



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS DE NÍVEIS DE
ÁGUA ADQUIRIDOS PELO SATÉLITE ENVISAT NA
BACIA AMAZÔNICA.**

ANA CAROLINA ZOPPAS COSTI

ORIENTADOR: NÉSTOR ALDO CAMPANA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM – 144/2012

BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

COSTI, ANA CAROLINA ZOPPAS

Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica.

xvii, 141p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2012).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Altimetria espacial

2. Hidrologia

3. Bacia amazônica

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTI, A. C. Z. (2012). *Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, publicação PTARH.DM – 144/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ana Carolina Zoppas Costi.

TÍTULO: Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica.

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias dessa dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ana Carolina Zoppas Costi
anacarlste@gmail.com

AGRADECIMENTOS

O curso de Mestrado foi, para mim, uma experiência que, por motivos diversos, perdurou alguns anos de minha vida. De forma que meus estudos me acompanharam desde a formatura até a minha vida profissional. Durante esse longo período tive a oportunidade de estudar em dois grandes Programas de Pós Graduação e viver em quatro cidades diferentes. Portanto, no decorrer dessa trajetória, que se encerra com essa dissertação, tenho muitas pessoas a agradecer, as quais serão mencionadas nos próximos parágrafos. Apesar disso, gostaria de agradecer, de maneira geral, porém muito especial, a todas as pessoas com as quais convivi durante esses anos de estudo.

Enfim, os agradecimentos.....

Aos meus pais, por me proporcionarem todas as condições de estudo necessárias para que, um dia, eu pudesse obter o título de Mestre. A eles devo todas as conquistas de minha vida como estudante e como profissional.

Aos professores e funcionários do IPH. Foi nesse Instituto que iniciei o curso de Mestrado e contei com todo o apoio necessário para a realização do curso.

Aos colegas do IPH que muito me ajudaram. Especialmente aos colegas da Cauduro, titulares e agregados, que tiveram importância fundamental nos estudos e nas atividades extraclasse.

Aos colegas da CPRM de Porto Velho/RO. Em especial à Terezinha, Guilherme, Homero, José Cláudio, Helena, pelo apoio em dar continuidade ao curso mesmo a milhares de quilômetros de distância do IPH.

À minha vizinha e grande amiga Denise. Por tudo relacionado à grande e saudosa aventura de trabalhar, estudar e morar em Porto Velho.

Ao professor Sérgio Koide, que me recebeu no PTARH e me incentivou a dar continuidade ao curso de mestrado iniciado no IPH.

Aos colegas de turma do PTARH, pelas tarde de estudos em grupo e também pelas importantes atividades extraclasse.

Ao chefe da CPRM de Brasília, Isar Afonso César, pelo apoio e liberação de horário para cursar as disciplinas na UNB.

Ao Pesquisador do IRD, Stéphane Calmant. A ele devo essa dissertação. Por ele fui convidada à integrar o projeto Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas, que deu origem à essa pesquisa. Na equipe desse projeto e com a sua orientação foi possível estudar a teoria dos altímetros de satélite e aplicá-la na prática. Sem dúvida, a participação dele nesse trabalho tornou essa pesquisa possível.

Aos demais integrantes da equipe do projeto Dinâmica Fluvial; Daniel Moreira, Ana Emília de Souza, Manoel das Graças, João Bosco Alfenas, Achiles Monteiro e Joecila Santos da Silva. A companhia de colegas como Manoel, Bosco, Daniel e Ana Emília, transformaram as campanhas de campo na Amazônia em experiências inesquecíveis. Aos parceiros de campanhas campo, Johelder Fornari, da CPRM de Belém, por manter a alegria no barco, e Leonardo Dardengo, pessoa especial que estará sempre no coração de todos.

Ao colega da CPRM de Manaus, Daniel Oliveira, por todo o apoio logístico em todas as campanhas de campo do projeto.

Ao Departamento de Hidrologia da CPRM, que me trouxe ao Rio de Janeiro, e possibilitou a continuidade de meu curso de Mestrado. No DEHID, agradeço principalmente a minha ex-chefe, Jane Tavares, pelo esforço e incentivo na continuidade do curso. Ao chefe do Departamento, Frederico Cláudio Peixinho, por possibilitar minha participação no Projeto.

Aos demais colegas da hidrologia da CPRM, Vanesca Sartorelli Medeiros, Andrea Germano, Francisco de Assis Barbosa, Arthur Moreira de Abreu e Marta Ottoni, pela ajuda e apoio no curso, nos estudos, na pesquisa, na formatação da dissertação, na aquisição dos dados, enfim, pelo apoio moral e amizade.

Aos colegas do escritório do Rio de Janeiro, Daniele Tokunaga Genaro, Rubens Esteves Kenup e Dayane Cândido, pela colaboração e, principalmente, pela amizade.

À amiga Sheyla Caminha Munhoz, colega da CPRM de Brasília, pela ajuda fundamental na reta final da defesa da dissertação. Sem ela não teria sido possível cumprir os prazos.

À amiga Maria Auxiliadora Martins e ao amigo Ismael Fontes, ambos da CPRM de Brasília, pelo apoio nas minhas idas à Brasília.

Ao meu marido, Marcelo Steenhagen, por tudo. Pela paciência, pelas críticas, pela força, pelo incentivo. Por ouvir incontáveis vezes a minha apresentação oral e pelas correções de texto. Por ter estado ao meu lado nesse caminho.

À persistência que me proporcionou chegar à defesa.

Ao professor Néstor Campana, pelo auxílio na finalização da dissertação e, especialmente, ao professor Oscar, coordenador do PTARH, que realmente possibilitou a minha defesa.

Ao Adalias, da secretaria do PTARH, pela ajuda em várias situações em que eu não podia estar presente na UNB.

RESUMO

A altimetria espacial foi desenvolvida nos anos setenta com a realização das primeiras medidas para determinação da topografia e da superfície dos oceanos. A partir de então, medidas altimétricas de níveis de água continentais tem apresentado um importante papel em aplicações como: nivelamento de estações fluviométricas, estimativa de descarga líquida, estimativa de variações espaciais e temporais de armazenamento de água em rios e zonas de inundação, perfis longitudinais de água e implicações geodinâmicas. Nesse contexto, o emprego da altimetria espacial para monitoramento de níveis em águas continentais apresenta a possibilidade de adquirir dados em locais com baixa densidade de estações ou de difícil acesso, como a bacia amazônica.

Este trabalho analisa as medidas altimétricas de níveis de água adquiridas pelo satélite ENVISAT em relação aos dados obtidos em três estações fluviométricas da bacia do rio Madeira, no Amazonas. Foram estabelecidas três estações virtuais para a comparação entre as séries de dados altimétricos e as séries de dados fluviométricos (estações *in situ*) entre 2002 e 2008. Os resultados das análises realizadas apresentaram precisões de 12 ± 1 cm para a estação Pimenteiras; 35 ± 2 cm para a estação Príncipe da Beira e 32 ± 2 cm para a estação Prosperidade. Além disso, os dados adquiridos pelo satélite acompanharam o regime de variação de níveis registrado pelas estações *in situ*, sugerindo a possibilidade de utilizar esses dados como fonte complementar em estudos hidrológicos.

ABSTRACT

Space altimetry was developed in the Seventies with the accomplishment of the first measures for determination of the topography and the ocean's surface. Since then, altimetric measures of continental water levels has had an important place in applications as: leveling of *in situ* stations, discharge estimation, estimative of spatial and temporal variations of water storage in rivers and floodplains, longitudinal water profiles and geodynamic implications. In this context, the use of space altimetry to monitoring levels in continental waters presents the possibility to acquire data in places with low density of conventional gauging (*in situ* stations) or difficult access, as in the Amazon basin.

This study analyzes the altimetric measures of water levels acquired by ENVISAT mission in relation to the water levels at conventional gauges at de Madeira basin, in the Amazonas state. Three virtual stations were established to compare the altimetric data series and the series from gauging stations (*in situ* data) from 2002 to 2008. The results presented precisions in the order of 30 cm. Besides that, the satellite data followed the water stage variation registered in the *in situ* stations, suggesting the possibility of using this data as an additional source for hydrological studies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Rede de monitoramento na Amazônia considerando a integração entre dados altimétricos e convencionais de níveis de água (Calmant, 2012).....	5
Figura 4.1 – Corrente geostrófica (Mendes e Soares-Gomes, 2007).....	10
Figura 4.2 – Princípio da altimetria por satélite (AVISO, 2008).	17
Figura 4.3 – Correções para a medida do R (<i>range</i>), (Fu e Cazenave, 2001).	18
Figura 4.4 - Ondulações de grande comprimento de onda do geoide terrestre, determinadas a partir da análise das perturbações das trajetórias dos satélites (GRGS, 2009).	19
Figura 4.5 – Cobertura global do satélite Topex/Poseidon (Cazenave e Massonet, 2004)..	20
Figura 4.6 – Geometria de visada do RA-2 (ESA, 2012).	30
Figura 4.7 – Geometria de visada do MWR (ESA, 2012).	30
Figura 4.8 – Rede terrestre DORIS (Guijarro <i>et al.</i> , 2000).....	32
Figura 4.9 – O efeito Doppler (CNES/CLS (<i>Collecte Localisation Satellite</i>), 1992).	33
Figura 4.10 - Formação do sinal do altímetro sob uma superfície plana (Santos da Silva, 2010).	34
Figura 4.11 - Formação do sinal do altímetro sob uma superfície real (Santos da Silva, 2010).	35
Figura 4.12 - Formas de onda sobre diferentes planos da água. Redesenhado por Mercier e Zanife (2006), (Calmant <i>et al.</i> , 2008).	37
Figura 4.13 – Amostra de formas de onda (FOs) de dados reais de altímetro de uma passagem ao longo do traço 66 do Geosat sobre a estação de réguas Serrinha, no rio Negro (0° 27’S, 64°50’W), (Koblinsky <i>et al.</i> , 1993).	40
Figura 4.14 – Esquema da geometria do efeito <i>hooking</i> (Calmant, S., 2009).....	44
Figura 4.15 — Exemplo de ancoragem do altímetro (ENVISAT) ao longo do Igarapé Nelson Pinheiro (bacia do Rio Negro), (Santos da Silva <i>et al.</i> , 2010).	45
Figura 4.16 – Princípio do algoritmo <i>ice-1</i> (apresentado por Wingham <i>et al.</i> , 1986).	47
Figura 5.1 – Localização da sub-bacia do rio Madeira (modificado de ANA, 2013).	55
Figura 5.2 – Imagem e dados da bacia Amazônica (Monteiro, 2009).	56
Figura 5.3 – Localização dos traços do ENVISAT e das estações fluviométricas na área de estudo (modificado de ANA, 2013).	58
Figura 6.1 – Estrutura operacional de geração dos dados altimétricos (desenhado pelo autor).	60
Figura 6.2 – Determinação de estações virtuais no Rio Danúbio, na fronteira entre Servia e Romênia (Perrot, 2009).	63
Figura 6.3 – Projeção sobre a área de estudo (imagem do <i>Google Earth</i>) do traço do satélite (vermelho) sobre o rio, delimitação do polígono (amarelo) e desenho da linha que define a direção do rio (verde) (programa VALS versão 0.6.2).	64
Figura 6.4 - Três janelas visualizadas após a importação dos dados altimétricos no VALS (programa VALS versão 0.6.2).	66
Figura 6.5 – Cotograma da estação fluviométrica Pimenteiras (15130000).	67
Figura 6.6 – Cotograma da estação fluviométrica Príncipe da Beira (15200000).	68
Figura 6.7 – Cotograma da estação fluviométrica Prosperidade (15490000).	68

