA, 2010). O algoritmo ICE-3, consiste também no tratamento de forma de onda e é similar ao algoritmo ICE-1, onde parte do eco de radar usada para o cálculo do centro de gravidade utiliza a técnica de reconhecimento de forma de onda e podem ser classificadas em 35 classes específicas (DAMASCENO, 2017; SILVA, 2010).

As medições altimétricas são realizadas baseando-se na altura do altímetro em relação ao elipsoide de referência, conforme detalhado no capítulo 2 deste estudo. Como essa medida não representa com exatidão o relevo terrestre, se faz necessário a utilização de um geoide de referência para aproximar as medições altimétricas com as realizadas *in situ*. Em vista disso, os dados foram convertidos para o geoide de referência EGM08, modelo de geoide mais indicado para ser utilizado com dados de altimetria por satélites, conforme Moreira (2010). O modelo EGM08 (Earth Gravitational Model 2008) tem uma precisão média estimada de 15 cm com uma resolução espacial de 5 minutos (9,3 km no Equador) (MOREIRA, 2010). Os dados do EMG08 estão disponíveis em: <https://earth-info.nga.mil/GandG/update/index.php>.

Após o processamento dos dados da estação virtual, duas janelas são exibidas onde apresentam-se os dados altimétricos relacionados à EV (Figura 23). A primeira janela apresenta, um gráfico com os níveis altimétricos medidos no interior do polígono (área da estação virtual), onde cada linha corresponde a uma trilha do satélite. Esta janela será utilizada para selecionar as medições para compor a série de dados da estação virtual. A segunda janela exibe o dado georreferenciado correspondente a trilha de passagem do satélite, ou seja, a posição (latitude/longitude) do satélite no momento da medição e, em segundo plano, a imagem da área do reservatório para identificação do corpo de água.

Figura 23 – Medições altimétricas georreferenciadas, sobre a área da EV, aplicativo VALS



Fonte: Autora.

4.3.3 Análise do perfil hidrológico altimétrico

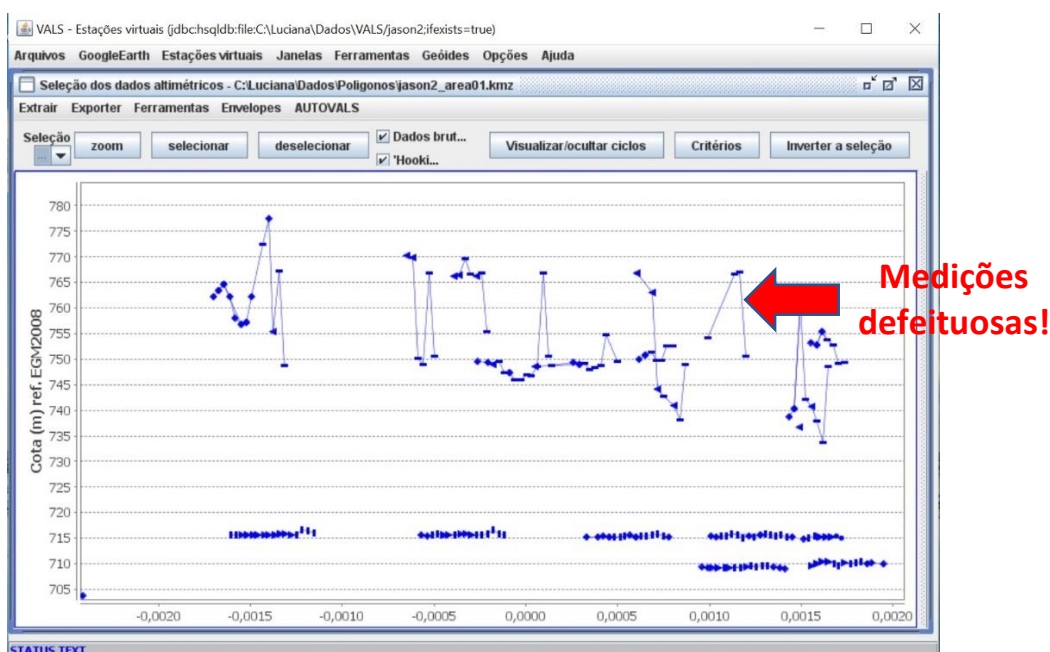
Após as etapas de processamento e aplicação das correções dos dados, pode-se analisar o perfil hidrológico altimétrico dos dados correspondentes à EV, objetivando a construção das séries temporais altimétricas de níveis de água. A elaboração de séries consistentes é realizada por meio da seleção das medições dentro da janela de interesse, ou seja, na área definida para a estação virtual. A seleção dos dados pode ser feita por processos manuais ou automáticos. Os métodos de seleção automática, necessitam de um conjunto de informações adicionais como arquivos georreferenciados (shapefiles), informações sobre os tipos de cobertura do solo, imagens de satélite, entre outros, e ainda assim, em muitos casos, requer um refinamento manual. Conforme Moreira (2010), a seleção dos dados por processos automáticos carece ainda de aperfeiçoamento, sendo que, êxitos maiores têm sido obtidos via procedimento manual apoiados por ferramentas computacionais como o VALS (MOREIRA, 2010). No processo de seleção manual, os valores obtidos ao longo de uma trilha do satélite são submetidos à uma inspeção visual através de aplicativos apropriados, onde são eliminados os dados espúrios e são selecionadas as medições com valores representativas que estão sobre o espelho d'água. Neste estudo, foi adotada a metodologia manual, através do programa VALS (COCHONNEAU et al., 2011; SILVA, 2010). Essa metodologia é descrita detalhadamente

em Roux et al. (2010), Costi (2012) e em “VALS” (2018). Destaca-se a importância desta fase, em razão de ser a principal etapa para a geração da série de dados altimétricos de qualidade.

Todas as medições pertencentes ao polígono da EV são representadas em um gráfico no VALS (Figura 24), onde: no eixo das ordenadas (y) é mostrada a medição altimétrica (altura) em relação à superfície de referência; e perpendicularmente está representada a distância entre a linha de referência da trilha do satélite e as coordenadas das medições, em graus geográficos. A partir da visualização das medidas dos níveis altimétricos pertencentes ao polígono, podem ser efetuadas, sobre a representação gráfica, as seguintes ações: seleção das medidas consistentes e/ou eliminação das medidas e/ou ciclos defeituosos.

Os gráficos do VALS exibem os valores altimétricos por ciclo, conforme as medições foram realizadas ao longo da trilha do satélite. Alguns ciclos, apresentam todas as medições fora dos valores esperados, estes ciclos defeituosos podem ser identificados facilmente por estarem distantes da média dos outros ciclos, sendo estes ciclos completamente descartados. No entanto, a maior parte dos ciclos apresentam valores dentro e fora dos padrões esperados, isto ocorre devido a diversos fatores, como a mudança da área analisada de água para vegetação, por ruídos atmosféricos, entre outros. Desta forma, precisam ser analisados todos os pontos de todos os ciclos. Diante disso, a série temporal de dados será gerada compreendendo somente os pontos sobre o plano de água, excluindo as informações com erros, as quais poderiam prejudicar o resultado.

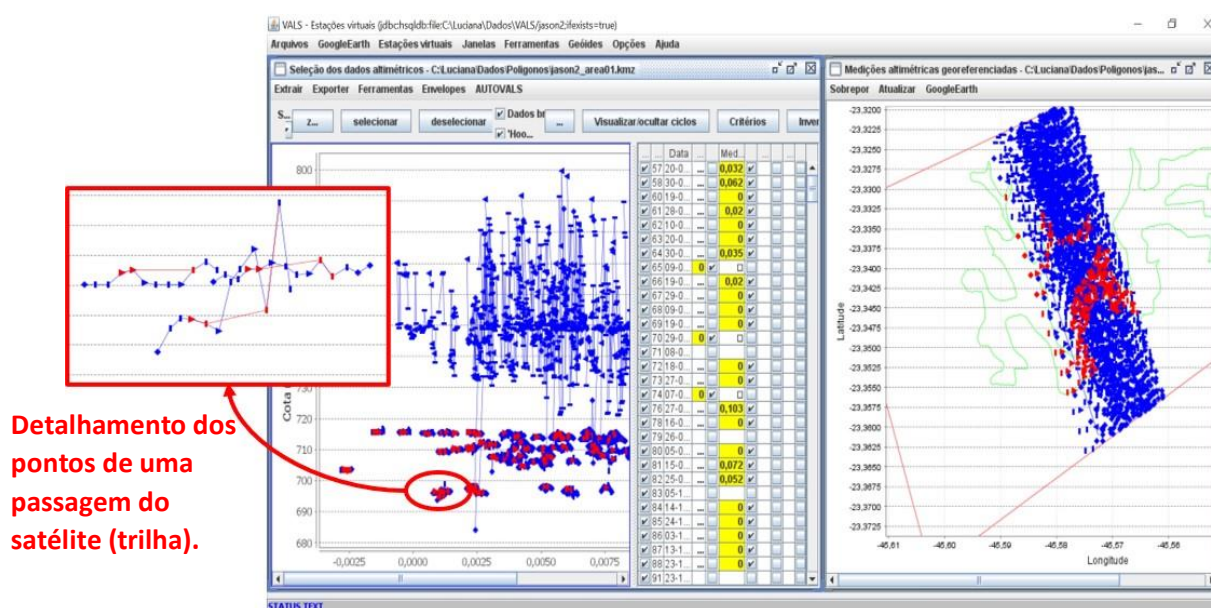
Figura 24 – Visualização das medições da missão altimétrica Jason-2



Fonte: Autora.

Na Figura 24 observa-se grandes dispersões nos valores das medidas altimétricas em uma mesma área geográfica. Pode-se destacar que, no momento da seleção de um dado altimétrico (ponto), seus metadados são apresentados em uma tabela complementar (Figura 25), que contém informações como o número do ciclo, data e hora da medição e a incerteza associada com cada método de cálculo da altura (i.e., média, mediana). Estes metadados auxiliam na decisão entre a seleção ou não do ponto, permitindo melhorar significativamente a qualidade dos dados das séries temporais. Uma vez selecionado o ponto na primeira janela, o ponto correspondente na outra janela é destacado.

Figura 25 – Visualização das medições da missão altimétrica Jason-2



Fonte: Autora.

4.3.4 Geração das séries de dados

Após seleção dos pontos da estação virtual, o VALS gera a série cronológica dos níveis de água, incluindo as médias e medianas, de todos os pontos selecionados, por ciclo. Nessa série, cada ponto vem acompanhado também do valor de incerteza, calculada pelo desvio de cada medida dentro do mesmo ciclo, dando origem a um único ponto da série temporal. Os pontos são caracterizados individualmente através da posição geográfica e data de aquisição.

Conforme Silva (2010) observou, quando a série de dados é bem selecionada, a média e mediana apresentam valores próximos. Neste estudo, a seleção dos pontos de cada trilha do satélite foi realizada criteriosamente e como consequência, foi verificado que as médias e medianas ficaram com valores aproximados para a maioria dos ciclos. Silva (2010) e Frappart

et al. (2006), utilizaram a mediana como medida representativa para definição do nível de água de cada ciclo do satélite, associando uma dispersão à mediana, de forma a caracterizar a qualidade e confiabilidade dos resultados obtidos. Tal dispersão foi calculada pelo desvio médio absoluto da mediana (DAM), pela equação 3, proposta por Silva (2010).

$$DAM(h) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n |H_i - H_{med}| \quad (3)$$

Onde N é número de medições, H_i é a i-ésima medida altimétrica selecionada e H_{med} é a mediana das medidas selecionadas.

Diante do exposto, optou-se também em utilizar a mediana como medida para representar o nível de água das séries altimétricas, assim como, fazer a associação de uma dispersão à mediana. Ressalta-se que em alguns casos, somente um ponto foi selecionado por ciclo, não permitindo calcular as dispersões estimadas.

4.4 DADOS HIDROLÓGICOS

As medições *in situ* utilizadas neste estudo foram obtidas diretamente com as empresas gerenciadoras dos reservatórios. Foram utilizadas 3 estações, sendo uma para cada reservatório.

As informações das cotas dos níveis do reservatório de Paraibuna, gentilmente cedidas por e-mail pela empresa CESP, são da estação limnimétrica “58087080 - UHE Paraibuna Barramento”, localizada próxima a barragem e responsável pelas medições de nível do reservatório. Os dados recebidos desta estação estão em frequência diária, ou seja, o valor corresponde à média dos 24 registros de níveis medidos manualmente por um observador, a cada hora do dia. O nível deste reservatório é definido em relação ao nível médio dos mares tendo como referência o Datum altimétrico vertical de Imbituba-SC, ou seja, o “zero da régua” da UHE Paraibuna Barramento é 694,00 m.

Os dados de cotas de níveis das estações fluviométricas dos reservatórios de Atibainha e Jaguari-Jacaré foram obtidos diretamente no Portal dos Mananciais, no site da SABESP. Estas estações realizam as medições das cotas dos níveis dos reservatórios utilizando também como referência o Datum altimétrico vertical do marégrafo de Imbituba-SC.

4.5 VALIDAÇÃO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS

A qualidade das séries temporais altimétricas foi verificada através da comparação direta das medições altimétricas com as medidas de nível das estações fluviométricas. Para verificar a acurácia entre as medidas foi calculado o valor eficaz ou RMS (Root Mean Square), definido pela equação 4. O valor RMS (raiz da média dos quadrados), usualmente destacado na bibliografia da área de altimetria, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável, especialmente útil quando as variações são positivas e negativas.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{1,i} - H_{2,i})^2}{n}} \quad (4)$$

Onde n o número de medidas, H1,i são as medidas altimétricas e H2,i as medidas das estações fluviométricas.

A validação dos dados altimétricos foi realizada por meio do desenvolvimento de rotinas computacionais em linguagem de programação Python e com a utilização do Banco de dados PostgreSQL.

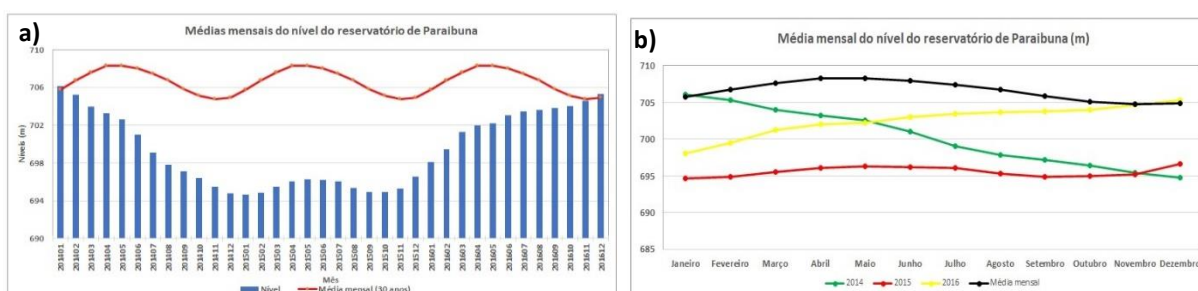
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados gerados pela realização deste estudo, de acordo com a metodologia apresentada. Inicialmente, será exposto o regime hidrológico dos reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacareí e Paraibuna, com enfoque nos anos de 2014 a 2016, que correspondeu ao período de forte escassez hídrica, ocorrida na região dos reservatórios analisados. Em seguida, serão detalhados os processos realizados para geração das séries temporais dos dados de altimetria obtidos por radar e, por último serão apresentados e discutidos os resultados da validação destes dados.

Caracterização dos níveis de água do reservatório de Paraibuna

Neste estudo, foram utilizadas as medições feitas *in situ* da única estação fluviométrica existente no reservatório de Paraibuna. Esta estação tem como finalidade registrar os valores das cotas de níveis de água a cada hora. Porém, para a validação das medições altimétricas deste estudo, foi necessário processar os dados horários gerando valores médios diários dos níveis do reservatório. Na Figura 26 (gráficos a e b), são apresentadas as médias mensais deste reservatório, calculadas para os anos de 2014 a 2016 e comparadas às médias mensais históricas, baseadas nos últimos 30 anos de dados (1990-2019). Nesta figura, pode-se observar a grande variação dos níveis de água ocorrida neste período, registrando os menores índices de toda série histórica para esta estação, assim como, verifica-se que o nível do reservatório registrou valores abaixo da média para todo o período analisado.

Figura 26 – Médias mensais do nível de água do reservatório de Paraibuna, de 2014 a 2016

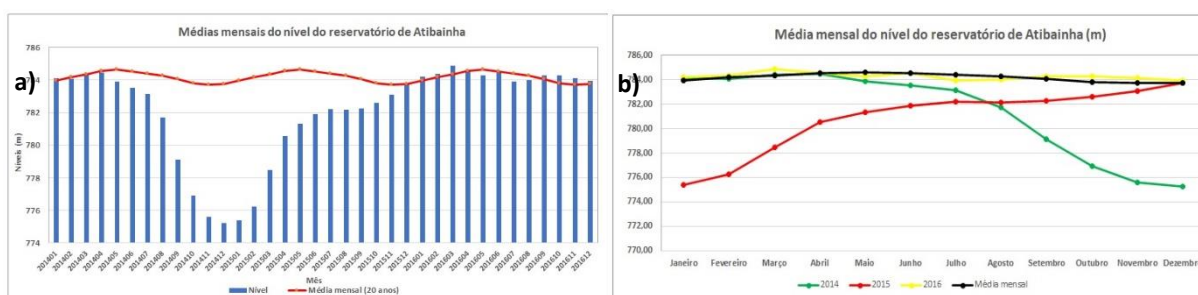


Fonte: Autora.

Caracterização dos níveis de água do reservatório de Atibainha

O reservatório de Atibainha também registrou forte queda dos níveis de água no decorrer da crise hídrica de 2014 a 2016. Entretanto, este reservatório possui um sistema de interligação com outros reservatórios do Sistema Cantareira, onde há a transferência de água entre eles. Por este motivo, este reservatório registrou níveis abaixo da média histórica para um intervalo menor de tempo, dentro do período analisado. As médias mensais apresentadas nos gráficos (a e b) da Figura 27, foram calculadas a partir das medições diárias da estação fluviométrica deste reservatório e comparadas às médias mensais dos últimos 20 anos de registros históricos (2000-2019).