Figura 6.8 - Janela 2 do VALS com pontos selecionados e tabela dos ciclos (programa VALS versão 0.6.2).	71
Figura 6.9 - Janela 2 do VALS com um exemplo de maus ciclos não selecionados (programa VALS versão 0.6.2).	72
Figura 7.1 – Imagem do local de estudo identificando as interseções das passagens do ENVISAT com as estações fluviométricas (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	77
Figura 7.2 - Três janelas visualizadas após a extração da estação virtual 15130000 no VALS (programa VALS versão 0.6.2).	80
Figura 7.3 – Imagem do Rio Guaporé no local de estudo da estação 15130000 (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	82
Figura 7.4 – Perfis transversais da estação fluviométrica Pimenteiras (15130000), (ANA, Hidro versão 1.2.1).	83
Figura 7.5 – Curva-chave da estação fluviométrica Pimenteiras (15130000), (REPO, 2012).	84
Figura 7.6 – Delimitação da área para geração da estação virtual EV-15130000 (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	85
Figura 7.7 - Perfil transversal das alturas fornecidas pelo traço 478 do ENVISAT no cruzamento com o rio Guaporé – estação virtual EV-15130000 (programa VALS versão 0.6.2).	86
Figura 7.8 – Pontos selecionados na Figura 7.7 visualizados sobre a imagem da área de estudo (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	87
Figura 7.9 – Perfil de dados selecionados e série temporal altimétrica gerada – janelas do VALS referente á EV-15130000 (programa VALS versão 0.6.2).	88
Figura 7.10 – Tabela de ciclos do programa VALS – EV-15130000 (programa VALS versão 0.6.2).	90
Figura 7.11 - Estação virtual EV-15130000 (traço ENVISAT 478) e estação fluviométrica 15130000 (Pimenteiras).	91
Figura 7.12 – Imagem do Rio Guaporé no local de estudo da estação 15200000 (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	95
Figura 7.13 – Delimitação da área para geração da estação virtual EV-15200000 (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	96
Figura 7.14 – Perfil transversal das alturas fornecidas pelo traço 192 do ENVISAT no cruzamento com o rio Guaporé – EV-15200000 (programa VALS versão 0.6.2)	97
Figura 7.15 – Pontos selecionados na Figura 7.14 visualizados sobre a imagem da área de estudo (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	98
Figura 7.16 – Perfil de dados selecionados e série temporal altimétrica gerada – janelas do VALS referente á EV-15200000 (programa VALS versão 0.6.2)	99
Figura 7.17 – Tabela de ciclos do programa VALS – EV-15200000 (programa VALS versão 0.6.2).	100
Figura 7.18 - Estação virtual EV-15200000 (traço ENVISAT 192) e estação fluviométrica 15200000 (Príncipe da Beira).	101

Figura 7.19 – Imagem do Rio Madeira no local de estudo da estação 15490000 (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	103
Figura 7.20 – Delimitação da área para geração da estação virtual EV-15490000(desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	104
Figura 7.21 – Perfil transversal das alturas fornecidas pelo traço 192 do ENVISAT no cruzamento com o rio Madeira – EV-15490000 (programa VALS versão 0.6.2).	105
Figura 7.22 – Pontos selecionados na Figura 7.21 visualizados sobre a imagem da área de estudo (desenhado pelo autor sobre imagem do <i>Google Earth</i> , data da imagem 31/5/2007).	106
Figura 7.23 – Perfil de dados selecionados e série temporal altimétrica gerada – janelas do VALS referente à EV-15490000 (programa VALS versão 0.6.2).	107
Figura 7.24 – Tabela de ciclos do programa VALS – EV-15490000.	108
Figura 7.25 - Estação virtual EV-15490000 (traço ENVISAT 192) e estação fluviométrica 15490000 (Prosperidade).	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Densidades mínimas recomendadas para estações pluviométricas (WMO, 1994).	2
Tabela 1.2 – Densidades mínimas recomendadas para estações fluviométricas (WMO, 1994).	2
Tabela 4.1 – Características dos satélites ERS-1 e ERS-2 (ESA, 2013).	22
Tabela 4.2 – Instrumentos a bordo do ENVISAT (ESA, 2013).	24
Tabela 4.3 – Resumo das características dos satélites (Zhang, 2009).	25
Tabela 4.4 – Lista de endereços eletrônicos das missões altimétricas operacionais.	25
Tabela 4.5 – Principais características do RA-2 (ESA, 2012).	29
Tabela 6.1 – Características da missão altimétrica utilizada (AVISO, 2008).	61
Tabela 6.2 – Tempos de concentração (t_c) para as estações fluviométricas analisadas.	70
Tabela 7.1 – Características das estações fluviométricas.	78
Tabela 7.2 – Características das estações virtuais.	79
Tabela 7.3 – Correspondência entre estações fluviométricas e estações virtuais.	79
Tabela 7.4 – Cálculo das alturas altimétricas para comparação com os dados <i>in situ</i> – estação 15130000.	93
Tabela 7.5 – Comparação entre vazões diárias – régua x ENVISAT.	94
Tabela 7.6 – Cálculo das alturas altimétricas para comparação com os dados <i>in situ</i> – estação 15200000.	102
Tabela 7.7 – Cálculo das alturas altimétricas para comparação com os dados <i>in situ</i> – estação 15490000.	110
Tabela 8.1 – Parâmetros numéricos de comparação entre as séries <i>in situ</i> e altimétrica. ...	114
Tabela 8.2 – Erros percentuais relativos à comparação entre as séries altimétrica e fluviométrica (Estação 15130000).	115
Tabela 8.3 – Erros percentuais relativos à comparação entre as séries altimétrica e fluviométrica (Estação 15200000).	116
Tabela 8.4 – Erros percentuais relativos à comparação entre as séries altimétrica e fluviométrica (Estação 15490000).	117
Tabela 8.5 – Resultado das comparações realizadas entre as séries <i>in situ</i> e altimétricas para períodos de cheia e estiagem dos rios.	119
Tabela 8.6 – Erros percentuais relativos à comparação entre vazões altimétricas e fluviométricas.	120
Tabela 8.7 – Níveis característicos das estações analisadas.	122
Tabela 8.8 – Comparação entre níveis máximos <i>in situ</i> e altimétricos para a estação 15130000.	122
Tabela 8.9 – Comparação entre níveis mínimos <i>in situ</i> e altimétricos para a estação 15130000.	123
Tabela 8.10 – Comparação entre níveis máximos <i>in situ</i> e altimétricos para a estação 15200000.	123
Tabela 8.11 – Comparação entre níveis mínimos <i>in situ</i> e altimétricos para a estação 15200000.	124

Tabela 8.12 – Comparação entre níveis máximos <i>in situ</i> e altimétricos para a estação 15490000.....	125
Tabela 8.13 – Comparação entre níveis mínimos <i>in situ</i> e altimétricos para a estação 15490000.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

3D – Três dimensões

ACG – Automatic Gain Control

ADCP - Acoustic Doppler Current Profiler

AHIMOC - Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental

ALS – Alenia Aerospazio

ANA – Agência Nacional de Águas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

AVISO – Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites
Océanographiques

CASH – Contribution of Spacial Altimetry to Hydrology

CLS – Collecte Localisation Satellite

cm - Centímetro

CNES – Centre National d'Études Spatiales National Aeronautics and Space
Administration

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CTOH – Centre de Topographie dès Océans et de l'Hydrosphère

D – Estação de medição de descarga líquida

DAM – Desvio absoluto da mediana

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

DORIS - Doppler Tracking System Receiver

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

EGM96 – Earth Geopotential Model 1996

EM - Eletromagnética

ENVISAT - Environmental Satellite

ERS – European Remote Sensing

ESA – European Space Agency

ESRIN - European Space Research Institute

EV – Estação virtual

F – Estação fluviométrica

FD – Estação fluviométrica com medição de descarga líquida

FO – Forma de onda

FOAM - From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring

GDR - Geophysical Data Records

Geosat – U. S. Navy's Geodetic Satellite

GOME – Global Ozone Monitoring Experiment

GPS – Global Positioning System

GRGS – Groupe de Recherche em Géodésie Spatiale

h_i – iésima altura altimétrica observada

h_{med} – mediana das alturas altimétricas observadas

IGN – Institut Géographique National

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IRD - Institut de Recherche pour lè Développement

km - Quilômetro

LEGOS - Laboratoire d'Études en Geophysique et Océanographie Spatiales

m – Metro

MWR – Microwave Radiometer

N – Número de observações de uma série

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NCEP – National Center for Environmental Prediction

OCOG - Offset Centre of Gravity

OMM – Organização Mundial de Meteorologia

Q_{95%} - Vazão associada à permanência em 95% do tempo

R – range ou altura do altímetro

RA – Radar altimétrico

RA-2 – Advanced Radar Altimeter

REPO – Residência da CPRM de Porto Velho

RLA – River Lake Atimetry

RLH – River Lake Hydrology

rms – root mean square ou raiz da média dos quadrados

S - Sul

SIH - Sistema de Informações Hidrológicas

Spot – Système Pour l’Observation de la Terre

T/P – Topex/Poseidon

TCA - Time of Closest Approach

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

U.S. – United States

UTC - *Coordinated Universal Time*

VALS - Virtual Altimetry Station

W - Oeste

WGS-84 - World Geodetic System 1984

WMO – World Meteorological Organization

YSM - Yaw Steering Mode

ω – ângulo formado por um ponto da superfície terrestre e as posições do altímetro no momento de emissão e recepção do sinal

Ω - ângulo formado pelo centro do globo terrestre e as posições do altímetro no momento de emissão e recepção do sinal

δ - erro na estimativa da distância entre o altímetro e a superfície terrestre.

SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO	1
2 -	OBJETIVOS	6
2.1 -	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 -	CONTEXTO	8
4 -	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1 -	HISTÓRICO DA ALTIMETRIA ESPACIAL	9
4.2 -	PRINCÍPIO DA MEDIDA ALTIMÉTRICA POR RADAR.....	15
4.3 -	CARACTERÍSTICAS DOS SATÉLITES ERS-1, ERS-2 E ENVISAT	21
4.3.1 -	ERS-1 e ERS-2.....	21
4.4 -	DADOS ALTIMÉTRICOS ENVISAT	26
4.5 -	CARACTERÍSTICAS DO RADAR ALTIMÉTRICO RA-2.....	27
4.6 -	TRATAMENTO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS.....	34
4.7 -	O ALGORITMO <i>ICE-1</i>	45
4.8 -	LIMITAÇÕES AO USO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS.....	47
4.9 -	ESTUDOS PARA VALIDAÇÃO DOS DADOS DE SATÉLITE.....	49
5 -	ÁREA DE ESTUDO.....	55
6 -	MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
6.1 -	FONTE DOS DADOS ALTIMÉTRICOS.....	60
6.2 -	EXTRAÇÃO GEOGRÁFICA DAS MEDIDAS ALTIMÉTRICAS.....	60
6.3 -	ESTAÇÕES VIRTUAIS.....	62
6.4 -	SÉRIES TEMPORAIS PARA CADA ESTAÇÃO VIRTUAL.....	70
6.6 -	CRIAÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS ALTIMÉTRICOS	74
7 -	RESULTADOS.....	77
7.1 -	ANÁLISE DOS DADOS NA ÁREA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA PIMENTEIRAS (15130000)	82

7.2 – ANÁLISE DOS DADOS NA ÁREA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA PRÍNCIPE DA BEIRA (15200000).....	95
7.3 – ANÁLISE DOS DADOS NA ÁREA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA PROSPERIDADE (15490000)	103
8 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	111
9 - CONCLUSÃO	127

1 - INTRODUÇÃO

O monitoramento quantitativo de algumas fontes de água continentais (variabilidade temporal dos níveis e descargas líquidas dos rios) é realizado por redes hidrometeorológicas. Essas redes são organizadas em bases que podem ser de âmbito nacional ou regional, sendo que a abrangência da rede será definida, principalmente, pelo objetivo do monitoramento. Os levantamentos hidrológicos no Brasil tiveram início com a instalação das primeiras estações pluviométricas com medições regulares, há mais de cem anos. Posteriormente, em decorrência da necessidade de aproveitamento das forças hidráulicas, foram instaladas estações para acompanhamento dos níveis de água e estações de medição de vazões líquidas. A hidrometria passou a ser realizada de forma mais estruturada a partir do início do século passado, evoluindo em relação à metodologia operacional, aos equipamentos de medição e observação e, também, em relação ao número de estações monitoradas.

Na década de 1970, em meio a reformulações institucionais, o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE conservava a atribuição de realizar as atividades de hidrologia e serviços de hidrometria no país (Ibiapina *et al.*, 1999). Nessa época foi criado o Sistema de Informações Hidrológicas - SIH, o qual teve especial papel na informatização dos dados hidrológicos. Nesse âmbito foi instituído o “Projeto Hidrologia”, que dividiu o território em oito grandes bacias hidrográficas com o objetivo principal de codificar as estações fluviométricas. Dentro do mesmo projeto foi elaborado, então, o inventário das estações de monitoramento, sistema que pretendia fornecer as informações de interesse dos usuários de dados hidrológicos.

Esse cenário, que promoveu considerável desenvolvimento dos conhecimentos em hidrometria e hidrologia no país, em conjunto com uma grande demanda por informações provocada pelo crescimento do setor elétrico, despertou a atenção para as regiões ainda pouco conhecidas e exploradas. Assim, locais supostamente detentores de promissoras reservas hídricas, porém de difícil acesso e com baixa densidade demográfica, tiveram atenção especial em relação à ampliação da rede hidrométrica. Entretanto, ainda hoje, regiões de importância estratégica pela relevante disponibilidade hídrica como a bacia Amazônica, tem densidade de rede de monitoramento hidrológico inferior ao mínimo necessário para uma caracterização satisfatória da bacia em termos hidrológicos.

Atualmente a densidade na Amazônia é de 20.000 km² por estação fluviométrica, enquanto o mínimo estabelecido pela OMM (Organização Mundial de Meteorologia), (WMO, 1994) para redes fluviométricas é de 1.875 km² por estação. A Tabela 1.1 e Tabela 1.2 apresentam, respectivamente, os limites mínimos sugeridos pela OMM (WMO, 1994) pra redes pluviométricas e fluviométricas.

Tabela 1.1 – Densidades mínimas recomendadas para estações pluviométricas (WMO, 1994).

UNIDADE FISIAGRÁFICA	DENSIDADE MÍNIMA POR ESTAÇÃO (área em km ² por estação)	
	SEM REGISTRADOR	COM REGISTRADOR
Costeira	900	9.000
Montanhosa	250	2.500
Planícies interiores	575	5.750
Ondulada (colinas)	575	5.750
Pequenas ilhas	25	250
Áreas urbanas		10-20
Polar / árida	10.000	100.000

Tabela 1.2 – Densidades mínimas recomendadas para estações fluviométricas (WMO, 1994).

UNIDADE FISIAGRÁFICA	DENSIDADE MÍNIMA POR ESTAÇÃO (área em km ² por estação)
Costeira	2.750
Montanhosa	1.000
Planícies interiores	1.875
Ondulada (colinas)	1.875
Pequenas ilhas	300
Polar / árida	20.000

Por outro lado, considerando sua importância estratégica, manter uma rede hidrometeorológica bem planejada e operada faz parte de diferentes ações dos órgãos gestores do país para o gerenciamento adequado dos potenciais hídricos disponíveis. Além disso, representa uma necessidade do setor privado que necessita de informações para o desenvolvimento de projetos de infraestrutura, como os de abastecimento público, transporte, saúde, lazer e turismo, agropecuária e energia.

No âmbito do setor público, a rede hidrometeorológica nacional, cujo gerenciamento, atualmente, está sob a responsabilidade da ANA (Agência Nacional de

Águas), tem sua operação estruturada em planos de trabalho definidos anualmente. Essa operação é executada por meio de instrumentos como contratos, convênios, portarias e acordos de cooperação técnica envolvendo diferentes entidades. Esse tipo de estruturação, baseada em planos anuais, muitas vezes prejudica o monitoramento contínuo das estações, principalmente em relação à realização de medições hidrológicas, como descarga líquida e sólida. Isso ocorre devido ao intervalo gerado entre o fechamento de contas do ano corrente e a aprovação e liberação do orçamento do ano seguinte.

Essa rotina de descontinuidade do processo de operação das redes gerenciadas pelo setor público tem início no mês de dezembro e costuma se estender por, pelo menos, 30 dias. Em um país como o Brasil de dimensões continentais onde os regimes hidrológicos são bastante diversos, algumas regiões sofrerão com perdas sistemáticas de medições e, também de registros extremos. Na região sudeste o registro de eventos máximos será prejudicado pela falta de medições nesse período, enquanto na região nordeste do país, poderá ocorrer a falta de registros de eventos mínimos.

Além disso, o monitoramento hidrológico exige flexibilidade e agilidade uma vez que o objetivo é acompanhar e registrar, além dos diferentes regimes existentes no país, também eventos extremos. Assim, o sistema definido por planos de trabalho, relacionados diretamente ao repasse de recursos às entidades operadoras, muitas vezes engessa o processo e impede a tomada de decisão em tempo de monitorar adequadamente eventos extras ao cronograma previsto.

Aliado a esse tipo de estrutura, ainda no cenário do setor público, também existem problemas de escassez de recursos financeiros para aquisição de equipamentos, o que leva à estagnação na densidade da rede, falta de modernização das técnicas de aquisição de dados e conseqüente monitoramento inadequado das variáveis hidrológicas registradas pela rede. O fato de que a operação da rede nacional envolve várias entidades também gera certas particularidades em termos da qualidade da informação gerada, afinal, existem diferenças no processamento e no controle da aquisição dos dados e nas políticas de gestão de cada entidade operadora.

Em áreas remotas, onde o monitoramento ainda é escasso, como na bacia Amazônica, existe a necessidade de longos períodos de observação para que seja possível conhecer e acompanhar o comportamento hidrológico da região. O conhecimento dos processos que ocorrem na bacia sejam eles resultantes da ação do homem sobre o

ambiente, ou resultantes de processos naturais, permite que as ações propostas nessa área de elevado interesse sejam realizadas com embasamento adequado de informações. A bacia Amazônica, por suas dimensões continentais e baixa densidade demográfica, necessita de uma rede hidrometeorológica que requer projeto e operação específicos, constituídos pela aquisição, manipulação, análise e utilização da informação obtida. No que se refere à aquisição dos dados, não há uma metodologia para embasar a decisão sobre onde, como e o que monitorar. Muitas vezes, essa decisão acaba sendo tomada em função de questões alheias à hidrologia, como disponibilidade de recursos financeiros e operacionais, necessidades momentâneas, entre outros.

A utilização de dados e imagens de satélite de observação da Terra, sobretudo em regiões de difícil acesso como os rios da bacia Amazônica, permite uma visualização da superfície terrestre em escala continental de forma homogênea e contínua, com detalhamento espacial e temporal que as redes superficiais de observação não permitem. Entretanto, deve-se considerar a limitação dada pelas imagens da superfície sobre a qual os dados do altímetro serão visualizados. A aquisição dessas imagens muitas vezes é prejudicada por condições climáticas e cobertura de nuvens.

Uma vez que os rios, lagos e zonas de inundação constituem a principal fonte de água doce, há a necessidade de contar com um sistema global e permanente de monitoramento. Tal sistema deve disponibilizar, de forma rápida e fácil, os dados de níveis de água continentais e, na medida do possível, os dados de volume de água e descargas dos rios.

As medidas altimétricas de níveis de água fornecem importantes aplicações, algumas já concluídas, outras ainda em andamento. Por exemplo: nivelamento das estações da rede hidrometeorológica, estimativa de descarga líquida a partir de medidas altimétricas, estimativa das variações espaciais e temporais de armazenamento de água em rios e zonas de inundação, perfis longitudinais de água e implicações geodinâmicas.

Koblinsky *et al.* (1993) escreveram que o Brasil, com área superior a oito milhões de quilômetros quadrados, é um país que depende de seus imensos recursos hídricos para geração de energia hidráulica e transporte fluvial. O acesso quantitativo a esse importante recurso é dificultado pelas grandes distâncias, acessos limitados, e, no caso da bacia Amazônica, baixa densidade populacional e extrema escassez de observadores preparados para trabalhar em áreas remotas e insalubres. Além disso, os equipamentos

instalados na bacia, que podem funcionar de modo automático e confiável por longos períodos, em condições de altas temperaturas e alta umidade, são limitados. Assim, os autores defenderam a utilização de sensoriamento remoto espacial para medir os níveis dos rios nessas regiões.

No contexto do estudo proposto, busca-se avaliar a utilização de dados de satélite como uma alternativa para contornar a problemática da coleta de dados observados *in situ*, obtidos por redes hidrométricas tradicionais. Busca-se também avançar além da simples caracterização da superfície terrestre pelo satélite, integrando-se os dados de altura d'água adquiridos pelo altímetro a bordo do satélite, com os dados adquiridos pelas estações fluviométricas convencionais. A Figura 1.1 apresenta a possibilidade de adensamento do monitoramento na bacia Amazônica considerando como pontos de aquisição de dados todas as interseções entre a drenagem e os traços de satélites sobre a bacia.

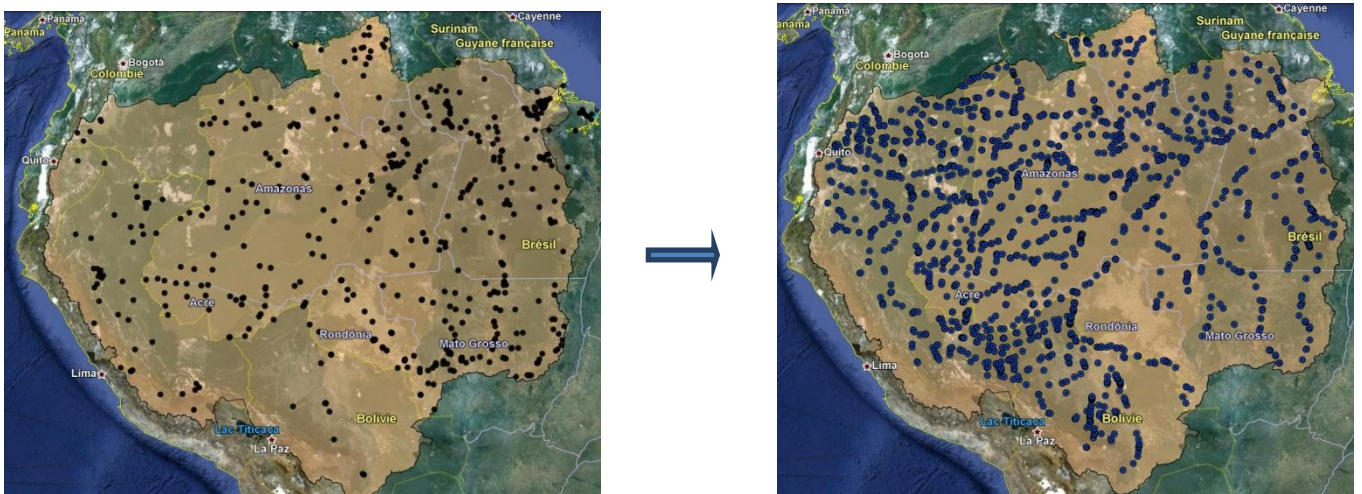


Figura 1.1 – Rede de monitoramento na Amazônia considerando a integração entre dados altimétricos e convencionais de níveis de água (Calmant, 2012).

2 - OBJETIVOS

Busca-se avaliar a qualidade de uma alternativa à aquisição de dados hidrológicos realizada de forma convencional. A proposta é estudar um processo para medir os níveis dos corpos de água que seja capaz de superar as limitações existentes nos registros de dados adquiridos via redes hidrométricas tradicionais. A alternativa analisada consiste em avaliar medidas realizadas por satélites de observação da Terra.

Em especial, busca-se apresentar, em princípio, um diagnóstico do desempenho do altímetro de radar RA-2, pertencente ao conjunto de instrumentos a bordo do satélite ENVISAT (Environmental Satellite), na aquisição de dados de níveis de água em grandes rios. Dessa forma, será avaliada a utilização de um altímetro como medidor de alturas de água.

Pretende-se com este estudo analisar técnicas alternativas de medição e monitoramento para o futuro. Além disso, por meio de resultado apresentado pelo processo em análise, poderá ser possível também, contribuir para pesquisas no desenvolvimento de instrumentos específicos para o monitoramento em águas continentais, como altímetros capazes de adquirir alturas de superfícies com menor intervalo entre medidas, por exemplo. Consequentemente, tais instrumentos, embarcados em plataformas de satélites, representariam benefícios em termos de ganho de informações úteis ao campo dos recursos hídricos e, especialmente, à hidrologia.

2.1 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar os dados adquiridos pelo altímetro RA-2, a bordo do satélite ENVISAT, aplicados na medição de níveis de água em rios. Esses dados serão analisados tendo como base os dados coletados por uma estação fluviométrica convencional.

A partir de um método original de visualização em 3D (três dimensões) para definir as estações aqui denominadas virtuais, serão construídas séries temporais de nível de água a partir de dados altimétricos originados em pontos próximos às estações fluviométricas convencionais.

Essa avaliação será feita por meio da comparação entre os dados fornecidos pelo satélite e os dados fornecidos pelas estações da rede hidrometeorológica nacional para que seja possível avaliar a qualidade das medidas do altímetro sobre os rios em relação aos níveis adquiridos pela estação fluviométrica.