Figura 27 – Médias mensais do nível de água do reservatório de Atibainha, de 2014 a 2016

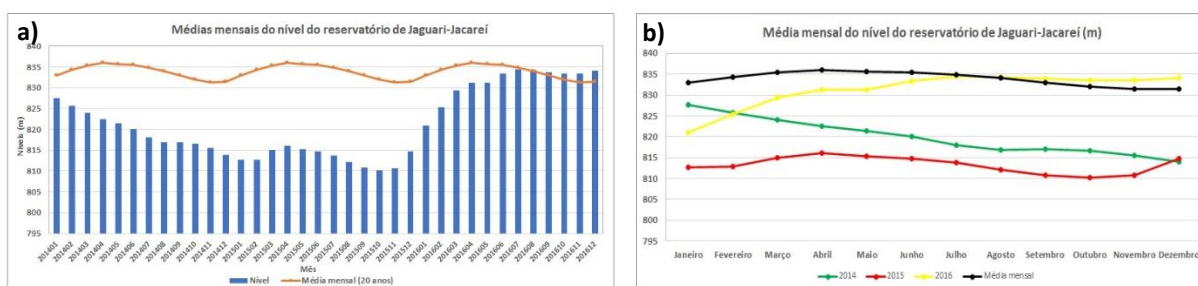


Fonte: Autora.

Caracterização dos níveis de água do reservatório de Jaguari-Jacaré

Da mesma forma, as médias mensais para o reservatório de Jaguari-Jacaré foram calculadas para o período de 2014 a 2016, a partir dos dados diários e comparadas às médias mensais históricas geradas para os últimos 20 anos de dados (2000-2019) (Figura 28). Este reservatório também registrou uma queda acentuada em seus níveis de água no período da escassez hídrica ocorrida no estado de São Paulo, registrando valores abaixo da média desde do início do período analisado.

Figura 28 – Médias mensais dos níveis do reservatório de Jaguari-Jacaré de 2014 a 2016



Fonte: Autora.

Série de dados altimétricos das estações virtuais

As séries temporais altimétricas foram geradas para todas as estações virtuais definidas para os reservatórios estudados, a partir das medições realizadas pelos altímetros acoplados nos satélites das missões SARAL e Jason-2. Como esses satélites possuem órbitas fixas (ou com pequenas variações), permitem que, a cada ciclo do satélite, observe-se o mesmo ponto, criando, assim, séries temporais consistentes das medidas altimétricas realizadas ao longo do tempo. Cada série temporal de uma estação virtual compreende um número diferente de ciclos, e consequentemente, uma quantidade variada de medições.

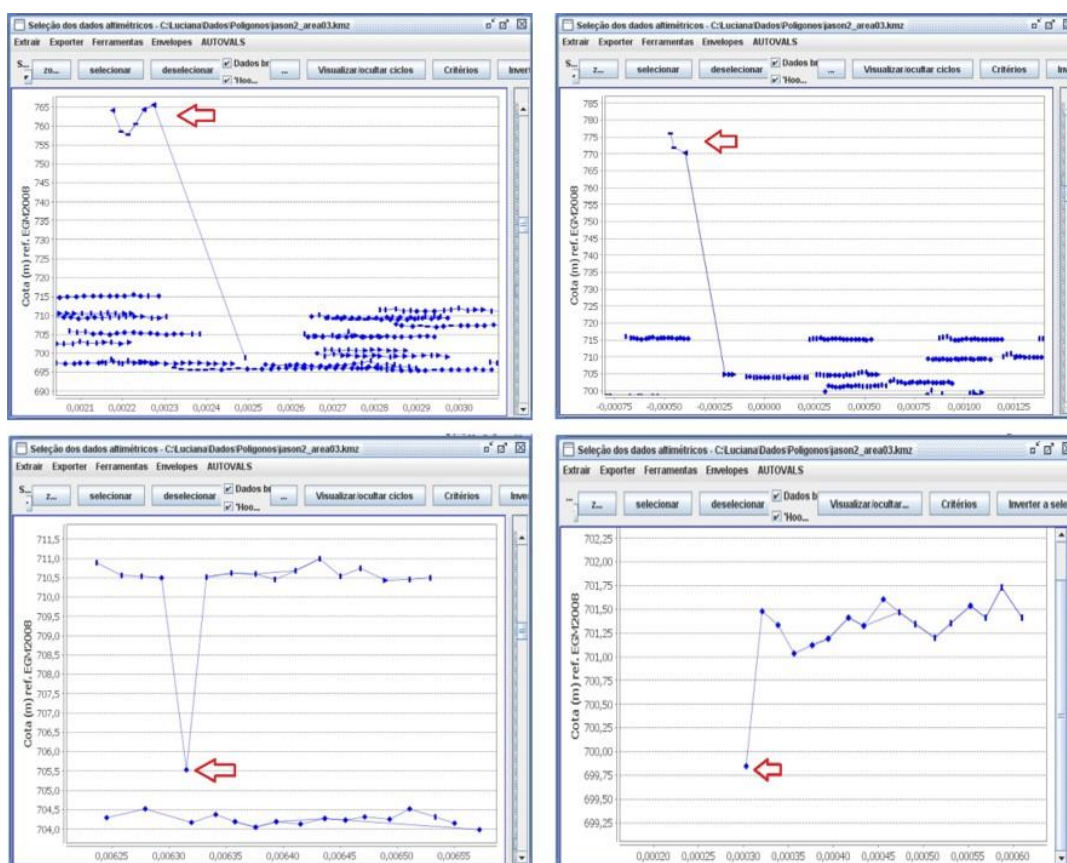
O aplicativo VALS auxiliou no processo de diferenciar as medições corretas das inconsistentes através de gráficos, onde pode ser visualizado facilmente as grandes dispersões das medidas, evidenciando os problemas ocorridos na medição. A metodologia manual para a seleção das medições altimétricas adotada neste estudo, foi também utilizada por outros pesquisadores, os quais concluíram que a utilização do programa VALS permite estabelecer uma série temporal dos dados altimétricos de qualidade, sob qualquer plano de água (BAUP; FRAPPART; MAUBANT, 2014; SILVA, 2010).

Todas as medições dos ciclos pertencentes a cada uma das estações virtuais foram analisadas, com o objetivo de selecionar somente os pontos encontrados dentro dos limites do espelho d'água e que possuíssem valores consistentes. Os pontos localizados fora da superfície de água e os com valores discrepantes em relação aos demais do mesmo ciclo, foram considerados inconsistentes. Estas medições não foram selecionadas para a elaboração das séries temporais das estações virtuais. Todo esse processo de análise e seleção manual dos pontos foi realizado visualmente, utilizando as representações gráficas do VALS.

Na etapa de análise e seleção manual das medições altimétricas para a elaboração das séries temporais das EVs, foram identificadas várias formas de apresentação de dados com problema. Essas medições inconsistentes ou pontos falsos, podem surgir em qualquer ponto da trilha, porém são comumente encontradas no início ou no final dos traços. Isto ocorre devido a mudança da superfície refletiva, que tornam as medidas contaminadas por ecos parasitas (*i.e.*, margens, ilhas, vegetação ciliar, variações topográficas), conforme observado neste estudo e também por Silva (2010). Existe também a possibilidade destes pontos falsos serem consequência de variações ocorridas em períodos de vazantes e cheias, onde há o surgimento de bancos de areia ou de novas áreas alagadas. As inconsistências podem apresentar valores acima ou abaixo das medidas consideradas corretas e o aproveitamento das

medições de uma trilha pode variar de 0 a 100%. Na Figura 29 são demonstrados alguns exemplos de valores inconsistentes no decorrer das passagens das trilhas do satélite.

Figura 29 – Trilhas do satélite Jason-2, destacando as medições incorretas



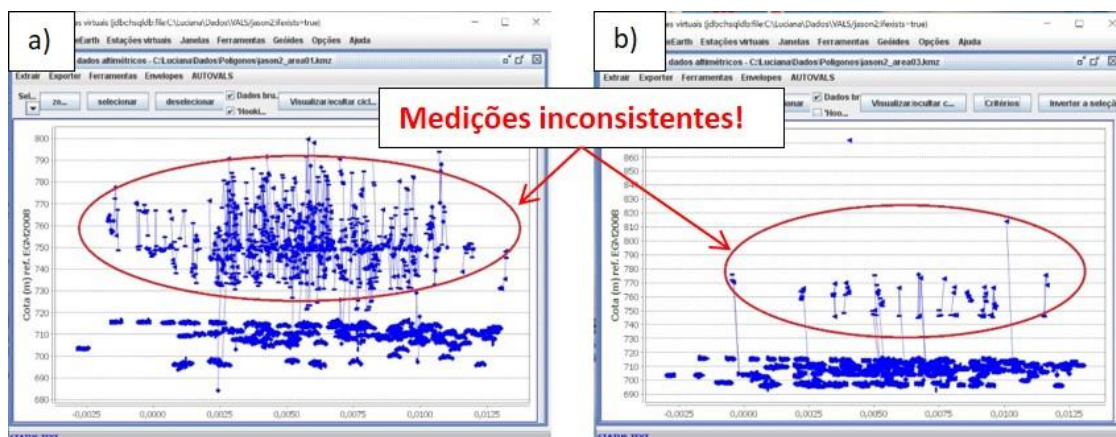
Fonte: Autora.

No processo de seleção manual, constatou-se que todas as estações virtuais apresentavam uma grande quantidade de valores inconsistentes. A maioria desses valores eram encontrados nas mesmas trilhas que continham valores corretos (Figura 29). Os dados inconsistentes puderam ser excluídos sem prejuízo de informação, uma vez que cada traço possui várias medições para um determinado dia e hora, os quais foram utilizados para cálculo das médias e medianas. Quando todas as medidas de uma trilha foram consideradas inconsistentes, todas foram excluídas e a data da passagem dessa trilha não foi aproveitada para a elaboração da série de dados.

Na Figura 30, pode-se observar que os ciclos da missão Jason-2, apresentavam uma grande variação na quantidade de valores inconsistentes, nas diferentes áreas das estações virtuais. Este fato ocorreu, devido as particularidades das superfícies de cada uma das EVs. As imagens (a e b) da Figura 30 pertencem ao reservatório de Paraibuna, sendo a) área da

estação EV_J001 e b) área da estação EV_J003. As características das superfícies destas EVs apresentam diferenças significativas, onde a área da EV_J001 possui maior presença de serras e vegetação, enquanto a área da EV_J003 abrange uma grande área alagada.

Figura 30 – Visualização das medições altimétricas pelo programa VALS, destaque para as medidas inconsistentes: a) EV_J001, b) EV_J003

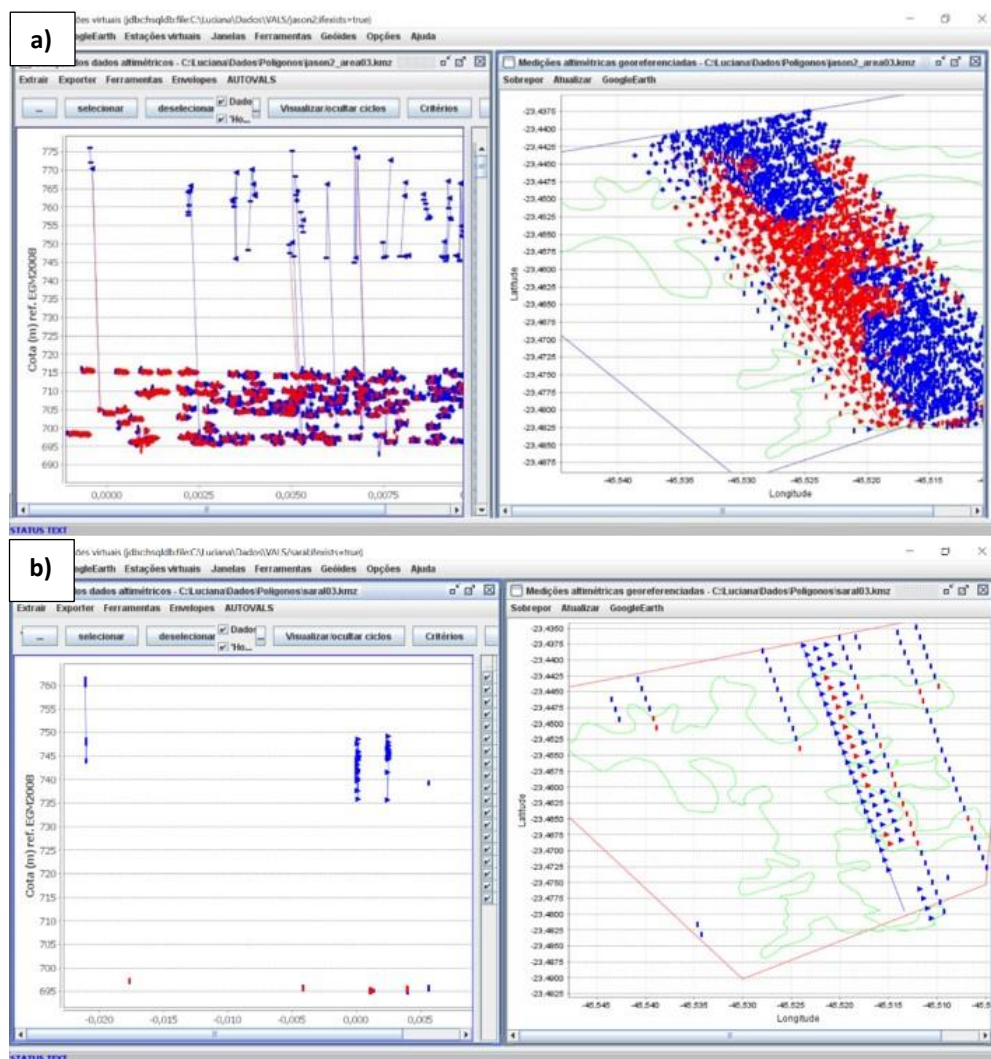


Fonte: Autora.

Outro fator observado no processo de análise e seleção dos dados altimétricos, foi a grande disparidade quanto à quantidade de medições disponíveis para cada uma das missões altimétricas analisadas. Cada satélite possui um tempo específico de revisita de suas trilhas, sendo 10 dias para o Jason-2 e 35 dias para o SARAL. Desta forma, o número de medições obtidas pela missão Jason-2 foi aproximadamente três vezes maior se comparado a missão SARAL. Consequentemente, essa diferença no número de informações foi mantida na série final dos dados de cada missão altimétrica, possivelmente impactando na confiabilidade dessas séries.

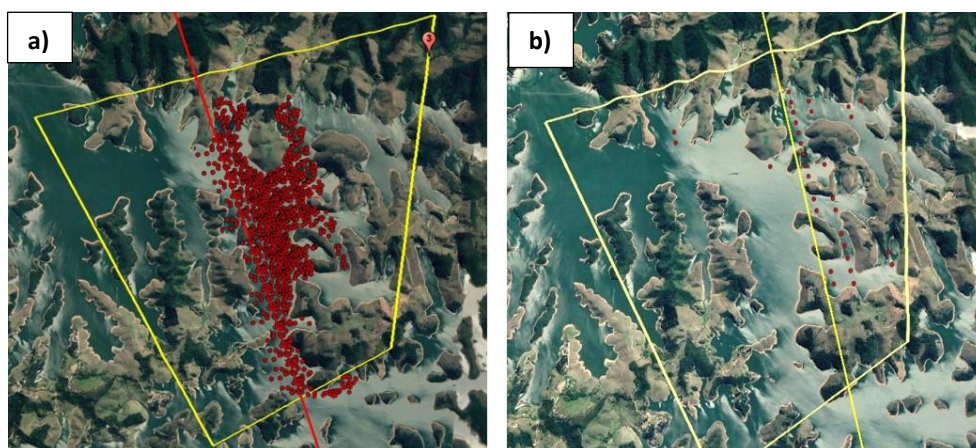
As Figuras 31 e 32 apresentam todos os pontos selecionados por meio do programa VALS, para as estações virtuais EV_J003 e EV_S003, das respectivas missões Jason-2 e SARAL e, correspondem a mesma área do reservatório de Paraibuna. Cada um desses pontos equivale a uma medição altimétrica, realizada em cada passagem na trilha de número 50 do Jason-2 e na trilha 549 para o SARAL. A diferença entre a quantidade de medições dessas missões pode ser notada, visualmente, nos gráficos apresentados pela ferramenta VALS (Figuras 31 e 32), onde observa-se a pequena quantidade de passagens da trilha da missão SARAL. Outro fator que influencia o número reduzido de medições da SARAL, deve-se ao período reduzido da atividade operacional dessa missão, onde foi possível obter dados somente a partir do segundo semestre de 2014 até início de 2016.

Figura 31 – Pontos selecionados para as estações EV_J003 e EV_S003, reservatório de Paraibuna: a) Trilhas do Jason-2; b) Trilhas do SARAL



Fonte: Autora.

Figura 32 – Área das estações virtuais EV_J003 e EV_S003 com os pontos selecionados: a) Trilhas do Jason-2; b) Trilhas do SARAL



Fonte: Autora.

Neste estudo, foram geradas 12 séries temporais, uma para cada EV, sendo 10 para o reservatório de Paraibuna em razão do tamanho do espelho d'água e da passagem das trilhas dos satélites Jason-2 e SARAL. Para os reservatórios de Atibainha e Jaguari-Jacareí foram criadas uma série altimétrica para cada, visto que estes possuem somente a passagem de uma trilha da missão SARAL. O programa VALS não permite a geração de séries temporais altimétricas com dados de diferentes missões de satélite, no entanto, permite reunir dados de diversas trilhas do mesmo satélite, como ocorrido com a EV_S005.

Ao concluir a seleção das medidas consistentes para cada EV, o VALS processa todas as medições gerando uma série altimétrica, com as médias e medianas para cada trilha, assim como, as incertezas para cada um destes métodos. A incerteza é calculada pelo desvio médio absoluto de cada medida dentro do mesmo ciclo. As séries de dados geradas podem ser visualizadas em um gráfico gerado pelo VALS, onde são exibidas as médias, medianas e as incertezas, permitindo verificar se há valores selecionados muito dispersos da média (Figura 33), possibilitando que seja realizado um refinamento na seleção dos dados.

Figura 33 – Série de dados gerada pelo VALS para a EV_J003



Fonte: Autora.

O processamento dos dados de altimetria de radar por satélite, para hidrologia continental, envolve muitas etapas que seriam difíceis de tratar sem um programa de computador. O VALS foi construído com objetivo de auxiliar nestas etapas, mesmo assim, é uma ferramenta que necessita de várias intervenções manuais, principalmente na etapa de seleção das medições altimétricas. Como o VALS não é um software de código aberto, não há possibilidade de ser aprimorado ou adaptado à outras necessidades. Entretanto, mesmo o VALS sendo um aplicativo que demanda de um longo tempo destinado à seleção dos dados, este mostrou ser uma ferramenta eficiente para a elaboração de séries temporais de nível de água das EVs.