3 - CONTEXTO

A presente pesquisa é parte integrante do projeto “Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões - Amazonas” que tem como objetivo realizar levantamentos hidrológicos, hidrogeológicos e geológicos na calha do rio Solimões (no curso entre os municípios de Atalaia do Norte e Santo Antônio do Içá, região oeste do Amazonas), na região do município de Manacapuru (na confluência com o rio Negro) e no rio Madeira (próximo à sua confluência com o rio Amazonas). A calha do sistema Solimões – Amazonas comporta parte considerável da população presente na região amazônica. Essa população, que vive em cidades e comunidades isoladas, se relaciona com a dinâmica fluvial convivendo com os períodos de cheias e vazantes. Nesse ambiente, sofrem com a erosão fluvial, utilizam os recursos hídricos como meio de transporte, fonte de alimentação e abastecimento pelo uso da água subterrânea.

Dessa forma, esse estudo está inserido em uma das linhas de pesquisa que fazem parte do acordo existente entre a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e o *Institut de Recherche pour l'ê Développement* (IRD). Por meio desse acordo, como funcionária da CPRM, foi possível obter apoio para a realização deste trabalho que contará com auxílio técnico e financeiro das partes envolvidas, assim como a disponibilização de tempo, por parte da CPRM, para o desenvolvimento deste trabalho. A dissertação aqui apresentada fará parte dos produtos necessários para que tal acordo se justifique.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 – HISTÓRICO DA ALTIMETRIA ESPACIAL

O artigo escrito por Lefebvre e Stewart (2006) apresenta o histórico da altimetria entre os anos 1960 e 1992. Segundo os autores, a altimetria fornece os dados para a compreensão da Terra como um sistema.

O estudo destaca as áreas de pesquisas e respectivos autores que contribuíram para o início da altimetria por meio de suas relações com as correntes geostróficas e com a geodésia. Vihelm Bjerknes (1862-1951), Harald Sverdrup (1888-1957) e Albert Defant (1884-1974) foram três oceanógrafos que contribuíram notavelmente para a teoria que relaciona as correntes geostróficas com a altura da superfície do mar medida por altímetros.

As correntes geostróficas representam um dos principais componentes contribuintes para a formação das grandes correntes superficiais oceânicas (Mendes e Soares-Gomes, 2007). Corrente geostrófica é o movimento de água resultante do balanço entre a força da gravidade e a deflexão causada pela força de Coriolis.

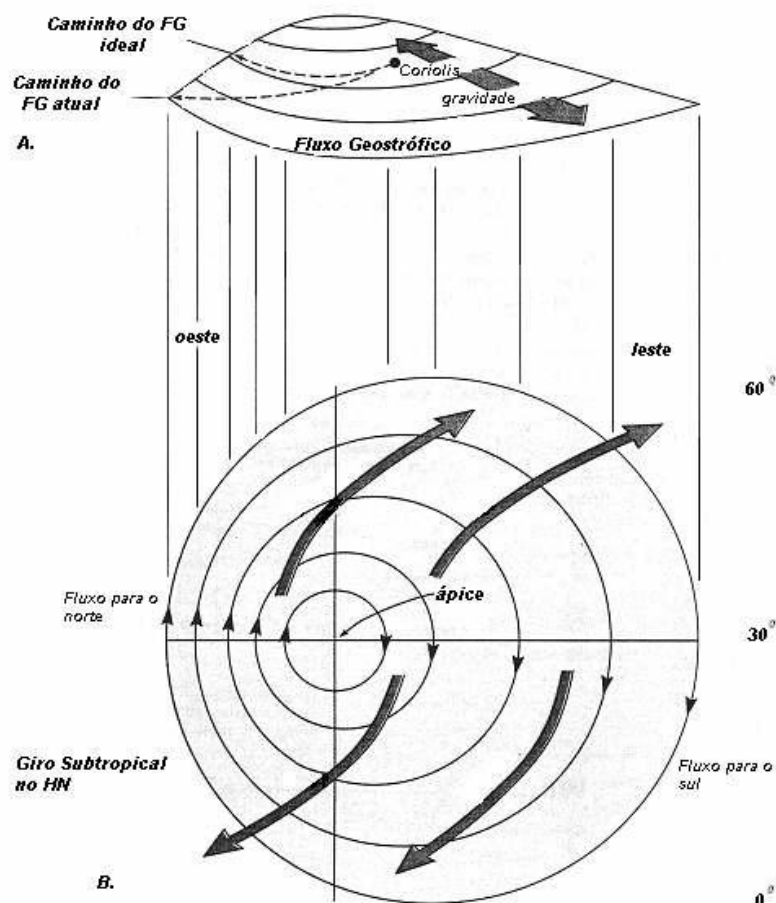


Figura 4.1 – Corrente geostrófica (Mendes e Soares-Gomes, 2007).

A Figura 4.1-A mostra que na medida em que o sistema de ventos da Terra coloca a água em movimento, giros circulares são formados. A água é empilhada no interior dos giros, com ápice da “colina” deslocado para o lado oeste dos giros devido à rotação da Terra para o leste. A corrente geostrófica (FG) teórica flui paralela ao contorno da colina e representa o equilíbrio entre a força de Coriolis, empurrando a água para o ápice através do transporte de Ekman, e o componente da gravidade puxando para baixo. Devido ao atrito das moléculas de água, o caminho da corrente (FG atual) segue gradualmente para baixo da inclinação da colina.

A intensificação do ápice dos giros a oeste é mostrada na Figura 4.1-B. A parte mais alta da colina se situa próximo à margem oeste dos giros. Dessa forma, a velocidade da água que circula na margem oeste é muito superior àquela que circunda a margem leste devido à maior inclinação da colina. As águas que circundam a oeste seguem para norte e são quentes, o contrário daquela que circula no lado leste (Mendes e Soares-Gomes, 2007).

Nesse cenário, três workshops estabeleceram os fundamentos da altimetria por satélite. *Oceanography from Space*, realizado em Woods Hole, Massachusetts, Estados Unidos da América, em 1964; *NASA Williamstown Report*, promovido para delinear o programa de exploração da Terra, realizado em 1969 em Williamstown Estado de Kentucky nos Estados Unidos; e o SONG (*Space Oceanography Navigation and Geodynamics*) realizado em 1978, em Schloss Elmau, Alemanha.

A precisão geodésica aumentou rapidamente na década posterior ao lançamento do Sputnik em 1957 (Lefebvre e Stewart, 2006). Por meio de diversos satélites, foram testados três diferentes tipos de sistemas de rastreamento.

- a) Rastreamento Óptico: realizado por câmeras no solo que identificavam os satélites pelo brilho. Esse sistema melhorou a precisão geodésica global de 200 m para 10 a 15 cm;
- b) Rastreamento por Rádio: utilizando Doppler, levou aos sistemas de posicionamento globais que funcionam em todas as condições climáticas. Essa transição permitiu aos navios oceânicos navegar com 1 km de precisão. Um grande avanço sobre a precisão de 10 a 20 km fornecida pelas técnicas de navegação celestes;
- c) Rastreamento por Laser: permitiu medidas de posicionamento dos satélites com precisão de centímetros. Essas medidas trouxeram muitas informações novas sobre o campo gravitacional da Terra.

As primeiras medidas altimétricas para determinar a topografia e a superfície dos oceanos foram realizadas no início da década de 1970. Em 1969, a NASA estabeleceu os objetivos de longo prazo da altimetria espacial por radar. O primeiro altímetro a bordo de um satélite foi lançado pelos Estados Unidos, com destaque para os satélites Skylab, em 1973, GEOS-3, em 1975, Seasat, em 1978, e Geosat, em 1985 (Santos da Silva *et al.*, 2009).

Os anos 1970 foram marcados pelo desenvolvimento da precisão dos sistemas de altimetria por satélite, com o Skylab (que produziu as primeiras medidas de ondulações do geóide marinho a partir de características do fundo do mar) e com o Geos-3 e o Seasat, cujos dados foram amplamente e gratuitamente distribuídos aos cientistas do mundo todo, formando a base para uma nova geração de satélites oceânicos. O Skylab,

lançado em 14 de maio de 1973 pelo foguete Saturn V, como parte do programa Apollo, foi a primeira estação espacial e laboratório de ciências orbitais e engenharia da América.

A missão Geosat, radar altimétrico da marinha norte-americana, entre 1985 e 1989, forneceu as primeiras medidas altimétricas com precisão e duração suficientes para analisar a utilidade de tais medidas no monitoramento de longo prazo de águas continentais (Koblinsky *et al.*, 1993). Essas medidas foram analisadas sobre a bacia Amazônica.

Nos anos 1990, o satélite Topex/Poseidon, devido à sua precisão de posicionamento, passou a possibilitar o monitoramento das variações de altura da superfície do mar a partir de processos dinâmicos de baixa amplitude dos oceanos. Com as missões ERS-1 (e ERS-2, em seguida), a altimetria passou a fornecer informações vitais para uma crescente comunidade internacional de usuários.

Duas grandes famílias altimétricas foram desenvolvidas a partir da década de 1990. A primeira, por meio de um esforço conjunto entre o CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) e a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Esse projeto, especificamente dedicado ao estudo dos oceanos, foi embarcado nos satélites Topex/Poseidon (1992-2006) e seus sucessores Jason-1 (2001-) e Jason-2 (2008-). A ESA (*European Space Agency*) concebeu a segunda família, desenvolvida para o estudo dos oceanos e das terras firmes, embarcada nas plataformas ERS-1 (1991-1996), ERS-2 (1995-2011) e ENVISAT (2002-2012). O estudo das terras firmes se dá a partir de um módulo continental, instalado nesses altímetros. Dessa forma, sob certas condições, é possível adquirir medidas nos continentes e nas calotas polares. Em 2000, a marinha norte-americana (*U.S. Navy*) lançou o satélite GFO, para dar continuidade à missão Geosat e, em 2003, a NASA lançou o satélite Icesat (2003-2009), com um altímetro a laser embarcado (Santos da Silva *et al.*, 2009).

A altimetria por satélite, desenvolvida para medir sobre as mínimas inclinações das superfícies oceânicas, tem potencial para aumentar nossa capacidade de medir níveis de água sobre o continente (Rapley *et al.*, 1987; Guzkowska *et al.*, 1990). Se as técnicas de altimetria por satélite podem fornecer medidas da variação dos níveis dos rios com a precisão e a frequência necessárias para aplicações hidrológicas, seu valor para um país como o Brasil pode ser enorme (Koblinsky *et al.*, 1993).

A altimetria por satélite também tem sido utilizada para determinar os perfis longitudinais dos rios. Cudlip *et al.* (1992) estabeleceram o perfil longitudinal do rio Amazonas a partir dos dados do satélite Seasat. Eles utilizaram 32 cruzamentos de traços do satélite sobre o Amazonas em julho de 1978. Esses autores estimaram a precisão do valor de nível d'água entre 10 cm e 20 cm.

Estudos em grandes bacias também foram iniciados por Koblinsky *et al.* (1993), que pesquisaram as formas de onda especulares do satélite Geosat (*U. S. Navy's Geodetic Satellite*) para estimar os níveis de água em quatro locais na Amazônia. Nesse estudo, foi estimada uma diferença de cerca de 70 cm, para mais ou para menos, entre as medidas do satélite e as realizadas no local, em parte devido a incertezas nos registros feitos *in situ*, mas a maioria devido a incertezas na determinação da órbita do satélite.

Birkett (1998) mostrou que, apesar das limitações técnicas, as mudanças de nível dos rios mais largos do mundo poderiam ser monitoradas pela altimetria por satélite com uma precisão de poucos decímetros, a partir de escalas de tempo intra-sazonais e até interanuais. Mais recentemente, Birkett *et al.* (2002) publicaram séries temporais de flutuações de níveis na bacia Amazônica utilizando medidas do satélite Topex/Poseidon (T/P) entre 1992 e 1999. Foi concluído que a precisão pode variar de dezenas de centímetros até alguns metros, 1,1 m de rms (*root mean square* ou raiz da média dos quadrados). A raiz da média dos quadrados é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. É especialmente útil quando as variações são positivas e negativas. Portanto, aqui, significa o desvio padrão das diferenças entre os níveis altimétricos e os níveis *in situ*.

Para o caso da bacia Amazônica, estudos têm concluído que os dados de satélite aumentam muito significativamente o número de pontos de medida do nível da água. Certamente, as interseções entre o sistema de drenagem e os traços de satélite formam uma rede aproximadamente 10 vezes mais densa que a rede de estações hidrométricas instaladas na bacia (Leon *et al.*, 2005).