Todo processo de seleção manual das medições altimétricas para geração das séries temporais, que inclui análise e refinamento, foi realizado separadamente para cada uma das estações virtuais deste estudo. Estas atividades consomem um longo tempo de dedicação e devem ser realizadas com bastante critério. Esta etapa pode ser considerada como a principal para garantir qualidade e confiabilidade na geração da série temporal altimétrica, principalmente no que se refere a aplicação destes dados em estudos na área da hidrologia.

O fato de a seleção manual dos dados ter sido realizada por meio da ferramenta VALS, a qual permite a aplicação dos algoritmos de correção e ao mesmo tempo a visualização das medidas altimétricas em um ambiente tridimensional, facilitou a seleção das medições sob as áreas analisadas. Pode-se destacar como vantagem da utilização do método de seleção manual, a viabilização da seleção segura dos dados, evitando incluir as medidas que não se encontram no plano de água, como regiões como ilhas ou margens. O método manual pode também ser aplicado em estudos onde são analisados rios estreitos ou mesmo lagos e reservatórios localizados em áreas complexas com acentuadas variações de relevo.

Silva (2010) analisou a seleção de dados altimétricos por meio de três métodos: manual, semiautomático e automático. Concluiu que o método manual, com a utilização do aplicativo VALS, foi o que demonstrou ser o melhor meio para se extrair as alturas altimétricas em águas continentais. Neste estudo, Silva constatou que, com uma seleção criteriosa dos dados, é possível a utilização do método manual, para rios estreitos com aproximadamente 20 m de largura. Porém salientou que esse método, não pode apresentar-se como uma solução definitiva, devido ao longo tempo despendido para sua execução, devendo, sobretudo, ser considerado como uma referência de qualidade para avaliação de futuros métodos automáticos.

Em um estudo no Rio São Francisco, Pereira (2018) utilizou um método semiautomático para a seleção dos dados altimétricos. Neste método, os dados são

selecionados a partir de uma coordenada central da área de interesse (*i.e.* rios, lagos ou reservatórios), em conjunto com arquivos do tipo shapefile (que possui as coordenadas do contorno da área do espelho d'água) e das trilhas das missões altimétricas. Para a seleção dos dados foi fixada uma distância limite da coordenada central até o dado, nesse estudo definida em um quilometro. O programa, desenvolvido por Pereira, baseia-se nestas informações para realizar uma busca em um banco de dados que contém as informações altimétricas, organizadas por órbita e ciclo. Este processo de seleção dos dados semiautomático, não possui flexibilidade quanto a distância da coordenada central, limitando a seleção de dados a uma determina área, mesmo havendo dados válidos em uma distância maior que a pré-fixada.

O método semiautomático em relação ao manual possui a vantagem de não consumir um tempo excessivo no processo de seleção dos dados, porém tem maior probabilidade de não selecionar medidas válidas. Já o método de seleção manual, permite a seleção dos dados independente de uma distância pré-definida, possibilitando a seleção de todos os dados válidos, apresentando uma vantagem em relação ao método semiautomático.

Ainda no processo de seleção dos dados, no método manual é possível localizar as medidas altimétricas inconsistentes que se encontram sob a área do espelho d'água, devido aos seus valores completamente fora dos padrões esperados, ou seja, valores extremos. Essas medidas são normalmente medições afetadas por problemas instrumentais, ambientais ou geofísicos e não devem ser consideradas para o cálculo das medianas, pois alterariam consideravelmente os valores das séries temporais. No método semiautomático utilizado por Pereira (2018), os valores extremos seriam retirados somente quando a diferença entre esse valor e a mediana fosse igual ou superior a três metros, valor este fixado no programa. Assim, o processo de seleção manual apresenta-se mais uma vez vantajoso em relação ao semiautomático, pois permite a exclusão de medidas inconsistentes independentemente do valor da diferença.

O método manual demonstrou ser um eficiente meio para extrair os níveis de água medidos pelas missões altimétricas. Ao todo, foram geradas 12 séries temporais para as estações virtuais definidas para os reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacaré e Paraibuna. Ao finalizar a seleção dos dados altimétricos, constitui-se as séries altimétricas por meio das medianas, sendo cada ponto da série temporal caracterizado individualmente através da data de aquisição e da posição geográfica. Muitos outros autores, como Frappart *et al.* (2006), Maillard *et al.* (2015) e Pereira (2018) também utilizaram a mediana, por esta ser uma medida que caracteriza o centro da distribuição de um conjunto de dados reduzindo a influência de medidas extremas. Silva (2010) ainda ressaltou que, a mediana se apresenta como uma

medida estatística mais representativa do que a média para definição da altura de água a cada passagem do satélite, devido ao baixo número de medições e a grande probabilidade de pontos falsos.

Após geração da série de dados a partir das medianas, foi adotado o procedimento, conforme realizado nos estudos feitos por Silva (2010), de calcular a dispersão dessas medidas e associá-las às medianas, visando aumentar a qualidade e confiabilidade dos resultados.

Validação dos dados altimétricos

Assim que as séries temporais altimétricas foram geradas, estas foram validadas com as séries temporais das estações fluviométricas dos reservatórios. A quantidade de medições incluídas nas séries temporais de cada EV é proporcional ao tamanho da área, ao número de trilhas do satélite na região e da quantidade de informações inconsistentes.

Antes da comparação efetiva dos dados, algumas particularidades foram verificadas, como a localização, altitude e a referência das medidas de níveis para todas as estações envolvidas, tanto as EVs como as *in situ*. Constatou-se que as medidas das estações localizadas nos reservatórios são referenciadas ao Datum vertical de Imbituba-SC, ou seja, as réguas dos reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacaré e Paraibuna não estão na mesma referência que as medidas dos altímetros por radar, que foram convertidos para a referência do geoide EGM2008. Apesar das medidas estarem em referências distintas, foi realizada uma comparação direta entre os valores das estações *in situ* e os medidos pelo altímetro. O resultado dessa comparação pode resultar em uma diferença entre 0 +-30cm (LOPES, 2007).

Quando as EVs estão distantes das estações *in situ*, ou mesmo, estão localizadas em áreas de topografia complexa, esta verificação é importante, pois pode existir uma variação na altitude entre elas, resultando em diferenças dos níveis de água. No estudo do Rio São Francisco, Pereira (2018) verificou se as estações virtuais definidas para as áreas ao longo do rio estavam na mesma altitude das estações *in situ*. Neste estudo, as EVs estavam definidas com distâncias que variavam de 0 a 30 km da estação *in situ*. Para validar a altitude das EVs foram realizadas campanhas de campo, utilizando receptores GPS de alta precisão. Pereira (2018) encontrou diferenças entre as altitudes definidas para as estações virtuais e as *in situ*, com erros inferiores a cinco centímetros.

As altitudes das EVs do presente estudo, foram consideradas equivalentes as altitudes das estações *in situ* de referência, devido a localização delas serem próximas, mantendo uma

distância entre 0,41 e 6,0 km, desta maneira, não houve a necessidade da realização de campanhas de campo para validá-las.

As séries de dados altimétricos da missão SARAL foram processados com o uso do algoritmo de correção ICE-1 e as séries da missão Jason-2 com o algoritmo ICE-3. A aplicação destes algoritmos foi feita por meio do aplicativo VALS. A definição de qual programa de correção deveria ser utilizado, foi baseada no consenso de vários autores, como Silva (2010) e Frappart *et al.* (2006), que afirmam que o ICE-1 é o algoritmo que melhor se adapta às medições em águas continentais, gerando resultados 30 cm mais precisos. O algoritmo ICE-3 é similar ao ICE-1, consiste também no tratamento de forma de onda e foi utilizado para tratamento dos dados da missão Jason-2, por Damasceno (2017). Os dois algoritmos foram analisados neste estudo aplicando-os aos dados das missões SARAL e Jason-2, concluindo que ambos geravam dados com qualidade correspondente. Porém, especificamente para a missão Jason-2, o ICE-3 apresentou um número maior de medidas altimétricas, sendo este escolhido para tratamento das medidas dessa missão.

No estudo realizado por Pereira (2018), foi aplicado inicialmente o algoritmo de correção ICE-1 para a eliminação de erros grosseiros, sobre todo conjunto de pontos da missão SARAL. E, para eliminar os erros não identificados pelo ICE-1, aplicou-se outro algoritmo de correção, o RANSAC (Random Sample Consensus). A filosofia do RANSAC é oposta à de outras técnicas de suavização de erros, ao invés de utilizar o máximo de dados possíveis com a posterior eliminação de dados grosseiros ou inválidos, ele utiliza uma amostra pequena e agrega a esse conjunto os dados mais consistentes. A aplicação destes algoritmos foi feita por meio de programas desenvolvidos para esta finalidade. No estudo presente, o processamento dos algoritmos de correção foi feito por meio do aplicativo VALS, que permite a aplicação de somente um algoritmo por conjunto de dados.

Assim que as séries temporais altimétricas foram geradas, foi realizada a comparação entre as séries das EVs e das estações *in situ*. Este tipo de comparação é definido por alguns autores como validação externa, quando se compara dados altimétricos com dados de outra fonte, como exemplo dados de estações fluviométricas. Este procedimento, realizado através de um programa desenvolvido para este fim, fez a comparação das duas séries temporais correlacionando as datas e os locais, calculando as diferenças e gerando os resultados. Este processamento utilizou linguagem de programação Python e a ferramenta de banco de dados PostgreSQL, que permite o armazenamento e processamento de dados através de comandos SQL. Os dados dos altímetros foram comparados com os dados *in situ* e, a partir da diferença

entre essas medidas, foi calculado o RMS (raiz da média dos quadrados), gerando os indicadores de qualidade dos dados altimétricos.

Reservatório de Paraibuna

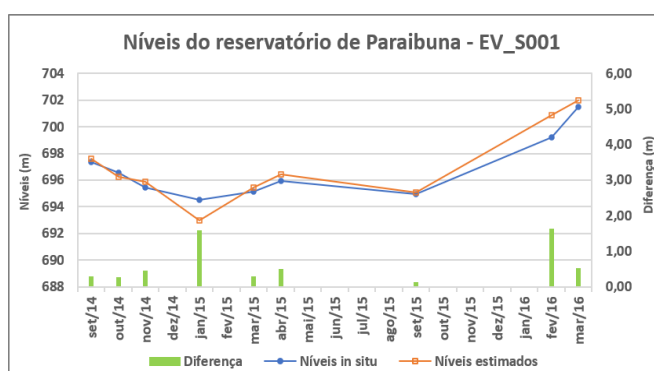
Devido a passagem das missões SARAL e Jason-2 sobre o reservatório de Paraibuna, foram realizadas as análises dos dados separadamente para cada missão altimétrica. O período analisado foi diferente conforme a disponibilidade de cada missão, sendo para a Jason-2 de 2010 a 2019 (Figura 35) e para a SARAL de 2014 a 2016 (Figura 34). Na Tabela 7, são apresentadas as informações das séries altimétricas das missões SARAL e Jason-2, geradas para a área 01 do reservatório de Paraibuna.

Tabela 7 – Informações das séries altimétricas da área 01 de Paraibuna

<i>Missão</i>	JASON-2	SARAL
<i>Estação</i>	EV_J001	EV_S001
<i>Trilha</i>	50	549
<i>Ciclos</i>	111	9
<i>Medições</i>	565	103
<i>RMS</i>	1,05 m	0,82 m

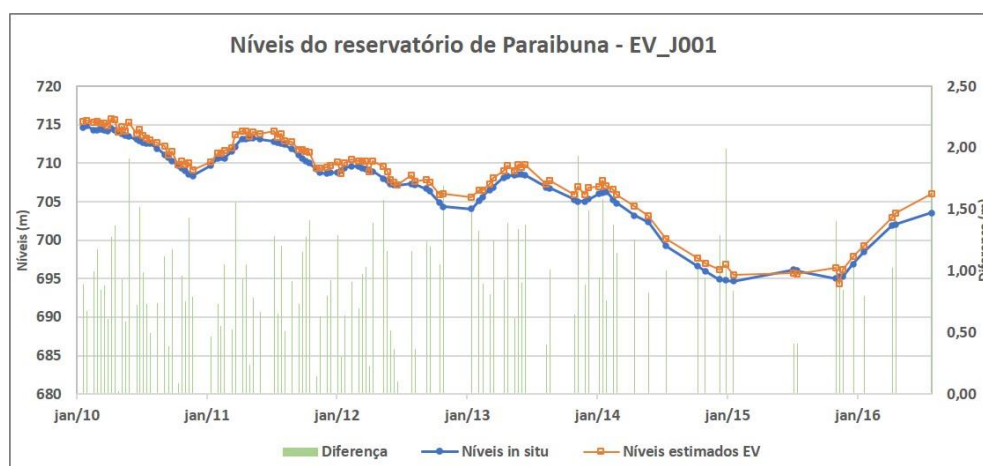
Fonte: Autora.

Figura 34 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora.

Figura 35 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados *in situ* x missão Jason-2.



Fonte: Autora.

A estação virtual EV_J001 foi a que apresentou a menor quantidade de medições altimétricas da missão Jason-2, devido a exclusão de muitos valores inconsistentes. É possível que a presença de muitas medidas inconsistentes e, conseqüentemente, a exclusão destas medidas, tenha motivado o mais alto RMS de todas as EVs do reservatório de Paraibuna, no valor de 1,05 m. Ainda assim, esta EV apresentou boa similaridade com os dados *in situ*. A estação EV_S001 da missão SARAL, com uma quantidade muito pequena de amostras, demonstrou também boa semelhança com os dados *in situ*, gerando um RMS de 0,82 m.

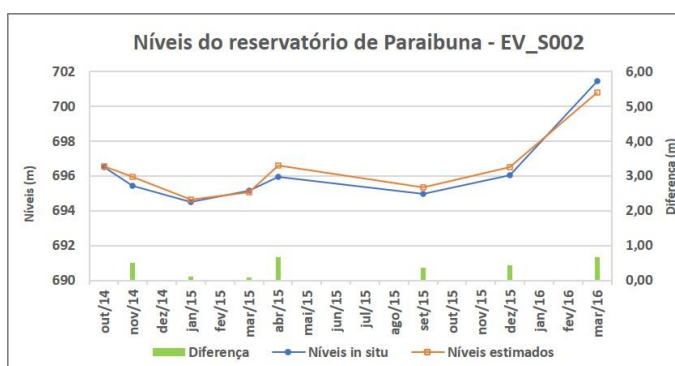
As estações virtuais EV_J002 e EV_S002, respectivamente das missões Jason-2 e SARAL, apresentaram resultados semelhantes aos das estações da área 02, conforme apresentados na Tabela 8 e Figuras 36 e 37.

Tabela 8 – Informações das séries altimétricas da área 02 de Paraibuna

<i>Missão</i>	JASON-2	SARAL
<i>Estação</i>	EV_J002	EV_S002
<i>Trilha</i>	50	549
<i>Ciclos</i>	192	8
<i>Medições</i>	2007	67
<i>RMS (m)</i>	0,90	0,42

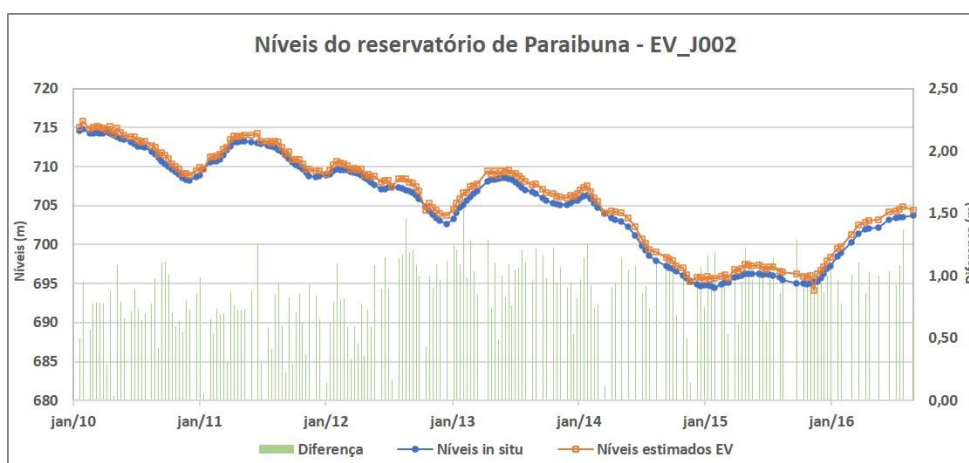
Fonte: Autora.

Figura 36 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora.

Figura 37 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados *in situ* x missão Jason-2.



Fonte: Autora.

Observa-se que, para a área 02 do reservatório de Paraibuna a quantidade de medições consistentes obtidas para a missão Jason-2 foram quase quatro vezes maior que para a área 01 e o valor de RMS calculado para a EV_J002 foi de 0,90 m. A estação EV_S002 da missão SARAL registrou RMS de 0,42, um bom resultado, entretanto, para um número muito pequeno de medições (Figura 36), igualmente as EVs dessa missão.

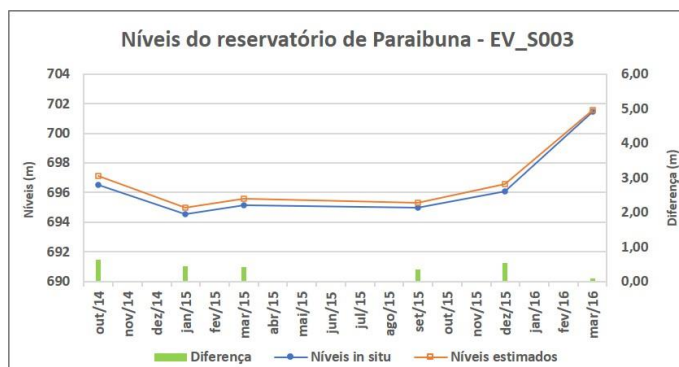
As EVs da área 03 e 04 para a missão Jason-2, foram as que alcançaram os melhores valores de RMS para o reservatório de Paraibuna de 0,88 e 0,84 m, respectivamente para as estações EV_J003 e EV_J004, conforme Tabelas 9 e 10. Estas estações virtuais foram as que contemplaram a maior quantidade de medições válidas.