Atualmente, diversas bases de dados disponibilizam as séries temporais de níveis de água ao redor do mundo. A primeira base de dados é resultante do processamento dos dados adquiridos pelos satélites ERS e ENVISAT na universidade de Montfort, em Leicester, Inglaterra, realizado para a Agência Espacial Europeia (ESA). Dois tipos de produtos são disponibilizados: o “*River Lake Hydrology*” (RLH), desenvolvido para

hidrólogos sem conhecimento prévio de altimetria por radar e organizado de acordo com os pontos de cruzamento do rio/lago; cada produto é correspondente a um ponto de cruzamento; e o “*River Lake Atimetry*” (RLA), para pesquisadores e usuários da altimetria por radar. O RLA está organizado por órbita ou pelos ciclos (a cada 35 dias) e fornece todos os pontos de cruzamento para uma região predefinida (ESA, <http://earth.esa.int/riverandlake/description.htm>).

A segunda base de dados é conhecida como “*Hydroweb*” (<http://www.legos.obs-mip.fr/soa/hydrologie/hydroweb/>) e foi criada no Laboratório de Estudos em Geofísica e Oceanografia Espacial, LEGOS (*Laboratoire d’Etudes em Oceanographie et Geodésie Spatiale*), em Toulouse, França. Essa base de dados fornece dados observados em rios (cerca de 200 locais utilizando, principalmente, dados do T/P) e lagos e reservatórios (cerca de 150 locais) ao redor do planeta, por meio do processamento dos dados oriundos dos satélites ENVISAT, GFO, T/P e Jason.

O departamento de agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture*) mantém a terceira base de dados (http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/). A principal proposta é gerar séries temporais sobre lagos e reservatórios utilizando um arranjo de dados dos satélites T/P e Jason. Devido ao uso de dados brutos, essa base está apta a gerar informações em tempo real (*Near Real Time values*).

O projeto CASH (*Contribution of Spacial Altimetry to Hydrology*), fundado pelo Ministério Francês de Pesquisa e Tecnologia (*French Ministry of Research and Technology*), produziu uma base de dados consistidos do T/P (<http://www.hydrospace-cash.fr>) a partir da base de dados “*Hydroweb*” do LEGOS. Para cada cruzamento de um rio em cada uma das oito maiores bacias do mundo, essa base de dados fornece uma série temporal de níveis de água, relativas ao geóide (EGM96), com frequência de um ponto “médio” em cada um dos ciclos, isto é, no melhor caso, a cada 10 dias para o T/P. Os traços foram os mesmos utilizados para a missão ENVISAT.

4.2 – PRINCÍPIO DA MEDIDA ALTIMÉTRICA POR RADAR

O Altimetro de Radar mede o tempo de viagem de um pulso de radar refletido a partir da superfície da Terra de volta ao instrumento. Se o tempo de viagem é medido com grande precisão então a distância do instrumento à superfície pode ser determinada com grande precisão. A determinação precisa da órbita calcula a altitude do satélite sobre o elipsoide de referencia com centímetros de precisão.

O conceito básico da altimetria por satélite é direto (Fu e Cazenave, 2001). O principal objetivo é medir a distância entre o satélite e a superfície terrestre (solo ou água). Essa medida é realizada por meio de radares que são acoplados às plataformas dos satélites.

A altimetria por radar do espaço consiste de medidas da distância vertical entre o satélite e o nível da água. A diferença entre a altitude do satélite acima da superfície de referência (usualmente um elipsoide convencional), estabelecida por meio da determinação precisa da órbita, e a distância satélite-superfície da água, fornece as medidas do nível da água sobre a superfície de referência. Colocado em uma órbita repetida, o altímetro a bordo do satélite sobrevoa uma dada região em intervalos regulares de tempo (chamados de ciclos orbitais), durante os quais uma completa cobertura da Terra é realizada (Oliveira Campos *et al.*, 2001).

A medida altimétrica básica é a diferença entre a elevação do satélite relativa ao centro de massa da Terra derivada de uma precisa determinação de órbita e da altura do satélite relativa à superfície, observada pelo tempo de viagem de um pulso do radar emitido pelo satélite (Koblinsky *et al.*, 1993).

Assim, os radares altimétricos (*RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging) embarcados sobre as plataformas dos satélites, medem, a partir do nadir, a distância que separa o satélite da superfície terrestre. Esses instrumentos funcionam a partir de um princípio simples, a medida do intervalo de tempo “*dt*” entre a emissão de uma onda eletromagnética vertical e a recepção do eco. A partir da velocidade de propagação “*c*” da onda (velocidade da luz), a distância *R* (*R* de *range*, que significa a altura do altímetro), que separa o emissor do alvo é deduzida pela duração do trajeto de ida e volta (Equações 4.1 e 4.2).

$$R = \hat{R} - \sum_{j=1}^{j=n} \Delta R_j \quad \text{Equação 4.1}$$

onde,

$$\hat{R} = c * \frac{dt}{2} \quad \text{Equação 4.2}$$

Na Equação 4.1, ΔR_j (com $j = 1, \dots, n$) são as correções instrumentais, ambientais e geofísicas. Ou seja, são as correções relativas às componentes de refração atmosférica e relativas à polarização entre a superfície média da dispersão eletromagnética e o nível médio do mar na interface mar-atmosfera (Fu e Cazenave, 2001).

Na prática, a medida deve ser corrigida para um número de efeitos de modo a fornecer uma medida de distância precisa. O instrumento deve ser calibrado regularmente para determinar os tempos de atraso do sinal no ambiente da eletrônica do instrumento. Esse atraso do instrumento varia com o ciclo de aquecimento/resfriamento do satélite ao redor da órbita. Embora o sinal Radar, quando no vácuo, viaje na velocidade da luz, sofre atrasos quando viajando através da ionosfera e atmosfera. Uma distância relativa às correções geofísicas é necessária para permitir a correção desses atrasos. Além disso, as marés na superfície terrestre devem ser contabilizadas para determinar uma altura instantânea da superfície.

O princípio da altimetria por satélite é apresentado na Figura 4.2. A grandeza física procurada, e utilizada na prática, é a altura H , que representa a medida instantânea da altura do refletor que retorna o eco do radar, em relação a uma superfície matemática de referência, geralmente o elipsoide de referência. (Fu e Cazenave, 2001).

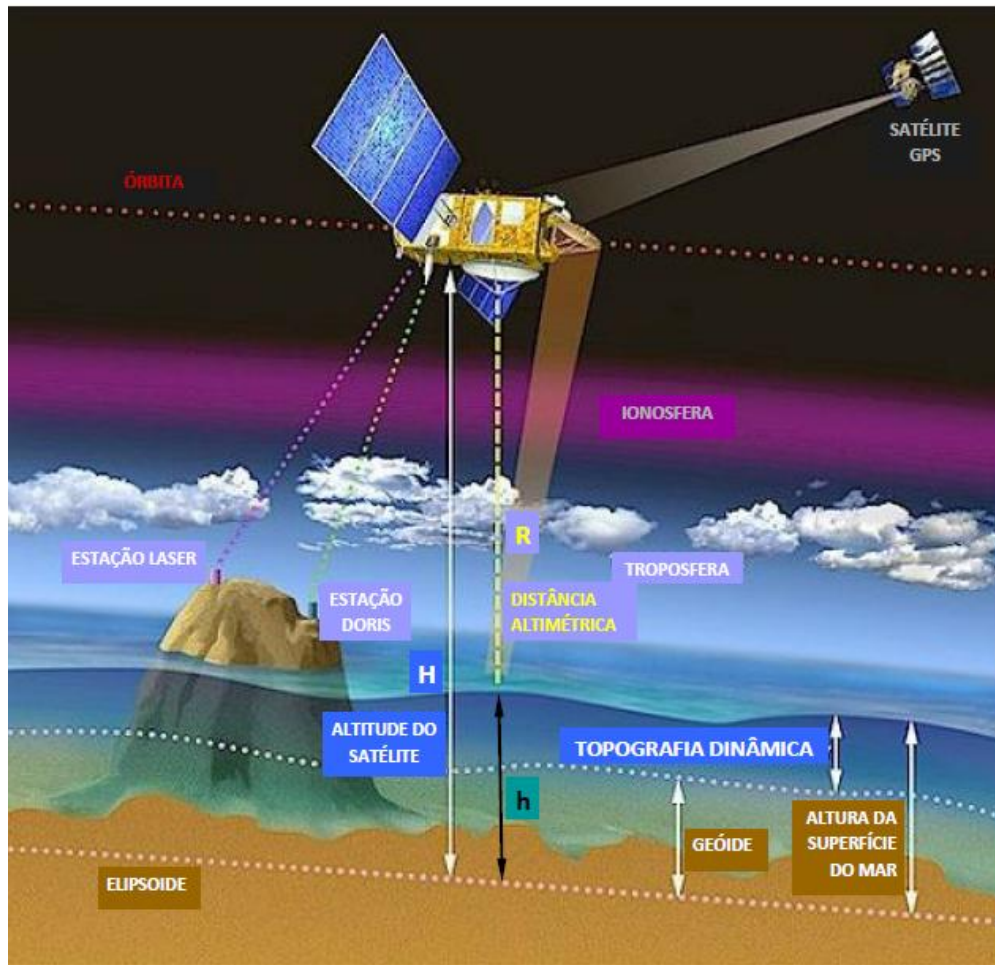


Figura 4.2 – Princípio da altimetria por satélite (AVISO, 2008).

Para a estimativa da altura h (Equação 4.3), representada pela distância entre o nível do mar e o elipsoide de referência (em preto na Figura 4.2), é necessário o conhecimento das duas grandezas, R (para *range*) ou distância altimétrica, que representa a distância que separa o satélite da superfície, e H , a altura do satélite em relação ao elipsoide de referência (Figura 4.2). O elipsoide de referência utilizado é o WGS-84. A altura h , assim obtida, representa a soma de duas componentes:

- uma componente permanente (topografia) ou altura do geóide em relação ao elipsoide (“GEÓIDE” na Figura 4.2); e
- uma topografia variável que traduz uma elevação temporária e instantânea da superfície do mar (“TOPOGRAFIA DINÂMICA” na Figura 4.2).

$$h = H - R$$

Equação 4.3

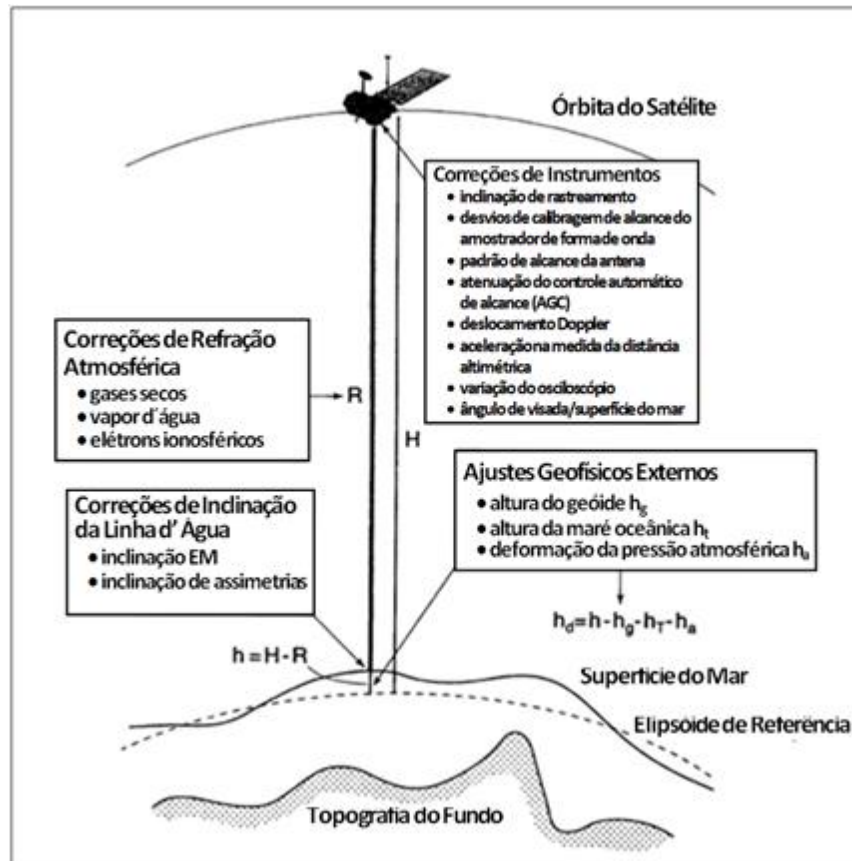


Figura 4.3 – Correções para a medida do R (*range*), (Fu e Cazenave, 2001).

A Figura 4.3 mostra um resumo esquemático das correções que devem ser aplicadas às medidas de R (*range*) adquiridas pelo altímetro e as relações entre R, a altura da órbita H e a altura h da superfície do mar relativa a uma aproximação elipsoidal da superfície equipotencial do mar a partir dos efeitos combinados da gravidade da Terra e de forças centrífugas (o geóide). A elevação dinâmica da superfície do mar h_d , que é de interesse para os estudos de circulação do oceano, é obtida a partir de h, subtraindo deste, a altura h_g das ondulações do geóide relativas ao elipsóide de referência e as variações h_t e h_a oriundas da carga das pressões de maré e atmosférica, respectivamente.