Tabela 9 – Informações das séries altimétricas da área 03 de Paraibuna

<i>Missão</i>	JASON-2	SARAL
<i>Estação</i>	EV_J003	EV_S003
<i>Trilha</i>	50	549
<i>Ciclos</i>	211	6
<i>Medições</i>	2828	64
<i>RMS (m)</i>	0,88	0,43

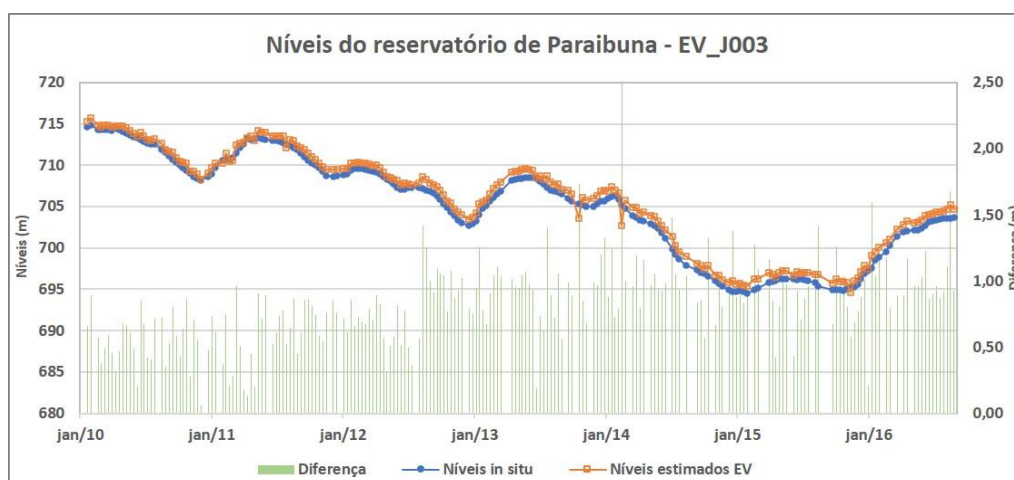
Fonte: Autora.

Figura 38 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora.

Figura 39 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados *in situ* x missão Jason-2



Fonte: Autora.

Na Figura 39, pode-se observar que os níveis estimados pela missão Jason-2 acompanharam os níveis medidos para estação *in situ* do reservatório, por todo o período, apresentando duas diferenças maiores que 1,50 m. Já a missão SARAL obteve um valor de 0,43 de RMS. Apesar deste resultado ser considerado bom, este foi baseado somente em medições de 6 ciclos do satélite, ou seja, um número muito baixo de amostras (Figura 38).

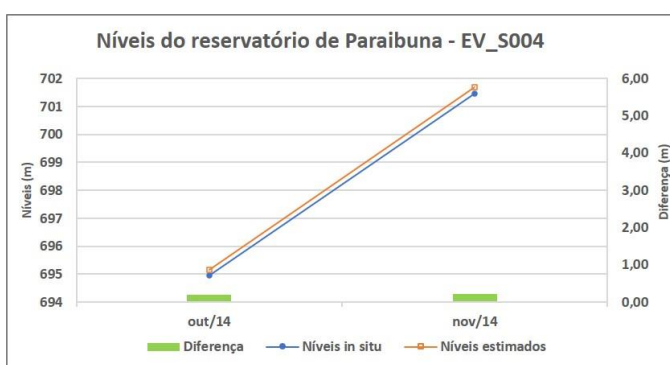
A pequena quantidade de medições da missão SARAL persistiu também para a estação virtual EV_S004, com apenas duas medições (Figura 40). O RMS calculado para a EV_S004 da SARAL foi de 0,20 m. A missão Jason-2 apresentou o melhor resultado para o reservatório de Paraibuna, com a estação virtual EV_J004, onde o número de medições também foi o maior de todas as EVs criadas para este reservatório (Figura 41), apresentando um RMS de 0,84 m (Tabela 10).

Tabela 10 – Informações das séries altimétricas da área 04 de Paraibuna

<i>Missão</i>	JASON-2	SARAL
<i>Estação</i>	EV_J004	EV_S004
<i>Trilha</i>	50	549
<i>Ciclos</i>	224	2
<i>Medições</i>	3048	24
<i>RMS (m)</i>	0,84	0,20

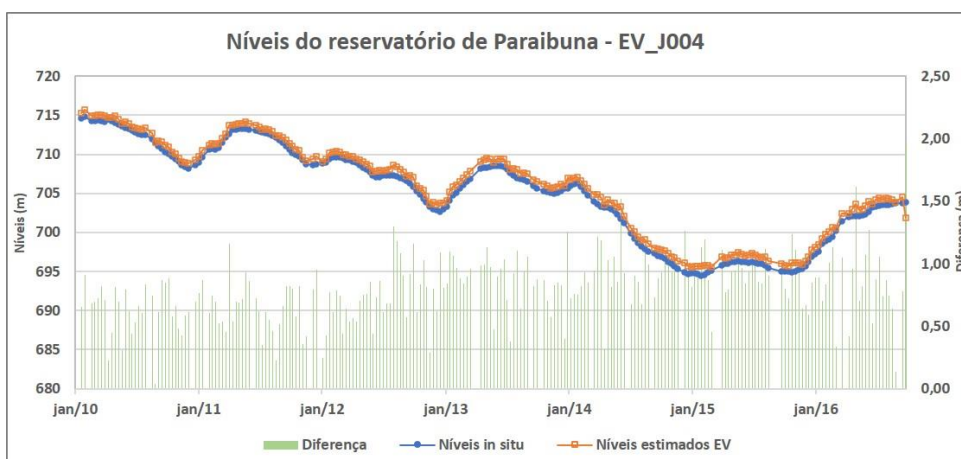
Fonte: Autora.

Figura 40 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora.

Figura 41 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados *in situ* x missão Jason-2



Fonte: Autora.

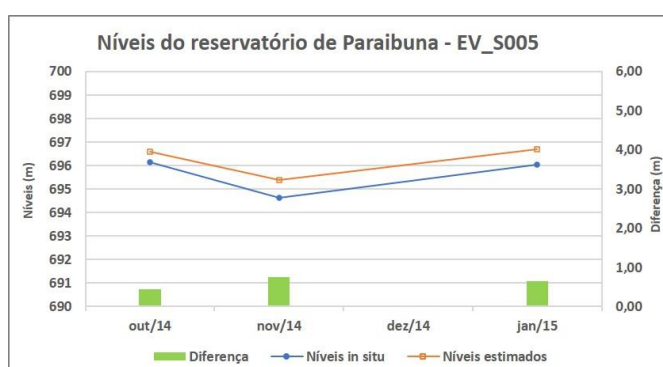
A estação EV_S005 da missão SARAL obteve um RMS de 0,62 m (Tabela 11), baseado somente em três ciclos altimétricos (Figura 42), mantendo o padrão de resultado de todas as estações virtuais geradas para esta missão e reservatório. Para a estação EV_J005 da missão Jason-2 foi calculado um RMS de 0,91 m (Figura 43). Este resultado foi o segundo maior de todas as estações geradas, por essa missão, para o reservatório de Paraibuna e a segunda que obteve o menor número de medições.

Tabela 11 – Informações das séries altimétricas da área 05 de Paraibuna

<i>Missão</i>	JASON-2	SARAL
<i>Estação</i>	EV_J005	EV_S005
<i>Trilha</i>	50	549/906
<i>Ciclos</i>	168	3
<i>Medições</i>	1735	39
<i>RMS (m)</i>	0,91	0,62

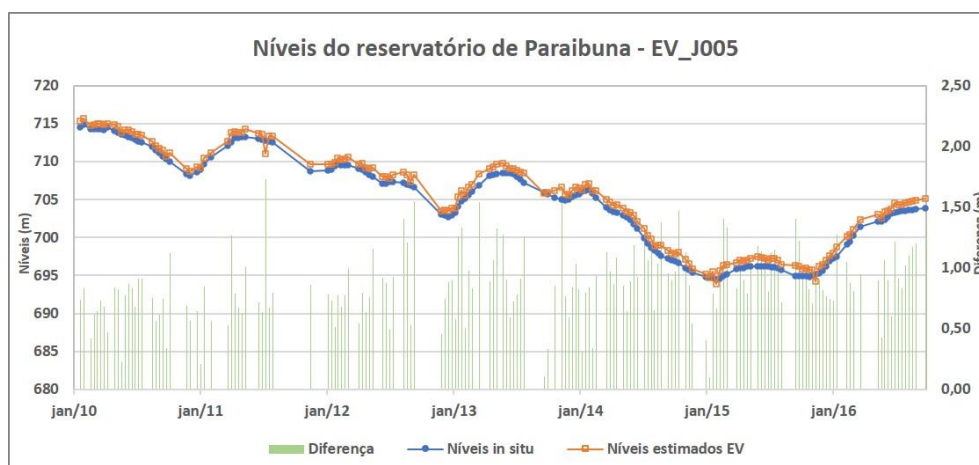
Fonte: Autora

Figura 42 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora

Figura 43 – Comparação dos níveis do reservatório de Paraibuna: dados *in situ* x missão Jason-2



Fonte: Autora

Reservatório de Atibainha

A área do reservatório de Atibainha inclui somente a passagem da trilha 91 da missão SARAL, a qual compreende um tempo de revisita de 35 dias. Esta característica e mais o fato

dessa missão possuir um tempo curto de operacionalização, de agosto de 2014 a julho de 2016, quando a órbita deste satélite deixou de ser repetitiva, contribuíram para o número reduzido de informações altimétricas disponíveis. Assim como, o tamanho da trilha desta missão sobre a área da estação virtual desse reservatório ser de 0,41 km. Todos estes motivos foram determinantes para o pequeno número de medições altimétricas consistentes, obtidas por essa missão (Figura 44).

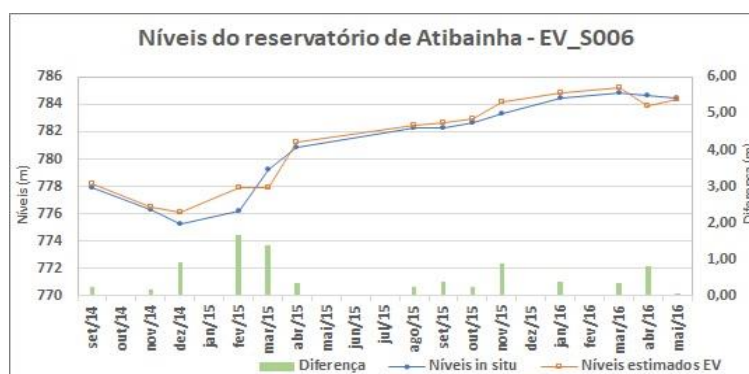
Apesar de número reduzido de medições, os níveis altimétricos estimados para este reservatório apresentaram as mesmas flutuações das cotas registradas pela estação *in situ*, apresentando um RMS de 0,73 m (Tabela 12), baseados em 14 ciclos.

Tabela 12 – Informações da série altimétrica de Atibainha

Missão	SARAL
Estação	EV_S006
Trilha	91
Ciclos	14
Medições	112
RMS (m)	0,73

Fonte: Autora

Figura 44 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora

Reservatório de Jaguari-Jacareí

O reservatório de Jaguari-Jacareí, assim como o Atibainha, abrange, em sua área, somente a passagem da trilha 91 do satélite SARAL. A trilha sobre este reservatório possui o tamanho de 0,89 km.

O resultado da comparação dos níveis altimétricos com os níveis medidos *in situ* da estação EV_S007, demonstra, como nos casos anteriores, uma proximidade entre essas medidas, acompanhando todas as variações ocorridas no reservatório ao longo de todo período analisado. O RMS calculado para a estação virtual EV_S007 foi baseado em 12 ciclos (Figura 45), apresentando o valor de 1,13 m (Tabela 13), o maior encontrado nas comparações de todos os reservatórios deste estudo.

Tabela 13 – Informações da série altimétrica de Jaguari-Jacareí

<i>Missão</i>	SARAL
<i>Estação</i>	EV_S007
<i>Trilha</i>	91
<i>Ciclos</i>	12
<i>Medições</i>	382
<i>RMS (m)</i>	1,13

Fonte: Autora

Figura 45 – Comparação dos níveis do reservatório: dados *in situ* x missão SARAL



Fonte: Autora

Pode-se destacar que, as medições estimadas pelo Jason-2 para todas as áreas do reservatório de Paraibuna, acompanharam os níveis de água medidos pelas estações *in situ*, compreendendo os períodos de cheias e estiagens ocorridas no reservatório, ao longo de todo o período de sete anos analisados. Os dados altimétricos registraram progressiva queda dos níveis de água do reservatório iniciadas entre janeiro e fevereiro de 2014, resultando nos menores valores no ano de 2015, como também acompanharam a gradativa elevação ocorrida a partir do início de 2016.

As estações virtuais da missão Jason-2 que tiveram maior acurácia foram as mesmas que contemplaram o maior número de medições consistentes (3000 aproximadamente) e as que possuíam extensões das trilhas do satélite sobre o plano d'água maiores que 3,5 km. Estas estações, EV_J003 e EV_J004, obtiveram os respectivos RMS de 0,88 e 0,84 m. Já as estações EV_J002 e EVJ005, com trilhas de 2,5 e 6,0 km, nesta ordem, dispunham de um número similar de medições válidas, por volta de 2000 e, chegaram a um RMS semelhante de 0,90 e 0,91 m, respectivamente. A estação virtual com menor acurácia, para a missão Jason-2, foi a EV_J001 relativa à área 01 do reservatório de Paraibuna. Esta área apresentava os maiores trechos de plano de água em meio as serras e vegetação, ou seja, compreendia a maior variação topográfica entre todas as áreas, apesar de sua trilha ter aproximadamente 4,6 km. A EV_J001 foi também a que registrou o mais baixo número de medições altimétricas, por volta de 600.

Pode-se ressaltar que as estações com o menor acurácia (EV_J001 e EV_J005) são as localizadas nas duas extremidades do reservatório de Paraibuna e, que possuem as maiores variações dos corpos d'água no entorno das trilhas do satélite, podendo sofrer maiores

influências por ecos provenientes das superfícies adjacentes ao reservatório, ocasionando em perda de informações.

Os dados altimétricos da missão SARAL, também demonstraram possuir correspondência com os dados *in situ*, apesar do número muito reduzido de medições. Os valores de RMS das cinco estações virtuais criadas para o reservatório de Paraibuna tiveram uma variação entre 0,20 a 0,82 m. As EVs dos reservatórios de Atibainha e Jaguari-Jacaré permaneceram com mesmo padrão de número reduzido de medidas altimétrica consistentes, com RMS de 0,73 e 1,13 m respectivamente.

O RMS calculado para as EVs da missão SARAL apresentaram um RMS melhor que os gerados para as EVs da missão Jason-2, no entanto, essas estações possuem um número muito reduzido de medições. O fato da missão SARAL possuir poucas medidas para os reservatórios analisados nesse estudo, pode ser justificado pelo estudo realizado por Arsen *et al.* (2015). Neste estudo, Arsen *et al.* analisaram 15 séries temporais obtidas com a missão SARAL, destas 12 apresentaram uma boa correlação com as medições *in situ*, com os melhores resultados de RMS entre 5 e 17 cm. Todas estas áreas analisadas possuíam grandes extensões de trilhas da missão SARAL, variando entre 5 e 28 km. Entretanto, obtiveram o pior resultado com RMS de 1,18 m, para um lago que compreendia uma extensão de apenas 2,5 km. Neste estudo, Arsen *et al.* concluíram que as medições da missão SARAL são geralmente extremamente bem correlacionadas com as medições *in situ*, possuindo uma boa precisão, porém em seções pequenas, os dados da SARAL geralmente são perdidos.

Essa tendência de perda de dados da missão SARAL em áreas pequenas, concluída por Arsen *et al.*, demonstra que o número baixo das medições dessa missão para os reservatórios analisados neste estudo, devem ser devido ao tamanho das trilhas deste satélite, entre 2,5 e 6,0 km para as EVs do reservatório de Paraibuna, de 0,41 km para o reservatório de Atibainha e de 0,89 km para o reservatório de Jaguari-Jacaré.

Os melhores resultados do estudo realizado por Pereira (2018), validando dados da missão SARAL, foram gerados em uma região que a largura do rio São Francisco é superior a 2,5 km. Tendo como o melhor erro médio quadrático no valor de 0,09 m para a EV de Morpará, utilizando o algoritmo ICE-1. Este resultado foi ainda justificado por a EV e a estação *in situ* estarem no mesmo ponto do rio. Os resultados com menor acurácia, foram para as EVs de Ibó, Santa Maria da Boa Vista e Penedo, com erros médios quadráticos relativos de 0,94 m, 1,38 m e 1,80 m respectivamente. Estes resultados foram relacionados com presença de vastas áreas de solo exposto às margens do rio, ou mesmo, bancos de areia no curso d'água, o que pode causar ruídos nas respostas capturadas pelo altímetro.