Assim, a ondulação permanente, ou topografia, (a) é determinada calculando uma superfície média sobre as séries temporais de superfícies instantâneas. O geóide é de interesse fundamental para os geofísicos que estudam os fundos oceânicos, enquanto os oceanógrafos têm necessidade de conhecer esse geóide apenas para poder isolar mais precisamente a topografia instantânea (Figura 4.4). Estes desejam, geralmente, estudar os aspectos da circulação oceânica, que se traduzem numa altura dinâmica, h_{dyn} ou “TOPOGRAFIA DINÂMICA” na Figura 4.2, que corresponde às variações da energia

térmica e cinética das massas oceânicas. Para obtê-la, é necessário subtrair de (b) a influência da maré oceânica e os seus efeitos de carga da maré sólida (esses fenômenos se devem à atração solar e lunar), da maré polar (ligado à força centrífuga da rotação da Terra) e barométrico oposto (ajustamento da altura da coluna de água em resposta às variações de pressão atmosférica). A precisão da determinação de h_{dyn} depende da precisão do conhecimento de cada um destes efeitos. O balanço do erro associado à h_{dyn} deve igualmente ter em conta os erros de órbita, os erros instrumentais, a refração atmosférica e as obliquidades da linha d'água (Santos da Silva, 2007).

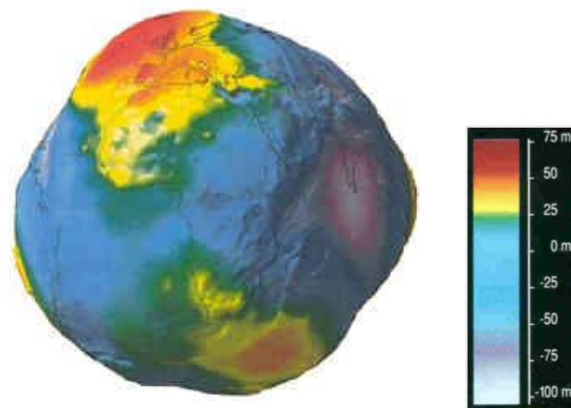


Figura 4.4 - Ondulações de grande comprimento de onda do geóide terrestre, determinadas a partir da análise das perturbações das trajetórias dos satélites (GRGS, 2009).

As potencialidades da altimetria por satélite, além dos oceanos, têm sido reconhecidas rapidamente. Assim, as calotas polares, cujas vastas extensões congeladas prestam-se bastante bem à medida altimétrica, foram objeto de numerosas investigações, que visam melhor conhecer a sua topografia e interpretar a evolução em termos de balanço de massa (Zwally *et al.*, 1989; Rémy *et al.*, 1990; Rémy *et al.*, 1999, *apud* Santos da Silva, 2007). Essa técnica foi utilizada igualmente em domínio continental para estudar a topografia terrestre. Com efeito, as medidas altimétricas podem servir de pontos de controle para melhorar a precisão dos modelos numéricos de terreno.

A altimetria por satélite revelou-se uma técnica relevante também para o acompanhamento das variações de nível de água nas grandes bacias fluviais, que é objeto deste estudo, devido à sua cobertura espacial densa e homogênea (Figura 4.5). Atualmente, os sistemas hidrológicos continentais sofrem de uma escassez de dispositivos de medida *in situ* que tornam delicado qualquer estudo efetuado em escala regional ou global. Além

disso, quando existem, as medidas *in situ* são geralmente difíceis de obter, mas igualmente heterogêneas, tanto no espaço como no tempo.

A contribuição da altimetria por satélite é essencial nesse respeito, permitindo um acompanhamento contínuo em tempos muito pouco diferentes das flutuações do nível de um grande número de planos de água na superfície da Terra. As centenas de milhões de medidas adquiridas nesses 15 anos pelos satélites com ciclos de 10 dias para Topex/Poseidon e Jason-1, 35 dias para ERS-1 e ERS-2 e ENVISAT, e 17 dias para Geosat e GFO, constituem um arranjo de dados de uma importância considerável e valor indispensável para o acompanhamento das águas continentais (Morris e Gill, 1994 a e b; Birkett, 1995 a e b; Cazenave *et al.*, 1997; Cretaux e Birkett, 2006); e bacias fluviais (Birkett, 1998; Oliveira Campos *et al.*, 2001; Birkett *et al.*, 2002; Maheu *et al.*, 2003; Frappart, 2006a; Leon *et al.*, 2006).

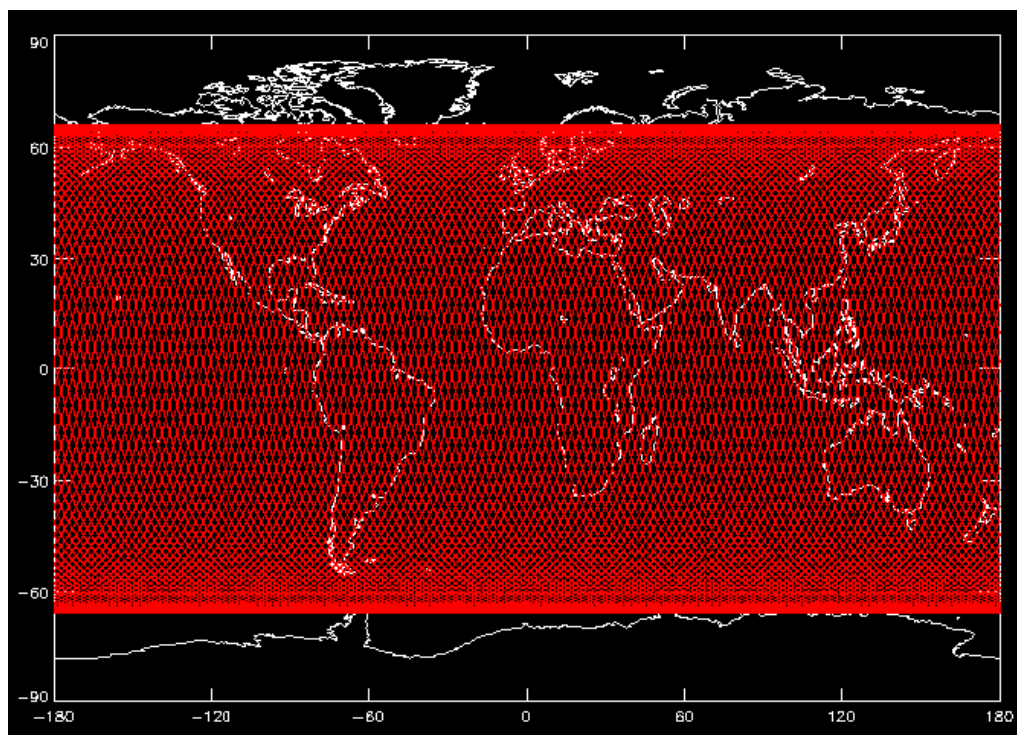


Figura 4.5 – Cobertura global do satélite Topex/Poseidon (Cazenave e Massonet, 2004).

4.3 – CARACTERÍSTICAS DOS SATÉLITES ERS-1, ERS-2 E ENVISAT

4.3.1 – ERS-1 e ERS-2

Os satélites ERS (*European Remote Sensing*) têm como principal missão a observação da Terra, em particular sua atmosfera e oceano, incluindo a produção de imagens na faixa de micro-ondas (banda C). Foram as primeiras plataformas concebidas e desenvolvidas pela ESA (*European Space Agency*), e carregam diversos instrumentos, incluindo um altímetro de radar de mono-frequência funcionando na banda Ku (13,6 GHz).

O ERS-1 foi lançado em julho de 1991, desligado em junho de 1996 e retirado de órbita em março de 2000. Esse satélite possuía uma órbita elíptica heliosíncrona, com altitude média de 785 km e inclinação de 98,5 °. Para possibilitar essa missão, a órbita do ERS-1 teve que habilitar os instrumentos para o mapeamento ao longo de trajetórias predeterminadas, desenhadas para dar uma cobertura ótima para um dado número de órbitas. Para tanto, o ERS-1 foi estabilizado em três eixos, direcionando o satélite para a Terra no modo YSM (*Yaw Steering Mode*). Estas órbitas são as seguintes: uma órbita com período de repetição de três dias para calibração e observação das calotas polares (de 28/12/1991 a 30/03/1992 e de 24/12/1993 a 10/04/1994, respectivamente); uma órbita com tempo de repetição de 168 dias para aplicações geodésicas (de 10/04/1994 a 28/09/1994 e de 28/09/1994 a 21/03/1995); e, uma órbita com período de repetição de 35 dias para observações oceânicas multidisciplinares. Essa é a órbita principal do ERS-1, assumida quando o satélite não estava operando nas outras duas, anteriormente citadas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Características dos satélites ERS-1 e ERS-2 (ESA, 2013).

PARÂMETROS TÉCNICOS - ERS-1 E ERS-2		
Órbita	Tipo	Próximo à circular, porlar, sol-sincronizada
	Altitude	782 a 785 km
	Inclinação	98,52 graus
	Período	Cerca de 100 minutos
	Órbitas por dia	14,3
	Ciclo de repetição	3 dias, 35 dias e 176 dias
Instrumentos	AMI - Instrumento de Microondas Ativo compreendendo um Radar de Abertura Sintética - SAR (imagem e modos de onda) e um Difusiómetro de Vento (WS);	-
	Altímetro de Radar (RA)	
	Radiômetro de escaneamento ao longo do traço (ATSR)	
	Equipamento de precisão de medida e taxa de medida (PRARE)	
	Experimento de monitoramento global de ozônio (GOME) - ERS-2	
	Sonda de microondas (MS) - ERS-2	
	Instrumento de Manipulação de dados e transmissão (IDHT) - ERS-2	
Retro-refletores laser		
Massa	Total de massa	2.157,4 Kg (ERS-1); 2.615 Kg (ERS-2)
	Total de carga útil	888,2 Kg
	Total da plataforma	1.257, 2 Kg
	Instrumento de Microondas Ativo	325,8 Kg
	Altímetro de Radar	96 Kg
	IDHT	74,0 Kg
	ATSR	55,3 Kg
	PRARE	12,0 Kg
Energia elétrica	Retro-relectors Laser	2,5 Kg
	Pico de energia de carga	2600 W
	Energia permanente de carga útil	550 W
	Voltagem de suprimento de energia	23-37 V
Controle de órbita e altitude	Energia à bordo	2650 WH máx.
	Tipo 3	Eixo estabilizados direcionados à Terra
	Taxa de erros absolutos	0,0015 graus (sigma = 3)
	Erros máximos	Tendência 0,11 graus (pitch e roll); 0,21 graus (desvio)
	Harmônica e aleatória	0,03 graus (pitch e roll); 0,07 graus (desvio)
	Precisão da previsão	30 m (radial), 15 m (longitudinal)
Manipulação de dados	Restituição de órbita	5 m (radial); 15 (m) longitudinal
	Computador de bordo	Extensão de palavra: 16 bits
	Capacidade da memória de carga útil	Máximo de palavras: 20 K
	Troca de dados de carga útil	Tipo ônibus OBDH
	Número de usuários de carga útil	redundante
Comunicações	Transponder	Coerente com a banda S (2kbits/s)
	Energia de transmissão	50 a 200 mW máx.
	Taxa de telemetria	2048 bit/s
	Taxa de telecomando	200 bit/rate
	Endereço para baixar dados	Banda-X (105 Mbits/s endereço de alta taxa para modo de imagem AMI)
		Banda-X (15 Mbit/s endereço de baixa taxa para tempo real e repetição de dados LBR)
		Gravadores à bordo fornecem armazenamento de 6,5 Gbits
Endereço de telemetria da banda-S para limpeza de dados		
	PRARE usa endereços próprios para seus dados de telemetria	

Os satélites ERS carregam a bordo instrumentos que consistem em um arranjo central de sensores ativos de micro-ondas apoiado por seis instrumentos complementares adicionais. A concepção do satélite é baseada no reuso das plataformas de missões multidisciplinares, desenvolvidas dentro do programa francês *Spot (Système Pour l'Observation de la Terre)*. Essas plataformas fornecem os principais serviços para satélite e para operações de carga útil, em particular, controle de altitude e de órbita, suprimento de energia, monitoramento e controle do peso da carga útil, e telecomunicações com o segmento em terra. O satélite ERS-2 levou a bordo os mesmos seis instrumentos do ERS-1 e mais um, voltado para o monitoramento da camada de ozônio, chamado GOME (“*global ozone monitoring experiment*”).

O ERS-2 foi lançado em abril de 1995 como o sucessor do ERS-1, com o qual foi usado em paralelo durante o período entre agosto de 1995 e junho de 1996, em órbitas idênticas, com tempo de revisita de 35 dias, tendo, porém, um dia de intervalo. Desde 22 de junho de 2003, o gravador existente a bordo do ERS-2 utilizado para o registro dos dados do altímetro passou por vários defeitos. Consequentemente, os dados do altímetro deixaram de estar disponíveis, com exceção dos períodos em que o satélite estava no campo de visibilidade das estações em terra da ESA sobre a Europa, Atlântico Norte, Ártico e oeste da América do Norte. A partir de março de 2002, os dados passaram a ser adquiridos pelo ENVISAT, satélite sucessor aos ERS. Entretanto, o satélite ERS-2 continuou oferecendo observações da superfície terrestre até 2011 com objetivos voltados, principalmente, para estudos oceânicos e de geleiras nas várias áreas de ciências naturais.

As características de órbita e amostragem dos satélites ERS-1 e ERS-2 (Tabela 4.1) foram governadas pelos objetivos multidisciplinares das missões. A inclinação elevada implica em uma cobertura de latitude acima de $\pm 81,5^\circ$. Tal inclinação permite que até mesmo as áreas polares com gelo continental e oceânico, como a Groenlândia e a calota polar de Ross, possam ser monitoradas. O ciclo de repetição do ERS-1 foi ajustado para 3, 35 e 168 dias, a fim de cumprir exigências específicas para gelo, oceano e aplicação geodésica, respectivamente. O seguinte, ERS-2, foi mantido com um ciclo de repetição de 35 dias, o melhor arranjo para exigências multidisciplinares (Bosch, 2002).

4.3.2 – ENVISAT

O ENVISAT (*ENVironmental SATellite*), o maior satélite para observação da Terra construído até o momento, foi lançado em março de 2002 pela Agência Espacial Europeia – ESA. O ENVISAT é um satélite polar-orbital que fornece medidas da atmosfera, oceanos e gelo. Os dados adquiridos pelo ENVISAT são utilizados para o estudo científico da Terra, análise ambiental e alterações climáticas. Segundo Gardini *et al.* (1995), a missão ENVISAT buscou atingir dois grandes objetivos:

- coletar séries temporais do meio ambiente terrestre em escala global para observar suas tendências, melhorando o monitoramento e controle dos recursos naturais; e
- contribuir para uma melhor compreensão dos processos que afetam a parte sólida da Terra.

O ENVISAT está posicionado na mesma órbita do satélite ERS-2, ou seja, em uma órbita elíptica heliossíncrona com uma inclinação de 98,5°, a uma altitude média de 785 km e uma distância intertraço ao Equador (distância entre os traços medida sobre a linha do Equador) de aproximadamente 80 km, sendo constituído por 10 instrumentos (

Tabela 4.2) que permitem uma análise rigorosa da atmosfera, continentes, oceanos e gelo do planeta (Wehr e Attema, 2001), incluindo um altímetro de radar (RA-2 ou *Advanced Radar Altimeter*). A Tabela 4.3, apresentada por Zhang (2009), mostra um sumário das características dos altímetros de radar utilizados por alguns satélites. Na Tabela 4.4, são apresentados os endereços eletrônicos disponíveis para o acesso às informações relativas às missões altimétricas.

Tabela 4.2 – Instrumentos a bordo do ENVISAT (ESA, 2013).

INSTRUMENTOS COMPONENTES DO ENVISAT	
Instrumento	Objetivo
AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer)	Radiômetro avançado de escaneamento ao longo do traço
ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)	Radar avançado de abertura sintética
DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)	Orbitografia e radioposicionamento Doppler integrado por satélite
GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)	Monitoramento global de ozônio por ocultação de estrelas
LRR (Laser Retro-Reflector)	Retro-refletores Laser
MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)	Espectômetro de imageamento de média resolução
MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)	Interferômetro de Michelson para sondagem atmosférica passiva
MWR (Microwave Radiometer)	Radiômetro de microondas
RA-2 (Radar Altimeter 2)	Altímetro de radar 2
SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography)	Espectômetro de absorção por digitalização de imagem para cartografia atmosférica

Tabela 4.3 – Resumo das características dos satélites (Zhang, 2009).

Nome	Seasat	Geosat	ERS-1	ERS-2	ENVISAT	T/P	Jason 1 e 2
País	USA	USA	Europa	Europa	Europa	USA / França	USA / França
Período da missão	Jul/1978 – out/1978	Mar/1985 – dez/1989	Jul/1991 – mai/1996 ⁽³⁾	Abr/1995 – jun/2003 ⁽³⁾	Mar/2002 – Abr/2012 ⁽³⁾	Ago/1992	Dez/2001
Altitude da órbita (km)	800	800	785	785	785	1336	1336
Inclinação da órbita (graus)	108	108	98,5	98,5	98,5	66	66
Distância intertraço ao Equador (km) ⁽¹⁾	800,160	164	20-80	80	80	318	318
Período de revisita (dias)	3,17	17	3, 35 e 168	35	35	10	10
Precisão de medida (cm) ⁽²⁾	5	4	3	3	3	2	2

(1) A distância intertraço ao Equador é obtida a partir da equação: $\Delta = 2 * \pi * R / (n-1)$, onde R é o raio da Terra na linha do Equador, 6378 km; n é o número de ciclos cruzando a linha do Equador para passagens descendentes e ascendentes (para o ENVISAT n = 501, para o T/P n = 127).

(2) A informação da precisão do Seasat e do Geosat se refere aos valores obtidos após as melhorias na determinação da órbita aplicadas retroativamente, as quais reduzem os erros de órbita em aproximadamente 20 cm para o Seasat e 10-20 cm para o Geosat (Fu e Cazenave, 2001).

(3) O período da missão se refere ao período de operação do altímetro de radar (nota do autor, 2012).

Tabela 4.4 – Lista de endereços eletrônicos das missões altimétricas operacionais.

INSTITUIÇÃO	MISSÃO	ENDEREÇO ELETRÔNICO
ESA	ERS-1, ERS-2	http://earth.esa.int/ers/
CERSAT	ERS-1, ERS-2	http://www.ifremer.fr/cersat/en/index.htm
ESA	Envisat	http://envisat.esa.int/earth/www/area/index.cfm?fareaid=6
JPL	Jason-1	http://topex-www.jpl.nasa.gov/mission/jason-1.html
CNES	Jason-1 e Jason-2	http://www.cnes.fr/web/CNES-en/1441-jason.php
NAVSOC	GFO	http://www.grdl.noaa.gov/SAT/gfo/
JPL/NASA	TOPEX/Poseidon	http://topex-www.jpl.nasa.gov/
CNES	TOPEX/Poseidon	http://www.cnes.fr/web/CNES-en/1461-topexposeidon.php
AVISO	Várias	http://www.aviso.oceanobs.com/fr/missions/index.html
JPL, PO.DAAC	Várias	http://podaac.jpl.nasa.gov/

Desde o lançamento do ENVISAT, a ESA distribui os dados que dão suporte às pesquisas científicas e permitem o monitoramento da evolução das mudanças ambientais e climáticas, facilitando o desenvolvimento das aplicações operacionais e comerciais.

O plano da missão ENVISAT é realizado no *European Space Research Institute* (ESRIN) tendo como base as demandas dos usuários e um conjunto de regras predefinidas apontadas pelo uso do satélite. O ENVISAT tem uma carga útil otimizada de forma a assegurar a disponibilidade dos dados para a maioria da comunidade de usuários e

para usos como resolução de conflitos. ESRIN é um dos cinco centros de observação da Terra especializados da ESA.

O ENVISAT possui diversos produtos e serviços, sendo que os dados utilizados nesse estudo são adquiridos através do RA-2 (*Radar Altimeter*). O radar altimétrico do ENVISAT (RA-2) foi desenvolvido para dar continuidade aos radares altimétricos ERS-1 e ERS-2, oferecendo um melhor desempenho nas medições além de novas capacidades.

4.4 – DADOS ALTIMÉTRICOS ENVISAT

A missão ENVISAT tem os registros de dados geofísicos (*Geophysical Data Records – GDRs*) processados e disponibilizados pelo *Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère – CTOH* do *Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales – LEGOS*.

Os algoritmos *ocean*, *ice-1*, *ice-2* e *sea ice*, de tratamento das formas de onda (FOs), foram desenvolvidos para permitir o cálculo da posição da medida altimétrica com data, latitude, longitude e altura do plano de água a partir da equação da órbita do satélite com as devidas correções ambientais e geofísicas.

O radar emite continuamente pulsos de micro-ondas (p. ex., 13,6 GHz) em direção à superfície, uma vez que o satélite orbita a Terra. Calculando o tempo de ida e volta gasto entre a emissão do pulso e a recepção do eco, a distância altimétrica (isto é, a distância entre a antena e a superfície) pode ser deduzida. Essa medida, juntamente com dados adicionais de geofísica e conhecimento da precisão da posição orbital do satélite, possibilita que a altura da topografia da superfície seja relacionada com um datum de referência único. Como cada satélite é colocado em uma órbita que se repete, essencialmente revisitando o mesmo local da superfície em cada ciclo, séries temporais de variações de alturas de água podem ser construídas para um alvo específico durante o tempo de vida da missão.

Cada radar altimétrico tem um campo de visão estreito determinado pelo tamanho da janela. Sobre superfícies de água, o diâmetro efetivo da janela pode variar de algumas centenas de metros durante condições calmas ou em locais protegidos de vento, até alguns quilômetros, dependendo das alturas características das ondas de superfície. Com a operação em nadir e uma órbita do satélite com limites geográficos norte-sul

ajustados, somente serão recuperadas as alturas que estejam exatamente embaixo da passagem do satélite. A repetição da órbita também ajusta a resolução temporal dos dados. Os efeitos combinados da técnica altimétrica e do processamento subsequente dos dados, ajustam a resolução espacial das medidas de altura ao longo do traço do satélite (Birkett *et al.*, 2002).

4.5 – CARACTERÍSTICAS DO RADAR ALTIMÉTRICO RA-2

Segundo Zelli (1999), o RA-2 é um altímetro de radar de segunda geração projetado e desenvolvido por Alenia Aerospazio (ALS) no âmbito do programa ENVISAT da Agência Espacial Europeia (ESA). O projeto, iniciado no começo de 1990, alcançou sua conclusão em outubro de 1998, quando foi integrado à plataforma do ENVISAT. Quanto às características, o RA-2 somente se assemelha, em parte, àquelas dos altímetros de radar da primeira geração, ERS-1/ERS-2, projetados pela ALS. As principais inovações do RA-2 são:

- a operação em dupla frequência (bandas Ku e S) para a correção dos efeitos de distorção da ionosfera nas medidas de distância com precisão realçada sobre oceanos;
- capacidade de incluir no instrumento dados telemétricos relacionados à superfície por meio de amostras de fase e quadratura dos ecos de radar da banda individual Ku;
- adaptação da resolução e algoritmos robustos de traçado para permitir medidas de distância e conjuntos de ecos de radar não somente sobre oceanos, mas igualmente nos limites terra-oceano, regiões de gelo e solo, com o objetivo real de mapeamento contínuo da topografia global da Terra.

O RA-2 mede o tempo de viagem e a potência de retroespalhamento dos pulsos individuais emitidos. O tempo de viagem é proporcional à altitude do satélite sobre as superfícies (oceano, terra, ou gelo). Sobre os oceanos as distâncias medidas tem precisão mínima de 2,5 cm. A magnitude e forma dos ecos de retorno também contêm informações sobre as características da superfície refletida, a partir da qual é possível obter parâmetros geofísicos como (quando sobre o oceano) altura de onda, velocidade do vento e localização da borda de gelo marinho.

Esse altímetro trabalha em sinergia com dois instrumentos, o MWR (Microwave Radiometer), um Radiômetro de Microonda, e o sistema DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*). O MWR é um radiômetro de microonda passivo, com visualizador em nadir e com dois canais, que opera em 23,8 e 36,5 GHz. Nessas duas frequências, esse instrumento recebe e mede radiações de microondas geradas e refletidas pela Terra.

Os sinais recebidos podem ser relacionados à temperatura da superfície, mas, o mais importante é que, a combinação conjunta dos sinais fornece uma estimativa da água total contida na atmosfera. Essa informação será usada para corrigir as medidas do altímetro em relação aos atrasos no percurso do sinal. O MWR possui um campo de visão de 20 km de diâmetro (ESA, 2012).