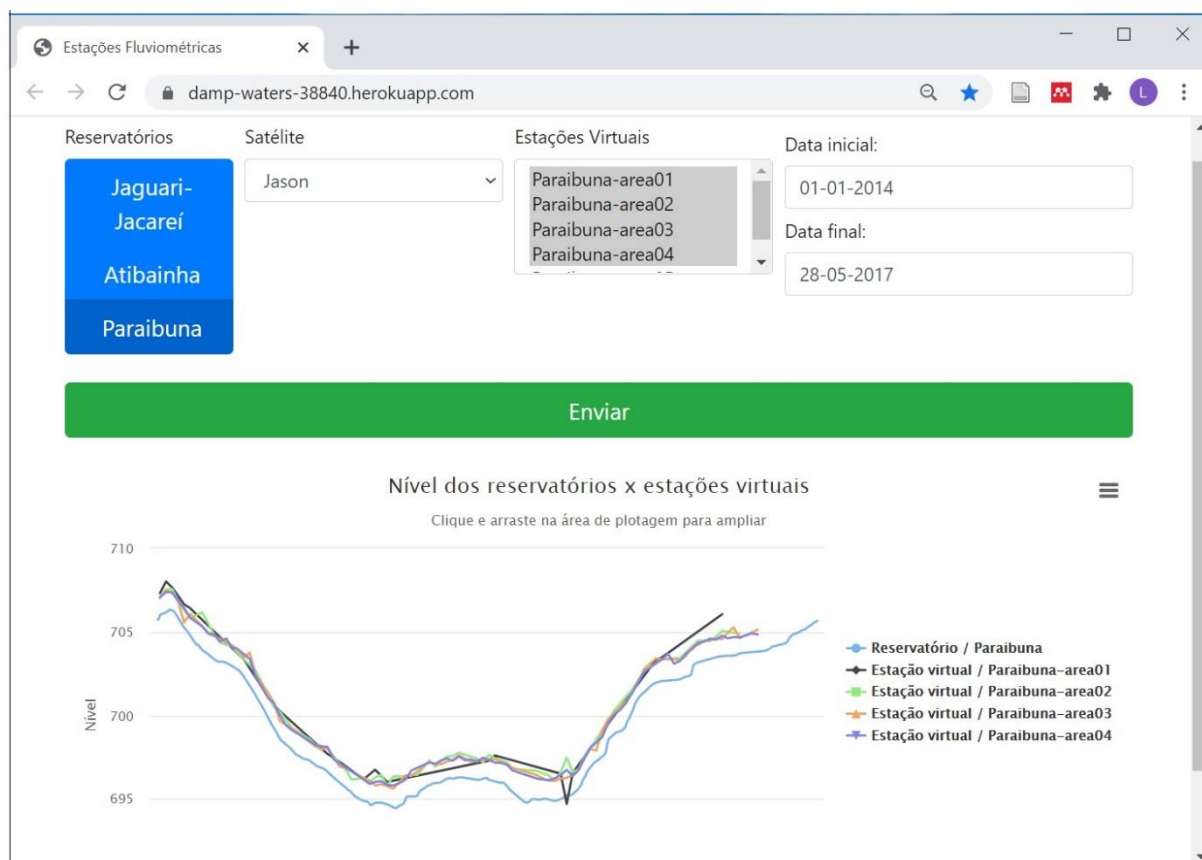
Disponibilização dos dados altimétricos

Um dos objetivos estabelecidos para esse estudo foi a difusão de conhecimento. Esta realizada por meio do desenvolvimento de um aplicativo, para disponibilização dos dados das estações virtuais altimétricas da missão SARAL e Jason-2, geradas no âmbito deste estudo. Assim sendo, foi elaborado e desenvolvido um portal para disponibilização dos dados via internet com acesso livre, utilizando recursos e ferramentas gratuitas. Nesta etapa, foi utilizada a linguagem de programação PHP e banco de dados padrão SQL.

Esta interface foi baseada na aplicação Hidrosat da ANA, que permite a aquisição de dados altimétricos consistidos de estações virtuais localizadas na América do Sul, armazenados em um banco de dados atualizado. Na base de dados disponibilizada pela ANA há somente uma estação virtual para toda a região Sudeste do Brasil, pertencente ao rio Ribeira de Iguape. Conforme o portal da ANA, o site desenvolvido neste estudo, disponibiliza dados consistidos das 12 estações virtuais geradas para os reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacaré e Paraibuna, assim como, oferece a opção de consultar os dados altimétricos por meio de gráficos e permite que os dados sejam salvos em formato texto ou Excel.

O aplicativo pode ser acessado através do link: <https://damp-waters-38840.herokuapp.com/> (Figura 46). O desenvolvimento desse portal e a disponibilização destes dados tem a finalidade de facilitar o acesso à informação científica, possibilitando a utilização destes dados em outros estudos, como validação dos dados altimétricos; avaliação de novos algoritmos de correções; validação de métodos automáticos de geração de séries altimétricas, ou ainda, em aplicações na área de hidrologia.

Figura 46 – Aplicação na internet para disponibilização de dados altimétricos dos reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacaré e Paraibuna



Fonte: Autora.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, as séries altimétricas foram construídas através da seleção manual dos dados, utilizando o programa VALS. Este programa, mostrou-se muito útil no processamento das medições altimétricas, viabilizando a visualização tridimensional das informações em forma de gráficos e a apresentação de metadados, facilitando a seleção dos pontos e a geração das séries temporais. Ainda foi muito útil para a aplicação das correções, utilizando algoritmos amplamente testados e pela facilidade de fazer a conversão da referência terrestre. A desvantagem encontrada utilizando esse aplicativo, foi o longo tempo empregado no trabalho de seleção manual dos dados, dificultando a aplicação desse método em estudos de grandes áreas ou com dados históricos.

Um recurso que poderia ser implementado nesse aplicativo, para facilitar a seleção manual das medições altimétricas, é de fazer uma pré-seleção automática dos dados a partir da inclusão de arquivos do tipo shapefile, com as coordenadas geográficas da área que se deseja

selecionar os dados. E, poderia ser considerada uma opção que permitisse a aplicação de dois algoritmos de correção consecutivamente, em um mesmo conjunto de dados.

No entanto, apesar do tempo despendido na etapa de seleção dos dados, o VALS possui vantagens indiscutíveis para o processamento e geração de séries altimétricas consistentes, podendo ser utilizado como uma referência de qualidade para validação de futuros processos automáticos.

Existem outras duas ferramentas para tratamento de dados altimétricos, como o MAPS e o SWGTOOL, ambas não foram analisadas neste estudo. Estes aplicativos em conjunto com o VALS, podem ser objetivo de comparação em um outro estudo, avaliando as vantagens e desvantagens de cada um.

Vale salientar que os resultados da validação das séries altimétricas deste estudo, demonstraram que as medidas estimadas pela altimetria espacial acompanharam as variações registradas pelas estações *in situ* de todos os reservatórios analisados. Destaca-se ainda, que o período analisado, correspondente a maior crise hídrica ocorrida na região, os níveis chegaram a atingir 10 m de diferença entre os maiores e menores níveis medidos e, que todas essas flutuações foram refletidas pela altimetria por satélite. Contudo, constatou-se que, as medições altimétricas apresentaram uma pequena diferença, em sua maioria, com valores superiores aos registrados pelas estações *in situ*. Essas diferenças, podem ser justificadas pelo tamanho (pequeno e médio) das trilhas analisadas; por variações na topografia; por diferenças entre as altitudes das estações virtuais e das *in situ*, ou ainda, devido as diferenças entre as referências de níveis. Entretanto, os resultados encontrados estão de acordo com outros estudos, como os de Silva (2010), Arsen *et al.* (2015), Pereira (2018).

A altimetria espacial é uma tecnologia promissora, com grandes potencialidades na área de hidrologia, tratando-se de uma área, ainda, pouco explorada, possui notáveis perspectivas de crescimento. Cabe ainda destacar que, a altimetria espacial tem a vantagem de as informações serem liberadas gratuitamente, permitindo a implementação de monitoramentos hidrológicos, com baixo custo financeiro em relação ao convencional, por meio da criação das estações virtuais. Isto facilita o aumento da rede de monitoramento hidrológico, em áreas de difícil acesso ou de monitoramento precário. Em áreas onde existem estações convencionais instaladas, a altimetria espacial pode ser útil para processos de acompanhamento, supervisão e auditoria. Assim como, pode melhorar o monitoramento hidrológico, ocupando as lacunas temporais e espaciais existentes na rede de estações convencionais, nas áreas onde há cobertura das trilhas das missões altimétricas, aumentando o número de estações de monitoramento em regiões com baixa densidade de estações convencionais. Um exemplo da

potencialidade do aumento de estações, pode ser visto neste estudo na área do reservatório de Paraibuna, onde foi possível a geração de 10 estações virtuais (5 para cada satélite), em contrapartida, a uma única estação convencional.

Com uma tecnologia cada vez melhor e problemas como a frequência temporal e precisão das medidas sendo revistos, por meio de estudos de validação e melhoria dos instrumentos, recomenda-se que a altimetria espacial, seja objeto de estudos futuros, para aplicações no campo da hidrologia, devido as suas grandes potencialidades.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho de avaliar a qualidade das medições altimétricas para determinar os níveis de água dos reservatórios de Atibainha, Jaguari-Jacareí e Paraibuna foi alcançado, uma vez que os resultados demonstraram que as medidas estimadas pelos altímetros resultaram em séries temporais altimétricas de níveis de água das estações virtuais similares às séries temporais registradas pelas estações *in situ*.

As missões altimétricas por satélite conseguiram representar as alturas dos níveis de água das estações *in situ* para todos os reservatórios analisados, com RMS entre 0,20 e 1,13 m para a missão SARAL e entre 0,84 e 1,05 m para a Jason-2. Assim, conclui-se que os dados de altimetria espacial das missões analisadas, fornecem alturas altimétricas com qualidade satisfatória para aplicações em águas continentais.

Esse trabalho contribuiu para afirmar que as medições altimétricas estimadas a partir de altímetros por radar acoplados em satélites, podem ser utilizados para monitorar reservatórios que não possuem monitoramento regular, principalmente os localizados em áreas remotas. Assim como, demonstrou que a altimetria espacial pode promover o aumento de pontos monitorados e que estes dados podem ser aplicados em diversos estudos da área da hidrologia. O desenvolvimento e disponibilização de um portal na internet, para consulta dos dados altimétricos analisados e consistidos no âmbito dessa dissertação, atendeu o objetivo específico desse estudo, de contribuir com a difusão de conhecimento científico.

REFERÊNCIAS

- ABILEAH, R; VIGNUDELLI, S; SCOZZARI, A. A completely remote sensing approach to monitoring reservoirs water volume. *In: INTERNATIONAL WATER TECHNOLOGY CONFERENCE*, 15., 2011, Alexandria, Egypt. **Anais [...]. IWTC**, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228517141>. Acesso em: 10 fev. 2019.
- ABREU, L. G. A. de C. **Determinação de variação de volume na represa de Três Marias com o uso de radar altimétrico e imagens orbitais**. Orientador: Philippe Maillard. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Caderno de capacitação em recursos hídricos**. 2016. Disponível em: <http://biblioteca.ana.gov.br/asp/prima-pdf.asp?codigoMidia=124835&iIndexSrv=1&nomeArquivo=CADERNO%5FCAPACITACAO%5FDE%5FRECURSOS+%5FHIDRICOS%5FVOLUME%5F8%5F%2Epdf>. Acesso em: 14 jun. 2020.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico; DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Relatório Conjunto Cantareira**. 2004. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2004/428-RelatorioConjuntoCantareira.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2020.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **HidroSat: monitoramento hidrológico por satélite**. Disponível em: <http://hidrosat.ana.gov.br/>. Acesso em: 30 mar. 2019.
- ARSEN, A.; CRÉTAUX, J. F.; ABARCA DEL RIO, R. Use of SARAL/AltiKa over Mountainous Lakes, Intercomparison with Envisat Mission. **Marine Geodesy**, v. 38, p. 534–548, 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01490419.2014.1002590>. Acesso em: 30 mar. 2019.
- BAUP, F.; FRAPPART, F.; MAUBANT, J. Combining high-resolution satellite images and altimetry to estimate the volume of small lakes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 5, p. 2007–2020, 2014. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/articles/18/2007/2014/>. Acesso em: 22 fev. 2019.
- BOERGENS, E. *et al.* Treating the hooking effect in satellite altimetry data: a case study along the Mekong river and its tributaries. **Remote Sensing**, v. 8, p. 91, 2016. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/2/91>. Acesso em: 13 mar. 2019.
- BONNEFOND, P. *et al.* The benefits of the Ka-band as evidenced from the SARAL/AltiKa altimetric mission: Quality assessment and unique characteristics of AltiKa data. **Remote Sensing**, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/1/83>. Acesso em: 22 fev. 2019.
- CALMANT, S. *et al.* Detection of Envisat RA2/ICE-1 retracked radar altimetry bias over the Amazon basin rivers using GPS. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 8, p. 1551-1564, abr. 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117712005091>. Acesso em: 05 mar. 2019.

CALMANT, S.; SEYLER, F. Continental surface waters from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14-15, p. 1113–1122, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.05.012>. Acesso em: 22 set. 2019.

CALMANT, S.; SEYLER, F.; CRETAUX, J. Monitoring Continental Surface Waters by Satellite Altimetry. **Surv. Geophys**, v. 29, p. 247–269, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9051-1>. Acesso em: 26 jun. 2019.

CAMPOS, I. O. *et al.* Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences: Series IIA: Earth and Planetary Science**, v. 333, n. 10, p. 633–643, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(01\)01688-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(01)01688-3). Acesso em: 22 mar. 2020.

CESP - Companhia Energética de São Paulo. **Paraibuna**. Disponível em: <https://www.cesp.com.br/geracao-de-energia/paraibuna/>. Acesso em: 22 jan. 2020.

CAZENAVE, A.; FU, L. L. **Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications**. Cambridge, Massachusetts: Academic Press, 2000. 463 p.

CNES. **SARAL/AltiKa Products Handbook**. 2. ed. França: CNES, 2013. 86 p.

COCHONNEAU, G. *et al.* Definição e monitoramento automático de estações linimétricas virtuais. In: Reunión Científica del ORE HYBAM - Hidrología y geodinámica actual de las cuencas sudamericanas, 4., set. 2011. Lima, Peru. **Anais [...]**. Lima, Peru: ORE HYBAM, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/271964123_Definicao_e_monitoramento_automatico_de_estacoes_linimetricas_virtuais. Acesso em: 19 maio. 2020

CONCHY, T. S. *et al.* Validação das medidas dos níveis de água fornecidas pelos satélites altimétrico ENVISAT e SARAL na bacia amazônica. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., Santos, 2017. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr/papers/validacao-das-medidas-dos-niveis-de-agua-fornecidas-pelos-satelites-altimetrico-envisat-e-saral-na-bacia-amazonica>. Acesso em: 14 jul. 2020

COSTI, A. C. Z. **Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na Bacia Amazônica**. Orientador: Néstor Aldo Campana. 2012. 158 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

CRETAUX, J.; BIRKETT, C. Lake studies from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14-15, p. 1098–1112, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002>. Acesso em: 21 mar. 2019.

CRETAUX, J. *et al.*; Absolute Calibration of Jason Radar Altimeters from GPS Kinematic Campaigns Over Lake Issykkul. **Marine Geodesy**, v. 34, p. 291–318, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/232821696_Absolute_Calibration_of_Jason_Radar_

Altimeters_from_GPS_Kinematic_Campaigns_Over_Lake_Issykkul. Acesso em: 23 jul. 2020.

CRETAUX, J. *et al.*; Calibration of Envisat radar altimeter over Lake Issykkul. **Advances in Space Research**, v. 51, p. 1523–1541, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.039>. Acesso em: 23 jul. 2020.

DA SILVA, J.; CALMANT, S.; SEYLER, F. Variabilidade espacial do nível d'água na bacia Amazônica durante eventos extremos. *In*: BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. (coord). **Secas na Amazônia: causas e consequências**. Local da editora: São Paulo, Oficina de textos, 2013. p. 209–242.

DAMASCENO, J. A. **Monitoramento hidrológico da Bacia do Rio Madeira por altimetria espacial**. Orientador: Joecila Santos da Silva. 2017. 115 f. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2017.

DOW, J. M.; MARTÍNEZ, F.; ZANDBERGEN, R. High precision altimetry from the ENVISAT mission. **Advances in Space Research**, v. 23, n. 4, p. 757–762, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(99\)00151-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(99)00151-9). Acesso em: 12 fev. 2019.

FRAPPART, F. *et al.* Floodplain water storage in the Negro River basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 4, p. 387–399, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.016>. Acesso em: 19 mar. 2019.

FRAPPART, F. *et al.* Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 2, p. 252–264, jan. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.027>. Acesso em: 23 jun. 2019.

GETIRANA, A. C. V. **Contribuições da altimetria espacial à modelagem hidrológica de grandes bacias na Amazônia**. Orientadores: Webe João Mansur; Marie-Paule Bonnet. 2009. 299 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HACKBART, V. C. S. *et al.* Avaliação expedita da heterogeneidade espacial horizontal intra e inter reservatórios do Sistema Cantareira (represas Jaguari e Jacareí, São Paulo). *In*: ECOLOGIA DE RESERVATÓRIOS E INTERFACES, 2015. São Paulo: Instituto de Biociências, 2015. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002682147>. Acesso em: 23 abr. 2020.

Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology. **Jason-CS (Sentinel-6)**. Disponível em: <https://sealevel.jpl.nasa.gov/missions/jasoncs/>. Acesso em: 20 abr. 2020.

LOPES, A. B. O geóide gravimétrico e o nível médio do mar na região do datum altimétrico brasileiro: um estudo comparativo. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 96, mar. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000100010>. Acesso em: 07 out. 2020.

MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S. New processing approaches on the retrieval of water levels in Envisat and SARAL radar altimetry over rivers: a case study of the São Francisco River, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 226–241, jan. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.027>. Acesso em: 20 set. 2019.

MARENGO, J. A. *et al.* A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, n. 106, p. 31–44, 2 set. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>. Acesso em: 22 maio 2020.

MOREIRA, D. M. **Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica**. Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho, Stéphane Calmant. 2010. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MOREIRA, D. M. **Geodésia aplicada ao monitoramento hidrológico da bacia Amazônica**. Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho, Stéphane Calmant, Félix Perosanz. 2016. 254 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MOSDAC - Meteorological & Oceanographic Satellite Data Archival Centre, ISRO. **Mosdac**. Disponível em: <https://www.mosdac.gov.in/saral-altika>. Acesso em: 28 abr. 2020.

National Aeronautics and Space Administration. **SWOT**: home. Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/>. Acesso em: 20 abr. 2020.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Cadastro de informações operacionais**. 2019. Disponível em: http://www.ons.org.br/%2FMPO%2FDocumento%20Normativo%2F2.%20Cadastros%20de%20Informa%C3%A7%C3%B5es%20Operacionais%20-%20SM%2010.18%2F2.3.%20Cadastros%20de%20Informa%C3%A7%C3%B5es%20Operacionais%20Hid%C3%A1ulicas%2FCD-OR.AE.PBS_Rev.10.pdf. Acesso em: 20 jul. 2020.

OVANDO, A. *et al.* Multi-temporal flood mapping and satellite altimetry used to evaluate the flood dynamics of the Bolivian Amazon wetlands. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 69, p. 27-40, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.02.013>. Acesso em: 26 mar. 2019.

OVANDO, A.; TEJADA, G.; TOMASELLA, J. Environmental Change and Water Ecosystem Services in the Bolivian Amazon Lowlands (Llanos de Moxos). **Global Land Project Newsletters**, p. 30-36, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283718758_Environmental_Change_and_Water_Ecosystem_Services_in_the_Bolivian_Amazon_Lowlands_Llanos_de_Moxos. Acesso em: 17 mar. 2019.

PEREIRA, E. O. **Altimetria por satélite radar na medição do nível d'água de rios de pequeno e médio porte**: um estudo de caso no Rio São Francisco. Orientador: Philippe Maillard. 2018. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-graduação do Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PEREIRA, E. O.; ABREU, L. G. A. C.; MAILLARD, P. Altimetria por satélite radar aplicada a hidrologia no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 2, p. 347-360, fev. 2017. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/320831615_ALTOMETRIA_POR_SATELITE_RADAR_APLICADA_A_HIDROLOGIA_NO_BRASIL_Satellite_Altimetry_for_Hydrology_in_Brazil. Acesso em: 22 mar. 2019.

POSTEL, S.; REEVE, T.; MCGUIGAN, C. Change the Course: A New Model of Freshwater Conservation and Restoration. **The Solutions Journal**, v. 5, n. 4, p. 28–34, 2014. Disponível em: <https://www.thesolutionsjournal.com/article/change-the-course-a-new-model-of-freshwater-conservation-and-restoration/>. Acesso em: 23 jun. 2019.

RICKO, M. *et al.* Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 3614-3636, 2012. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/258658832_Intercomparison_and_validation_of_continental_water_level_products_derived_from_satellite_radar_altimetry. Acesso em: 20 jul. 2019.

ROUX, E. *et al.* Producing time-series of river water height by means of satellite radar altimetry - Comparison of methods. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, p. 104-120, 2010. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626660903529023>. Acesso em: 23 set. 2019.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Relatório de sustentabilidade**. 2014. Disponível em:

http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/relatorios_sustentabilidade/sabesp_2014_RS_portugues.pdf. Acesso em: 11 jun. 2020.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Portal dos mananciais**. Disponível em:

<http://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?SistemaId=0>. Acesso em: 23 mar. 2019.

SATELLITE ALTIMETRY DATA. **Aviso**. Disponível em: <https://www.aviso.altimetry.fr>. Acesso em: 10 jun. 2020.

SEYLER, F. *et al.* From TOPEX/Poseidon to Jason-2/OSTM in the amazon basin. **Advances in Space Research**, v. 51, n. 8, p. 1542-1550, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.002>. Acesso em: 13 ago. 2019.

SILVA, J. S. D. **altimetria espacial aplicada ao estudo dos processos hídricos em zonas úmidas da bacia amazônica**. Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho, Stéphane Calmant. 2010. 312 f. Tese (Doutorado em Ciências) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SILVA, K. M. D. **Validação dos níveis de água fornecidos pelos satélites altimétricos jason 1, 2 e 3 na bacia amazônica**. Orientador: Joecila Santos da Silva. 2019. 96 f. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.

SILVA, M. T. Q. S. D.; FREITAS, S. R. C. D.; DALAZOANA, R. Avaliação da topografia do nível médio do mar na conexão dos data da rede altimétrica fundamental do Brasil. *In*: REUNION SIRGAS, 2013, Panamá. **Anais [...]**. Panamá: SIRGAS, 2013.

SILVA, M. V. **Associação da variabilidade climática dos oceanos com os níveis dos rios da Amazônia**: uma análise a partir de dados altimétricos. Orientadores: Joecila Santos da Silva, Luiz Antônio Cândido. 2017. 127 f. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2017.

SOARES, V. M. **Aspectos físicos e químicos do complexo de represas Paraibuna-Paraitinga, São Paulo**. Orientador: Marycel Elena Barbosa Cotrim. 2011. 234 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

VALS: manual de utilização. 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/110396782-Vals-definicao-e-atualizacao-de-estacoes-virtuais.html>. Acesso em: 8 maio 2020.

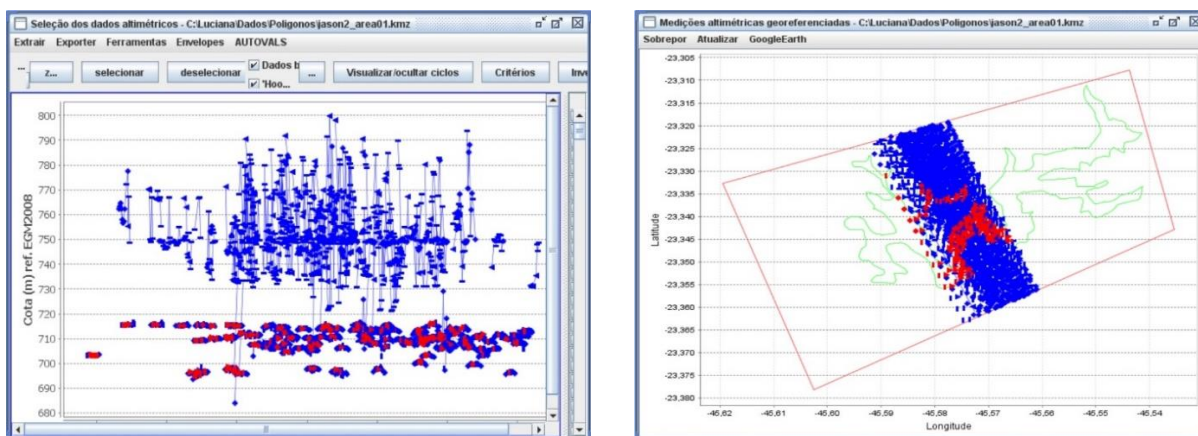
VERRON, J. *et al.* The SARAL/AltiKa Altimetry Satellite Mission. **Marine Geodesy**, v. 38, n. sup1, p. 2–21, 10 set. 2015. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01490419.2014.1000471>. Acessado em: 20 set. 2019.

VIGNUDELLI, S. *et al.* **Coastal altimetry**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. 567 p.

WHATELY, M.; CUNHA, P. **Cantareira 2006**: um olhar sobre o maior manancial de água da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2006. 68 p.

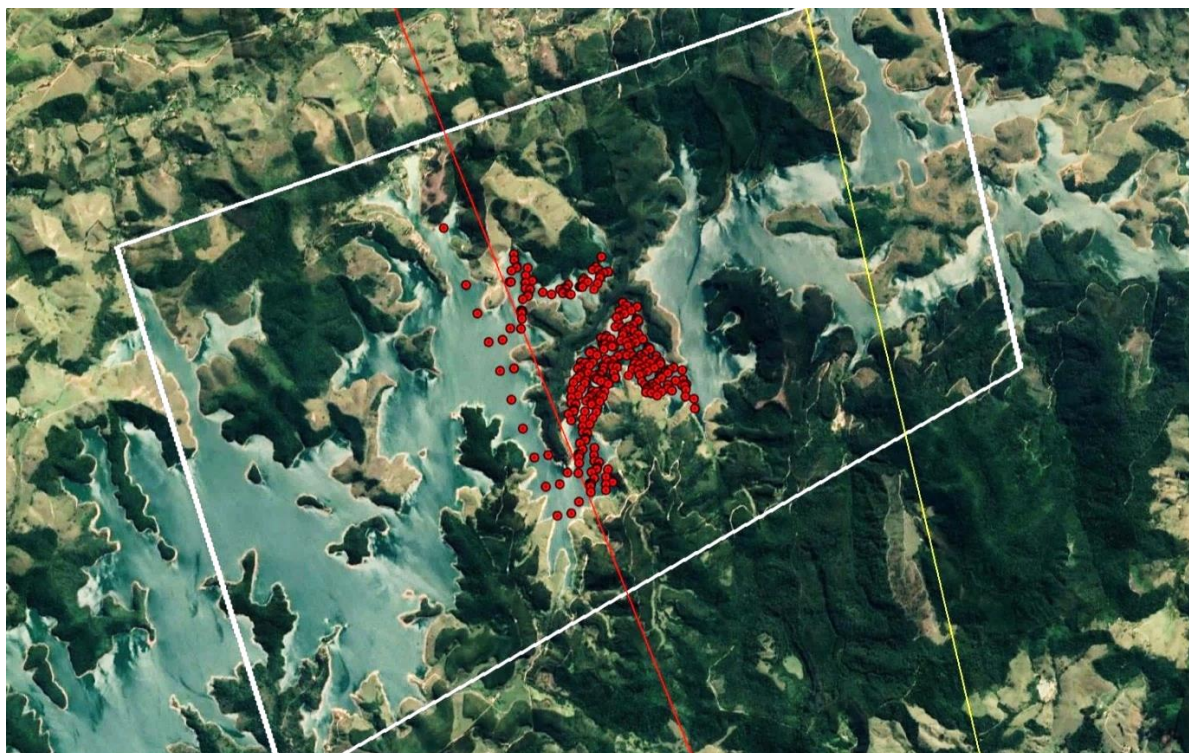
APÊNDICE A – Composição das estações virtuais dos reservatórios estudados.

Figura 47 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J001, do reservatório de Paraibuna



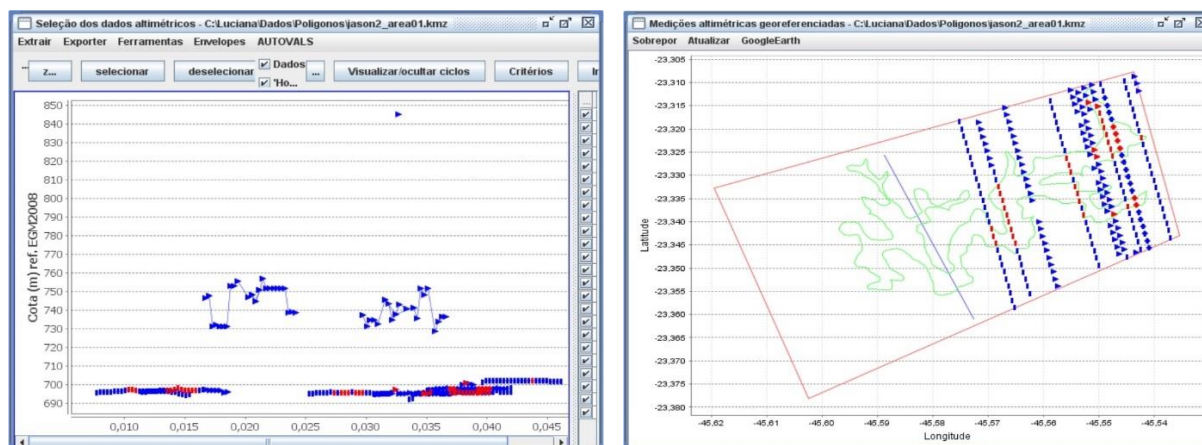
Fonte: Autora

Figura 48 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J001 do reservatório de Paraibuna



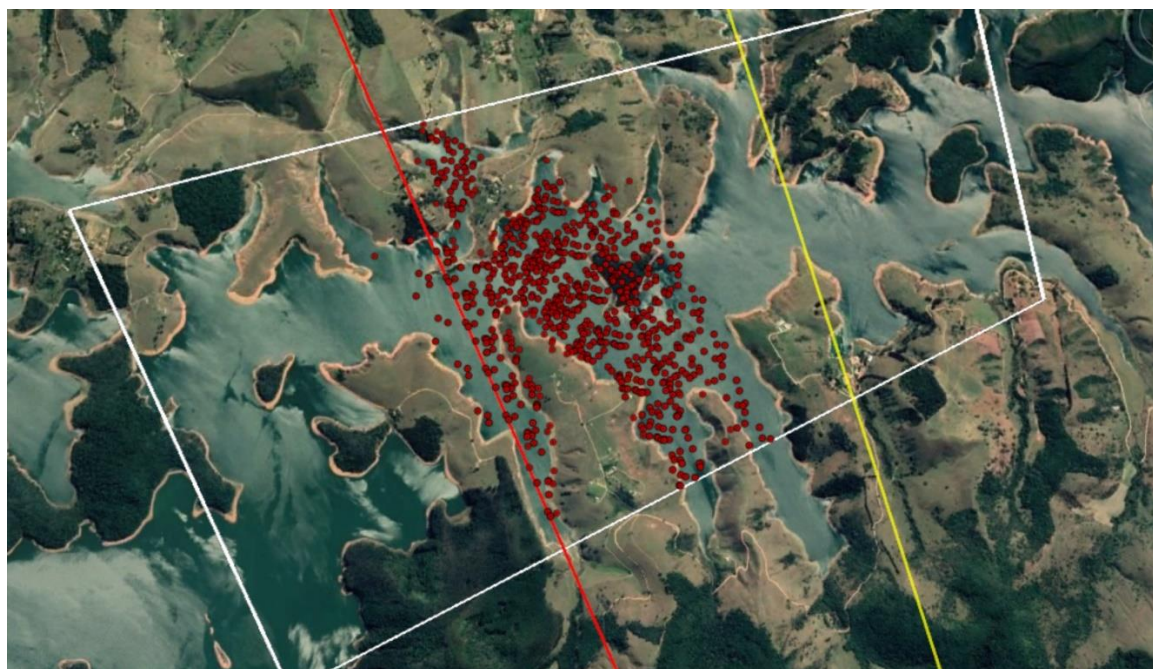
Fonte: Autora

Figura 49 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J002, do reservatório de Paraibuna



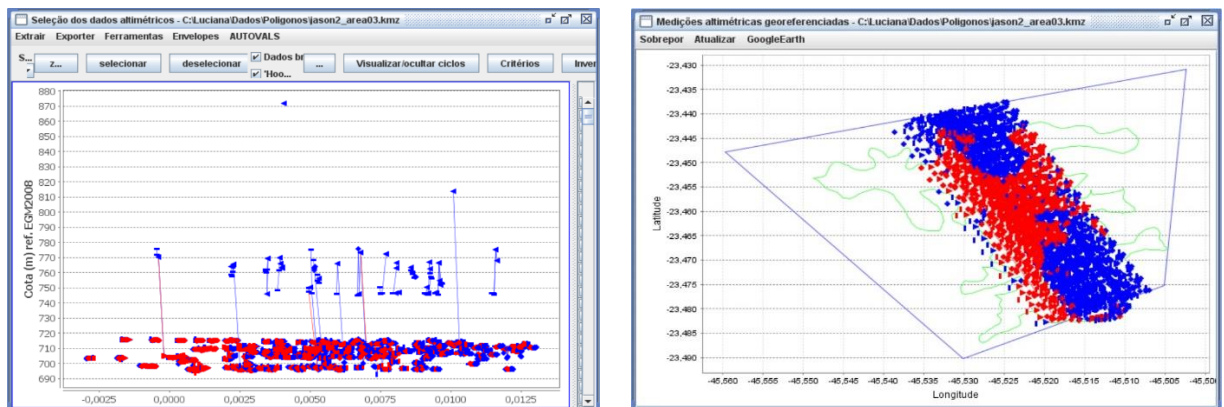
Fonte: Autora

Figura 50 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J002 do reservatório de Paraibuna.



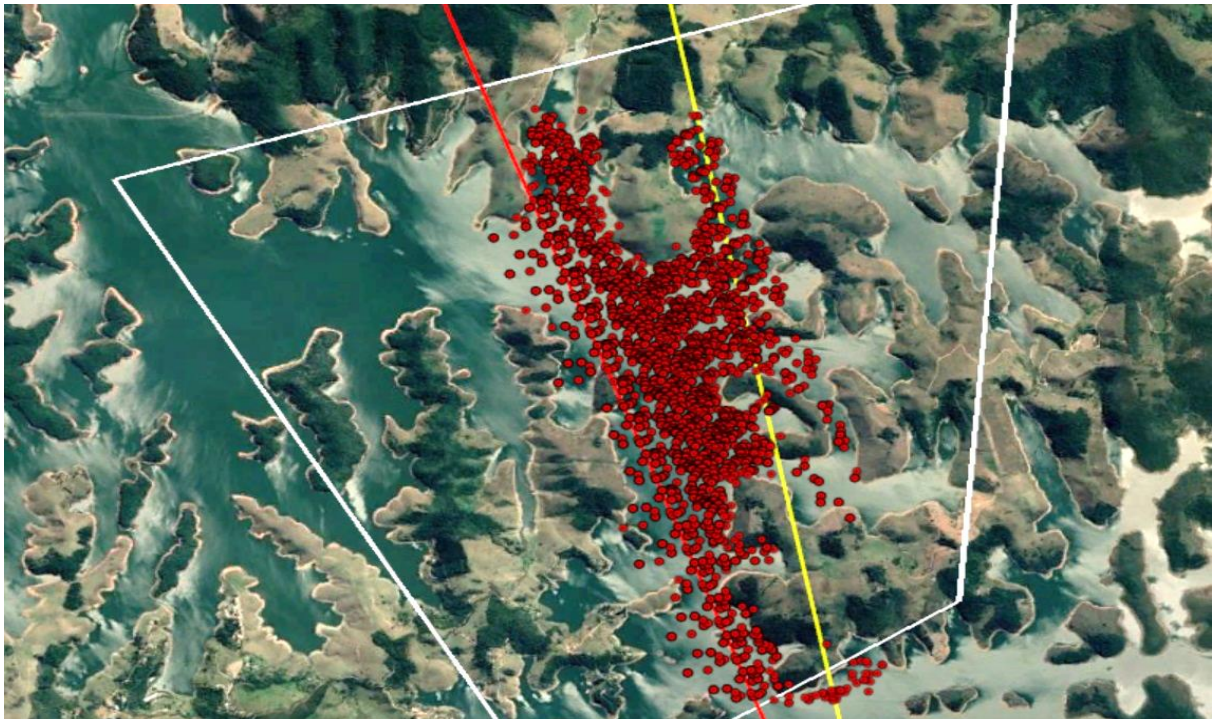
Fonte: Autora

Figura 51 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J003, do reservatório de Paraibuna



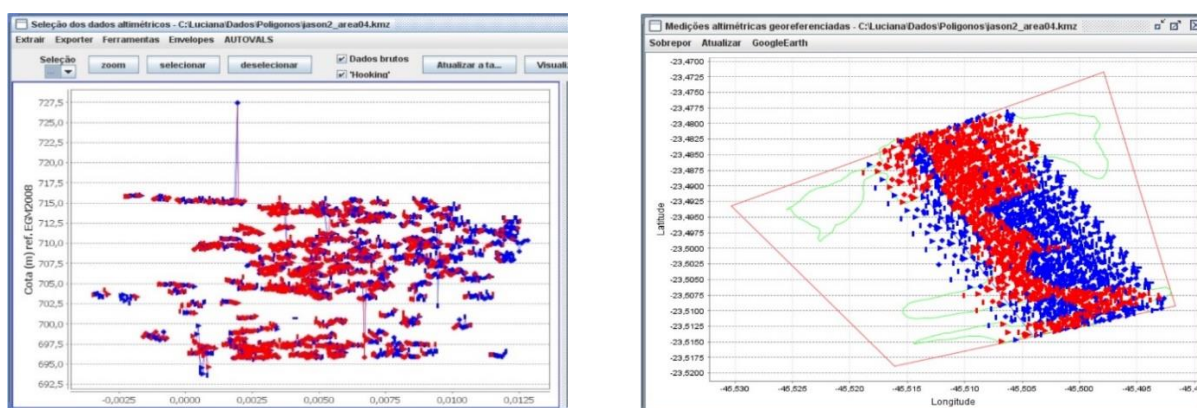
Fonte: Autora

Figura 52 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J003 do reservatório de Paraibuna.



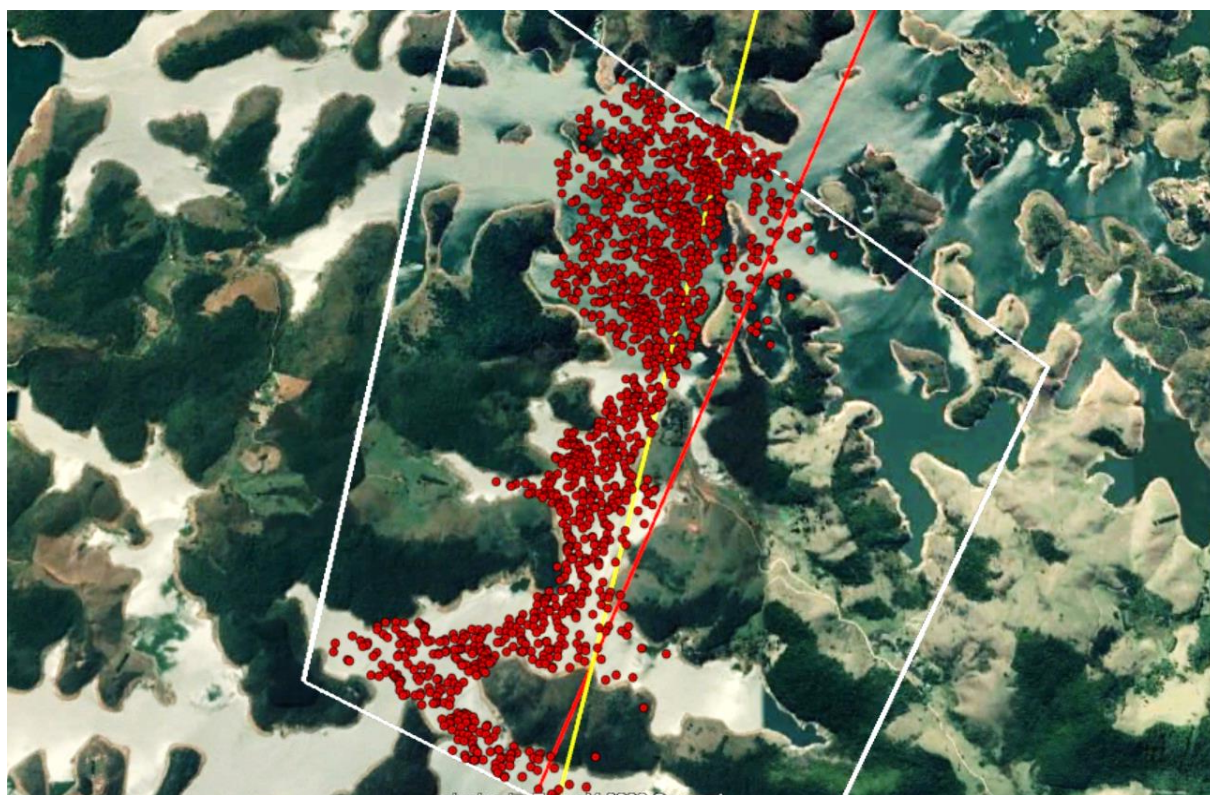
Fonte: Autora

Figura 53 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J004, do reservatório de Paraibuna



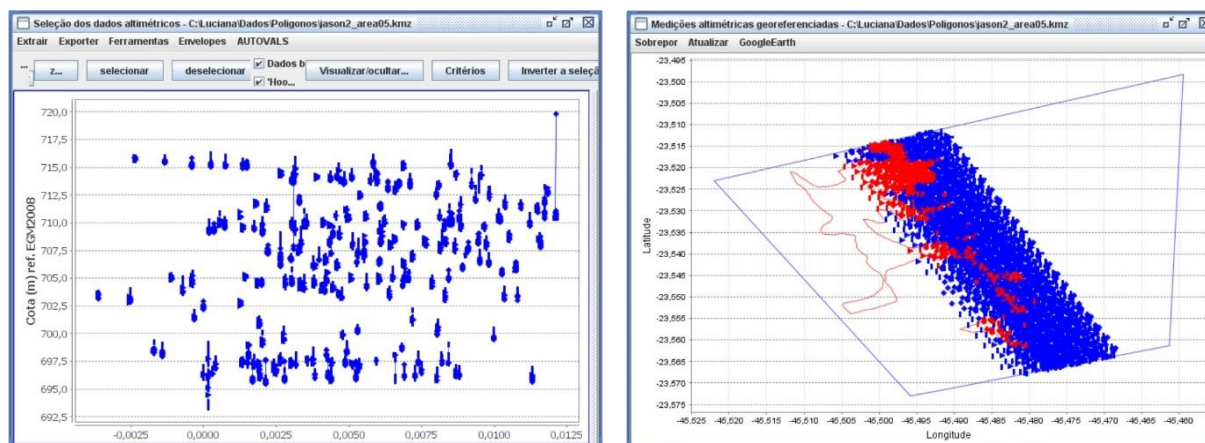
Fonte: Autora

Figura 54 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J004 do reservatório de Paraibuna.



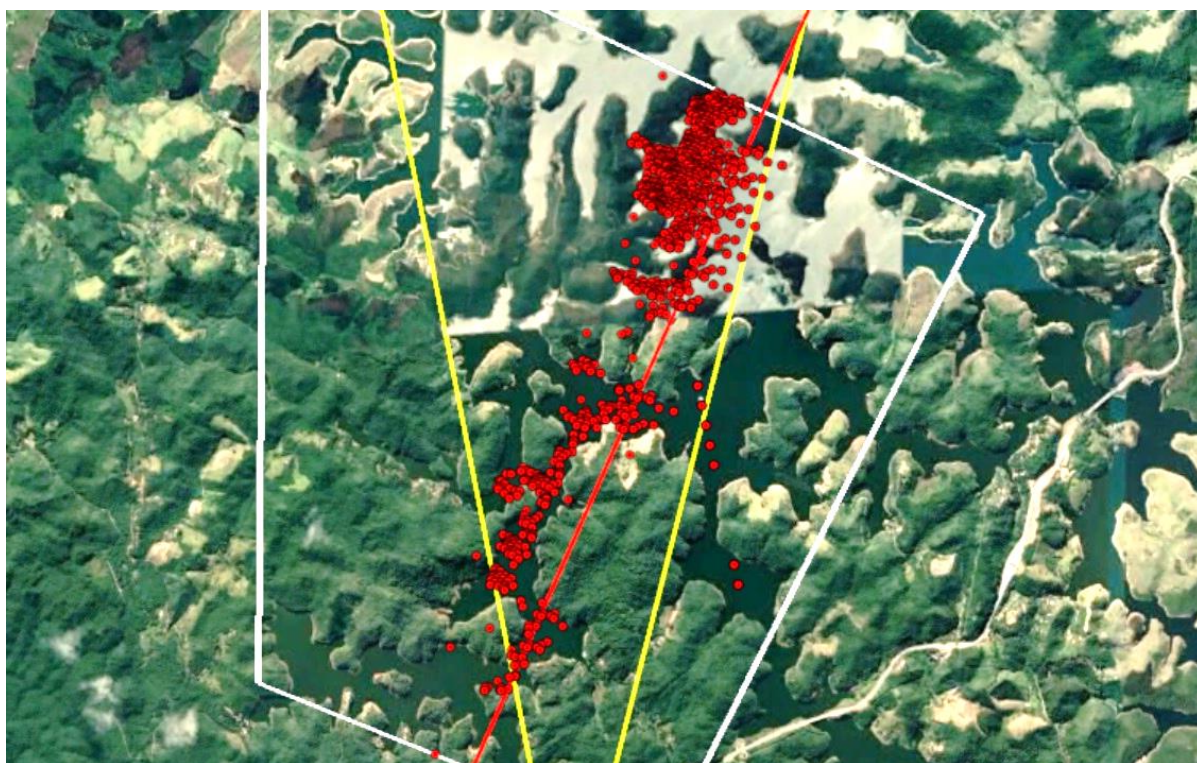
Fonte: Autora

Figura 55 – Dados altimétricos selecionados da missão Jason-2 para estação virtual EV_J005, do reservatório de Paraibuna



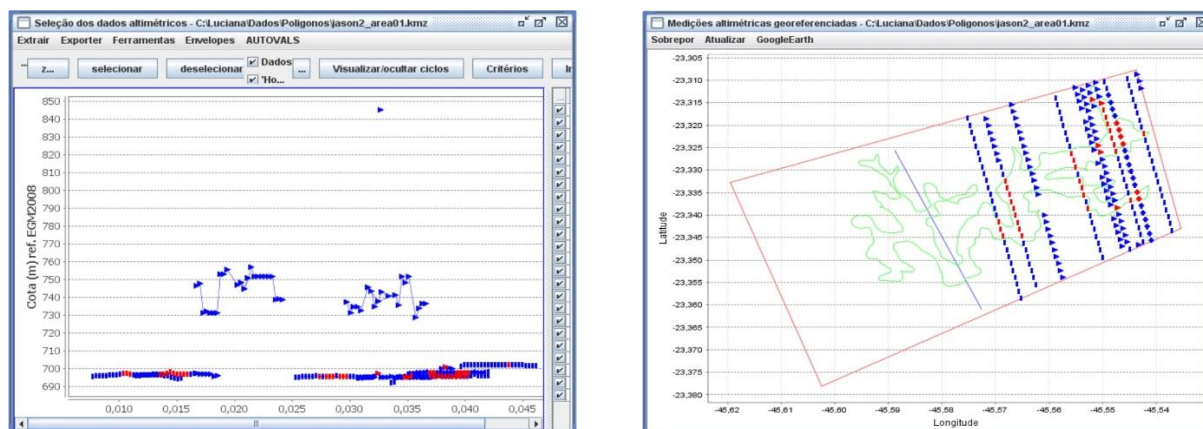
Fonte: Autora

Figura 56 – Localização dos pontos selecionados da missão Jason-2 sobre o espelho d'água da estação virtual EV_J005 do reservatório de Paraibuna.



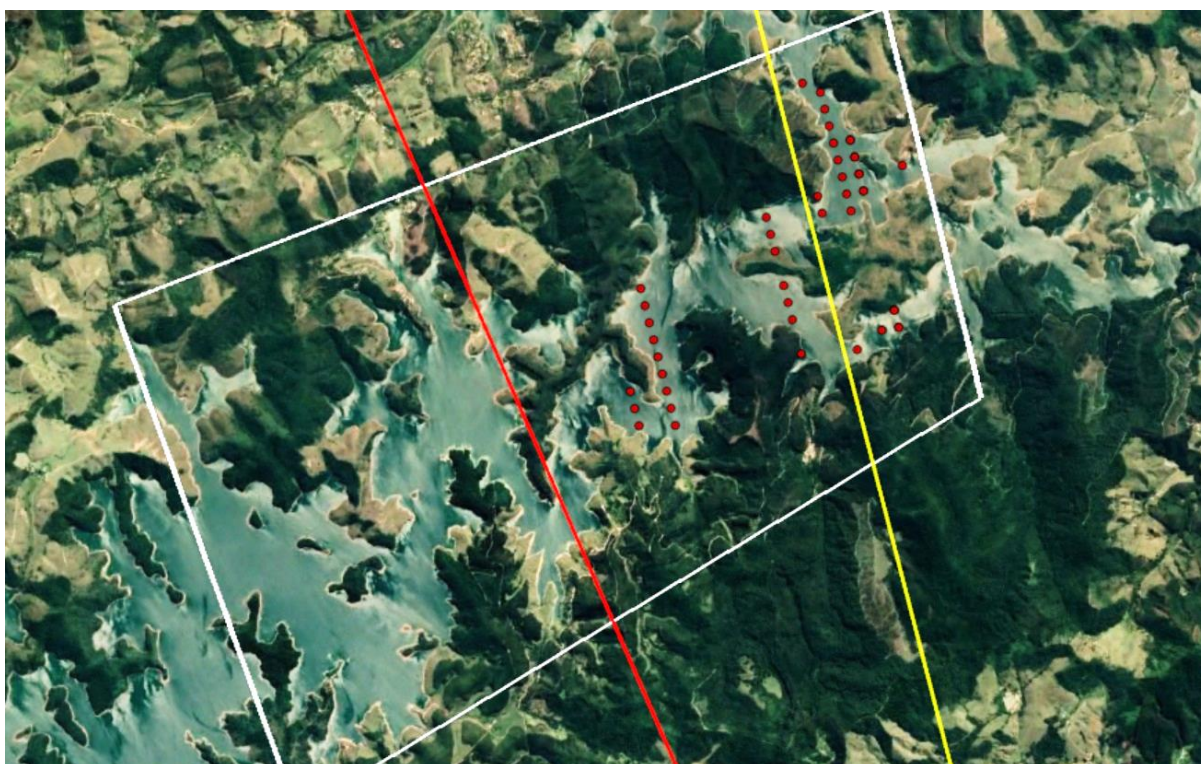
Fonte: Autora

Figura 57 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S001, do reservatório de Paraibuna



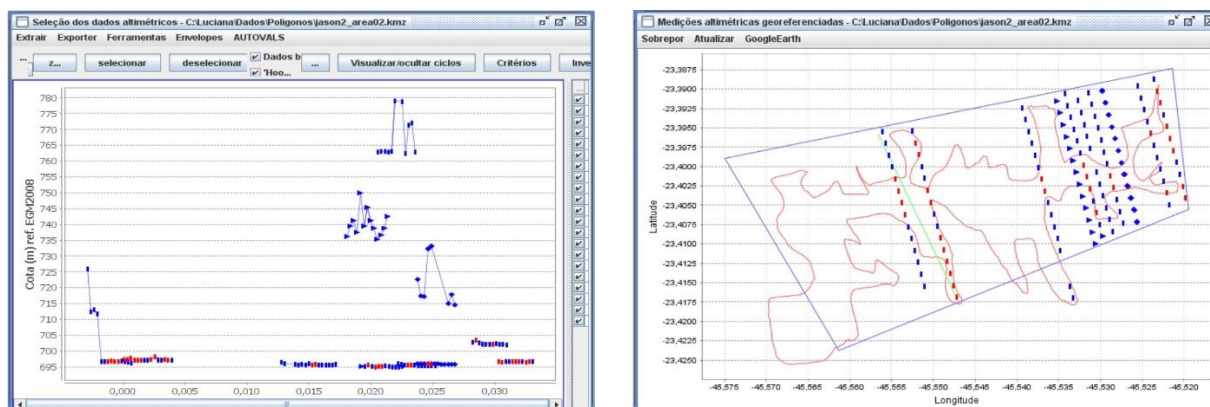
Fonte: Autora

Figura 58 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S001 do reservatório de Paraibuna.



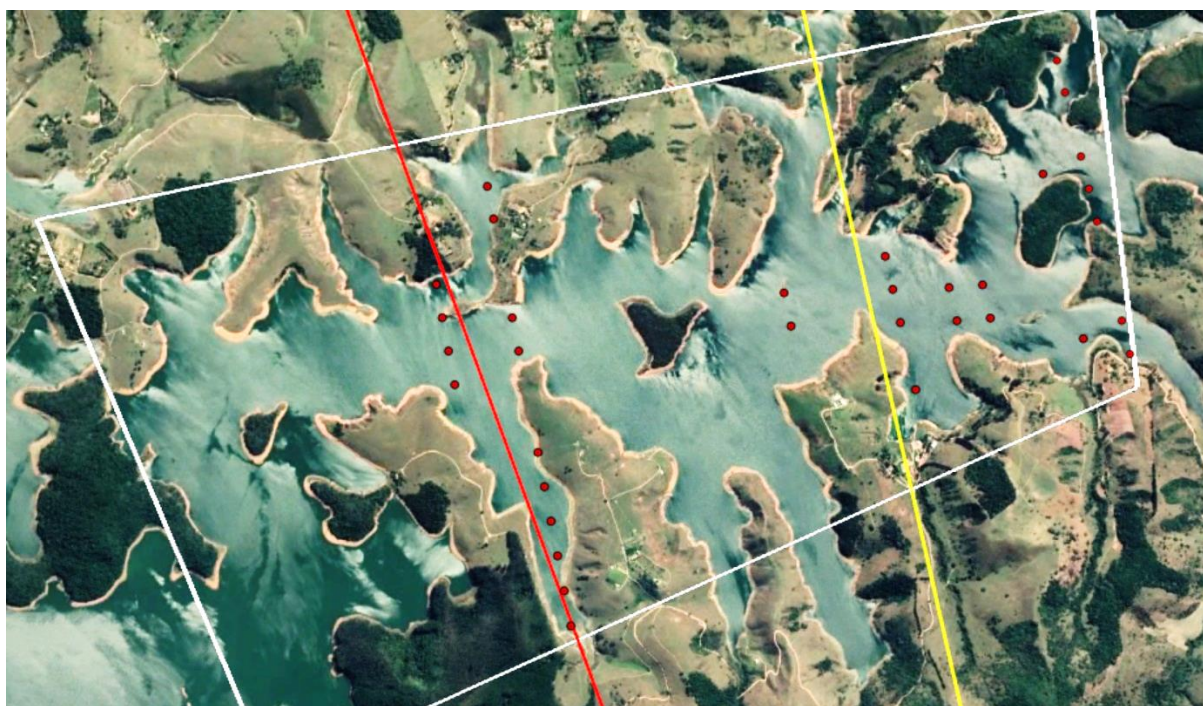
Fonte: Autora

Figura 59 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S002, do reservatório de Paraibuna



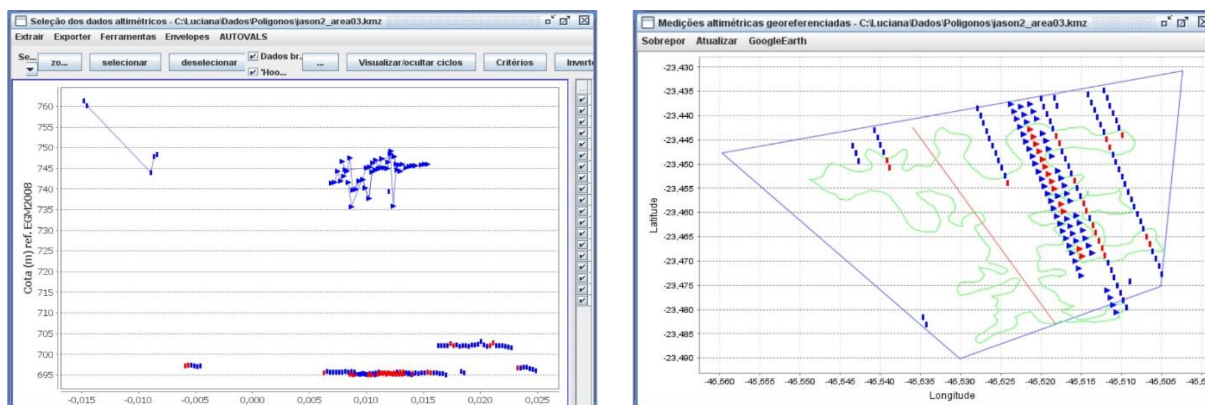
Fonte: Autora

Figura 60 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S002 do reservatório de Paraibuna.



Fonte: Autora

Figura 61 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S003, do reservatório de Paraibuna



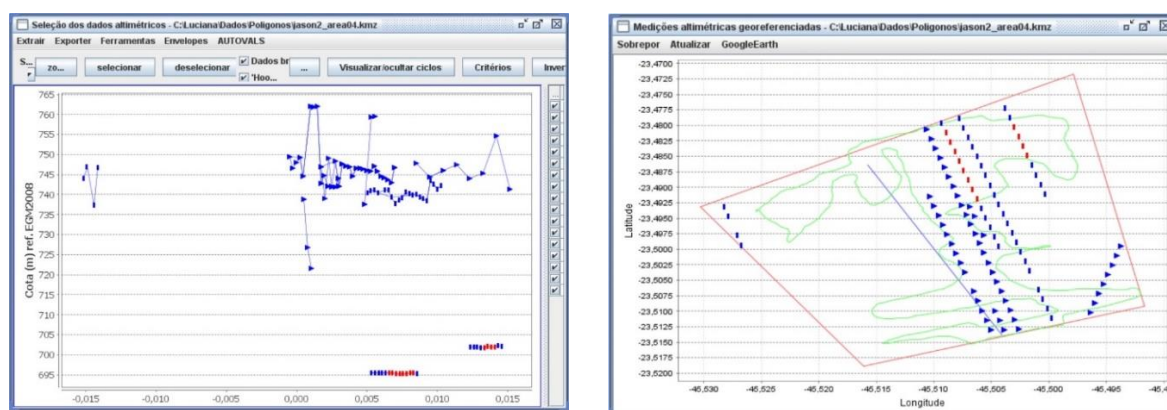
Fonte: Autora

Figura 62 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S003 do reservatório de Paraibuna



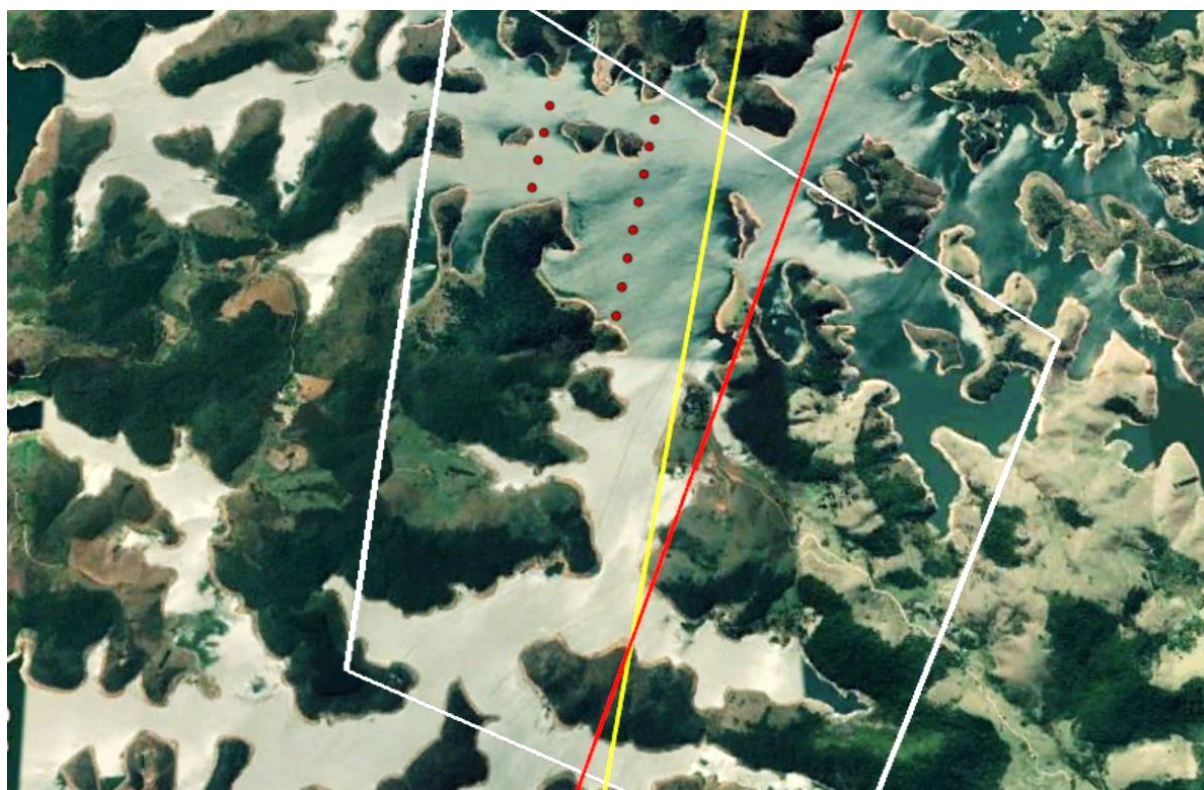
Fonte: Autora

Figura 63 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S004, do reservatório de Paraibuna



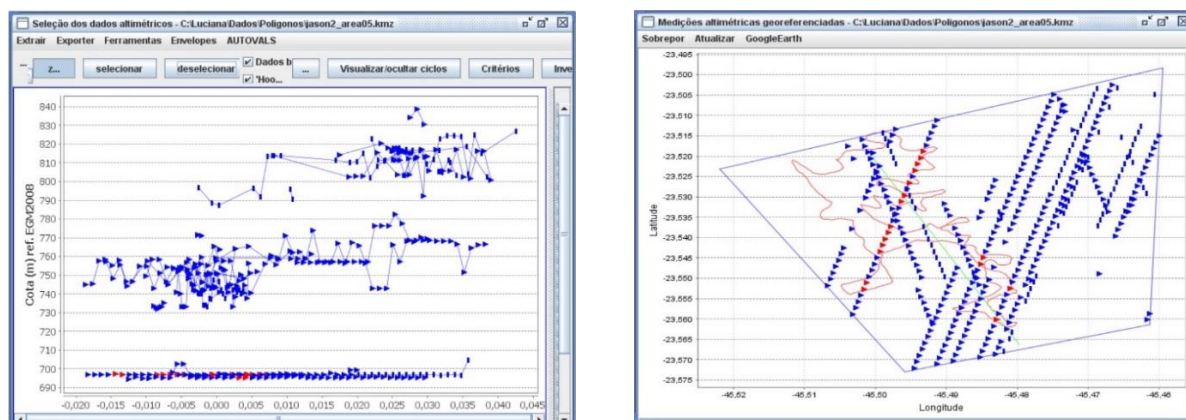
Fonte: Autora

Figura 64 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S004 do reservatório de Paraibuna



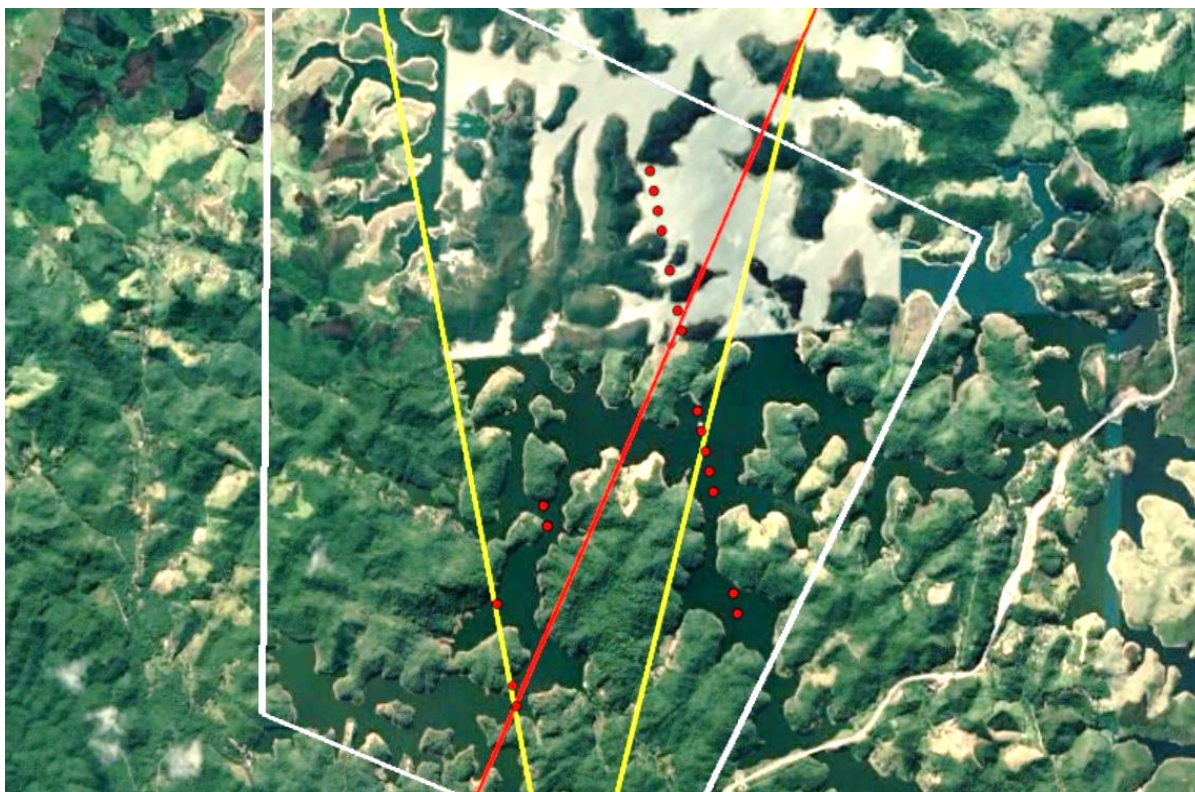
Fonte: Autora

Figura 65 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S005, do reservatório de Paraibuna



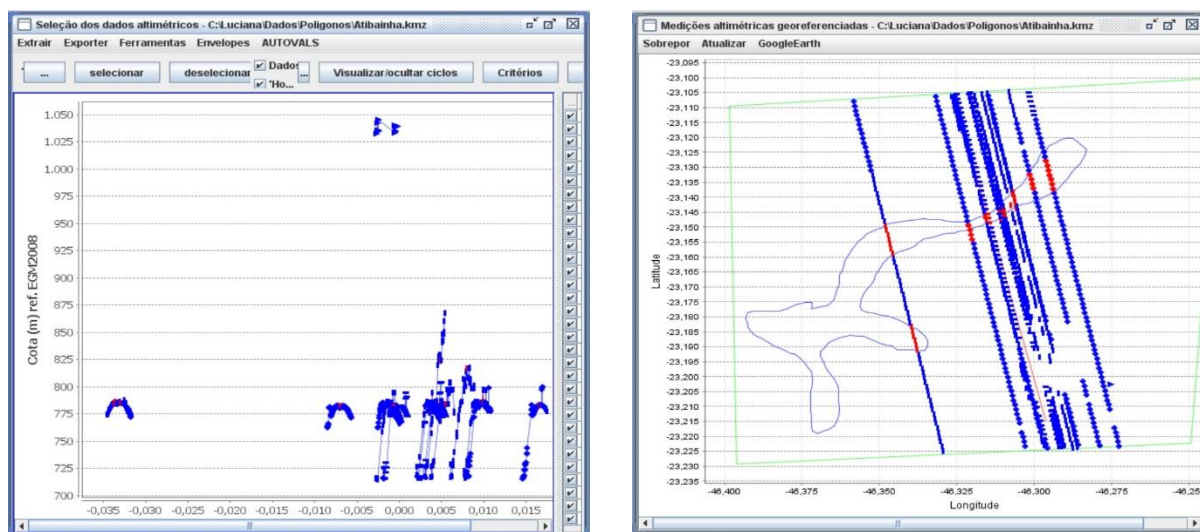
Fonte: Autora

Figura 66 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S005 do reservatório de Paraibuna



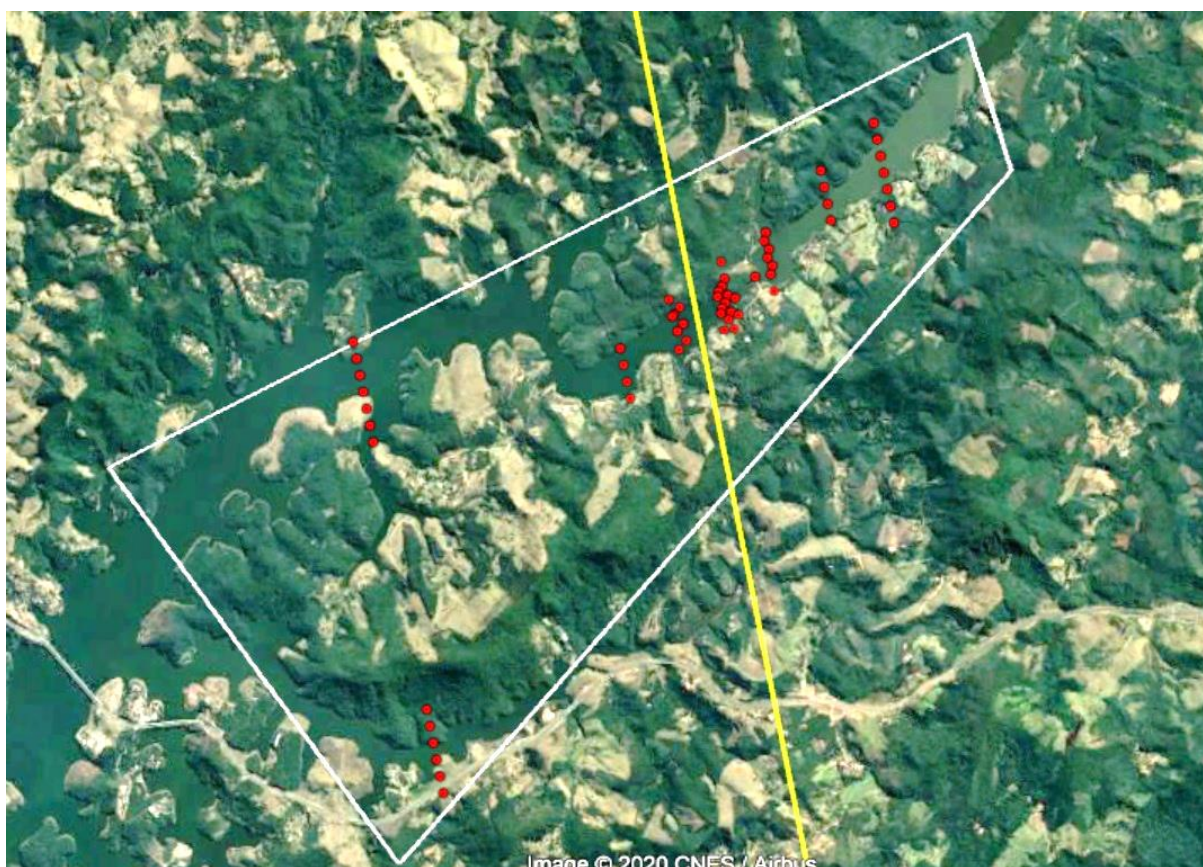
Fonte: Autora

Figura 67 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S006, do reservatório de Atibainha



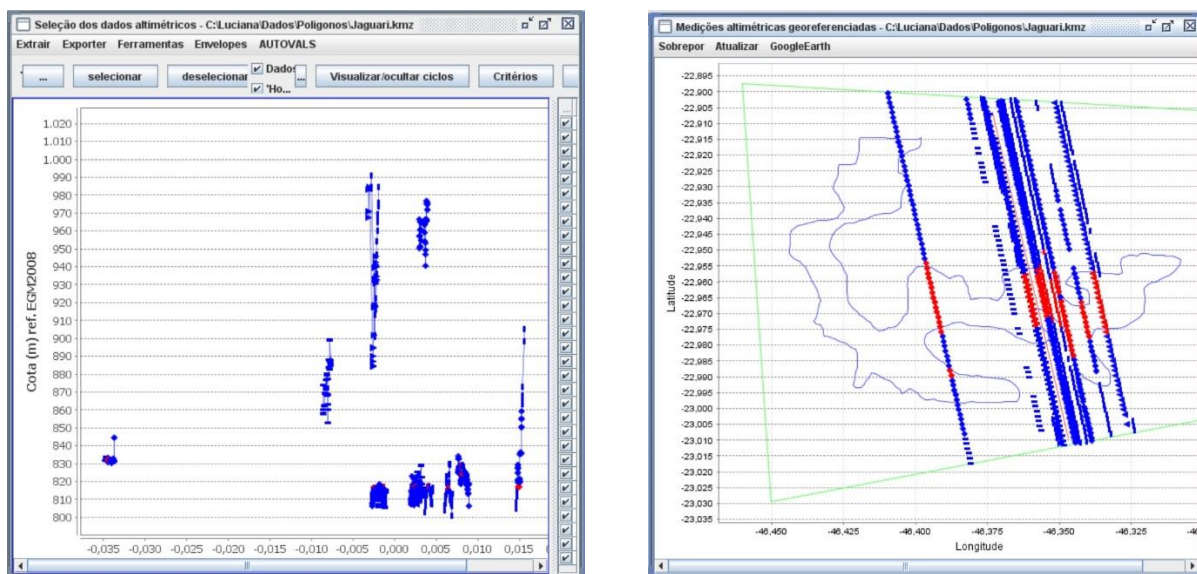
Fonte: Autora

Figura 68 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S006 do reservatório de Atibainha



Fonte: Autora

Figura 69 – Dados altimétricos selecionados da missão SARAL para estação virtual EV_S007, do reservatório de Jaguari-Jacareí



Fonte: Autora

Figura 70 – Localização dos pontos selecionados da missão SARAL sobre o espelho d'água da estação virtual EV_S007 do reservatório de Jaguari-Jacareí



Fonte: Autora