O RA-2 é um radar direcionado para o ponto nadir operando em bi-frequência nas bandas Ku, a 13,6 GHz com comprimento de onda de 2,3 cm, e na banda S, a 3,2 GHz, com comprimento de onda de 3,4 cm (Zelli, 1999). As principais características do RA-2 estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Principais características do RA-2 (ESA, 2012).

PARÂMETROS DO INSTRUMENTO	DISTÂNCIA (RANGE)	PRECISÃO
Altitude	764 km a 825 km	< 4,5 cm (máxima resolução)
Coefficiente de retroespalhamento	-10 dB a +50 dB	< 0,4 dB (tendência); 0,2 dB (residual)
Datação da medição	-	100 μ s (UTC)
Altura de onda	0,5 m a 20 m	< 5% ou 0,25 m
Frequência de operação	13, 575 GHz (Ku-Band); 3,2 GHz (S-Band)	-
Largura de banda	320, 80, 20 MHz e CW (Ku-Band); 160 MHz (S-Band)	-
Frequência de repetição do pulso	1795,33 Hz (Ku-Band); 448,83 Hz (S-Band)	Operação intervalada
Largura do pulso	20 μ s	-
Largura de banda IF	6,4 MHz	-
Operação	Contínua sobre uma órbita completa	-
Taxa de dados	100 kb/s	-
Massa	110 kg	-
Potência	161 W	-

A telemetria do Radar Altimétrico (RA) fornece 18 medidas de distância (*range*) por segundo o que corresponde a um intervalo de amostragem ao longo do traço de cerca de 400 metros. Sobre o oceano é comum usar a média de 20 destas medidas para fornecer um intervalo de amostragem de 1,1 segundo ou, cerca de 8 quilômetros. O altímetro é, essencialmente, um instrumento unidimensional, ou seja, o conceito de uma faixa de largura não se aplica (Figura 4.14).

A amostragem ao longo do traço é determinada pelo padrão de órbita. O ENVISAT opera com um ciclo de repetição exato de 35 dias composto por 501 órbitas com uma inclinação de 98,5 graus.

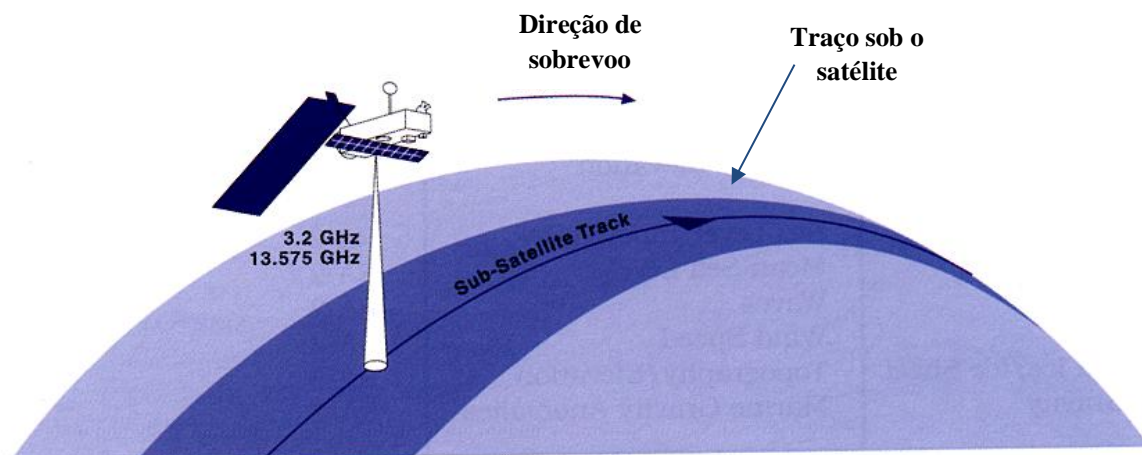


Figura 4.6 – Geometria de visada do RA-2 (ESA, 2012).

O MWR também é um instrumento de visada ao nadir que fornece amostragens contínuas ao longo do traço. O conceito de faixa de largura novamente não é aplicável. O campo de visão tem diâmetro de 20 km na superfície terrestre e cada medida representa uma média sobre essa cobertura (Figura 4.15). A amostragem global ao longo do traço funciona de mesma forma como descrito para o RA.

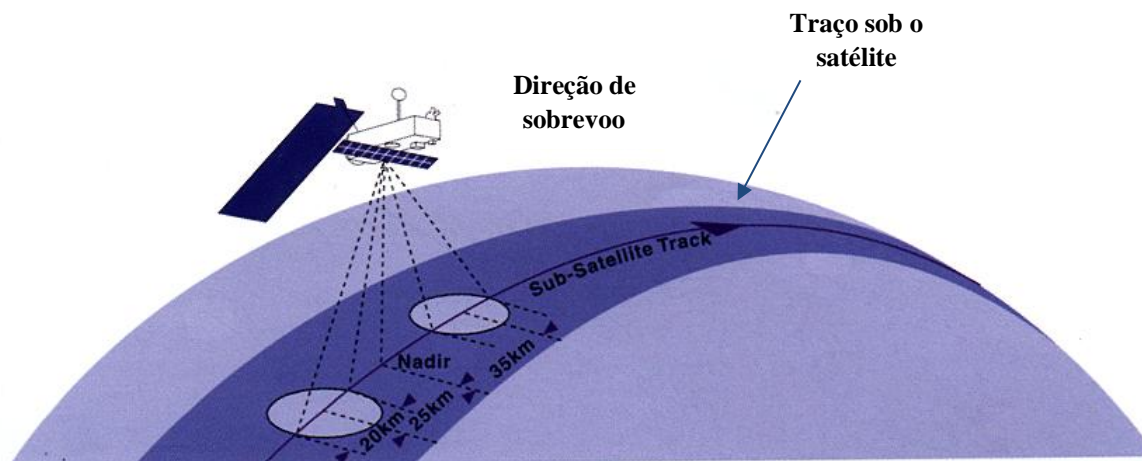


Figura 4.7 – Geometria de visada do MWR (ESA, 2012).

Operando sobre os oceanos, as medidas são usadas para determinar a topografia oceânica, que dá suporte para pesquisas de circulação, de batimetria e de caracterização do geoide marinho. Dados de velocidade do vento e ondas oceânicas de alturas significativas também subsidiam previsões climáticas e previsões das condições marinhas. Além disso, o RA-2 ainda mapeia e monitora gelo marinho, camadas de gelo polar e a maioria das superfícies da Terra.

Além das medidas sobre os oceanos e gelo, nesse estudo, a aplicação fundamental do RA-2 é a possibilidade de medir altitudes em relação às superfícies continentais, ou, mais especificamente, o monitoramento de níveis em rios e lagos. Segundo ESA (2012) a altimetria de radar é uma poderosa ferramenta para tal aplicação uma vez que unifica todas as medidas de níveis em rios e lagos realizadas no mundo, mesmo aquelas medidas nos locais mais remotos e inacessíveis, com uma única referência. Estar apto a medir os níveis em rios de forma global, ainda que somente uma ou duas vezes por mês, pode ser uma contribuição significativa para a hidrologia.

O altímetro emite um pulso do radar e mede o tempo da trajetória entre o satélite e a superfície (isto é, oceano, gelo, ou terra). A distância entre o satélite e a superfície terrestre (isto é, altura do altímetro ou *range*) é calculada com precisão de centímetros. Uma determinação precisa da órbita é resultante do uso do sistema DORIS (*doppler tracking system receiver*), um sistema francês, que utiliza 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 uma exatidão de aproximadamente 1 cm para a componente radial da direção do satélite (Dow *et al.*, 1999).

O sistema DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*) foi desenvolvido pelo CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*), IGN (*Institut Géographique National*) e GRGS (*Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale*). Por meio do conhecimento das demandas científicas e operacionais dos usuários foi possível ajustar o sistema de forma a fornecer uma medida bastante precisa da órbita.

Assim, o sistema DORIS foi projetado e otimizado para fornecer alta precisão na determinação da órbita e no posicionamento por balizas. Foi desenvolvido dentro da estrutura da missão de altimetria oceanográfica Topex/Poseidon e esteve operando desde 1990, quando o satélite Spot-2 foi lançado com o primeiro receptor DORIS a bordo.

DORIS é um sistema de rádio “up-link” baseado no princípio Doppler. O sistema mede a velocidade relativa entre o satélite orbitando e uma rede densa e permanente de balizas. O núcleo do sistema é a rede de balizas distribuídas de forma homogênea sobre a superfície terrestre. Os sinais de dupla frequência em 400 MHz e 2 GHz emitidos pelas balizas são usados pelos receptores a bordo dos vários satélites para realizar as medidas Doppler. A rede DORIS permanente inclui 54 balizas (Figura 4.8) hospedadas por

institutos de mais de 30 países. Mais de 20 balizas estão instaladas juntamente com outros sistemas de posicionamento preciso para permitir uma calibração cruzada (Guijarro *et al.*, 2000).

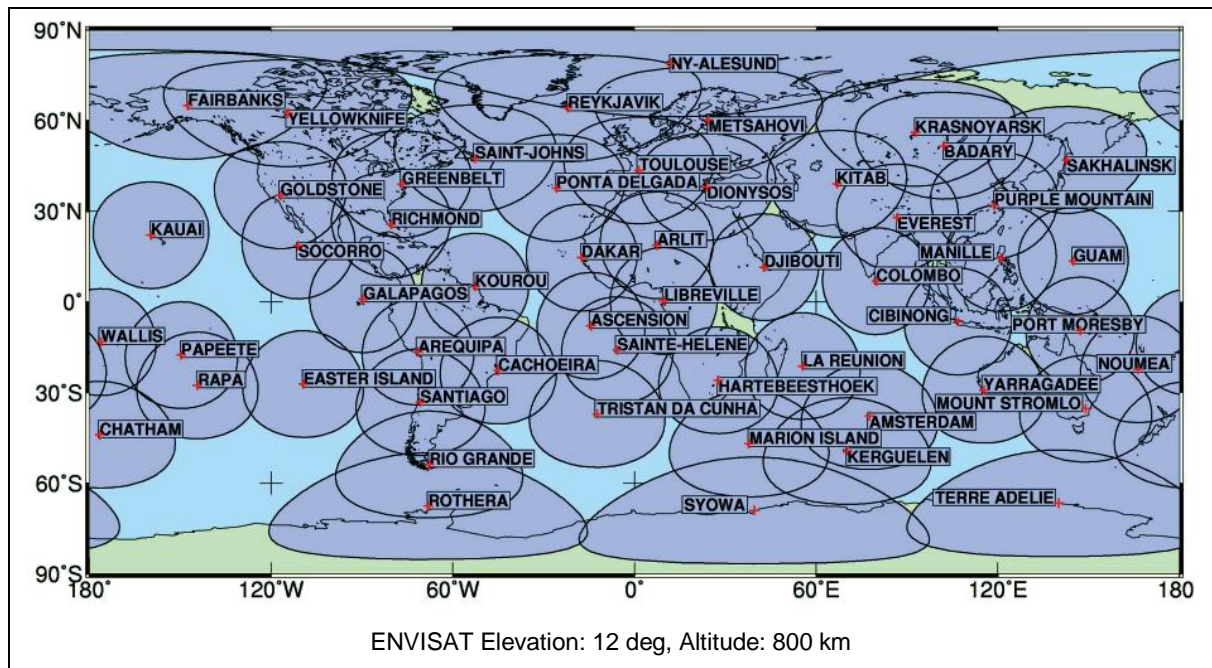


Figura 4.8 – Rede terrestre DORIS (Guijarro *et al.*, 2000).

A antena DORIS, a bordo do satélite, recebe os sinais emitidos pela rede de estações em terra. Quando o receptor e a fonte estão se movendo, o comprimento de onda do receptor é diferente do comprimento de onda do emissor: é o efeito Doppler. Quando o satélite se aproxima das balizas emissoras, a frequência do sinal recebido pelos instrumentos DORIS a bordo do satélite é maior que a frequência do sinal emitido, e menor quando o satélite se afasta. Se as frequências de emissão e recepção são iguais, a baliza emissora está exatamente perpendicular ao traço do satélite (Figura 4.9). Em um gráfico da frequência recebida pelo satélite em função do tempo, a inclinação da curva no ponto próximo ao máximo, ponto TCA (“*Time of Closest Approach*”), possibilita calcular a distância entre a baliza em terra e o satélite transmissor.

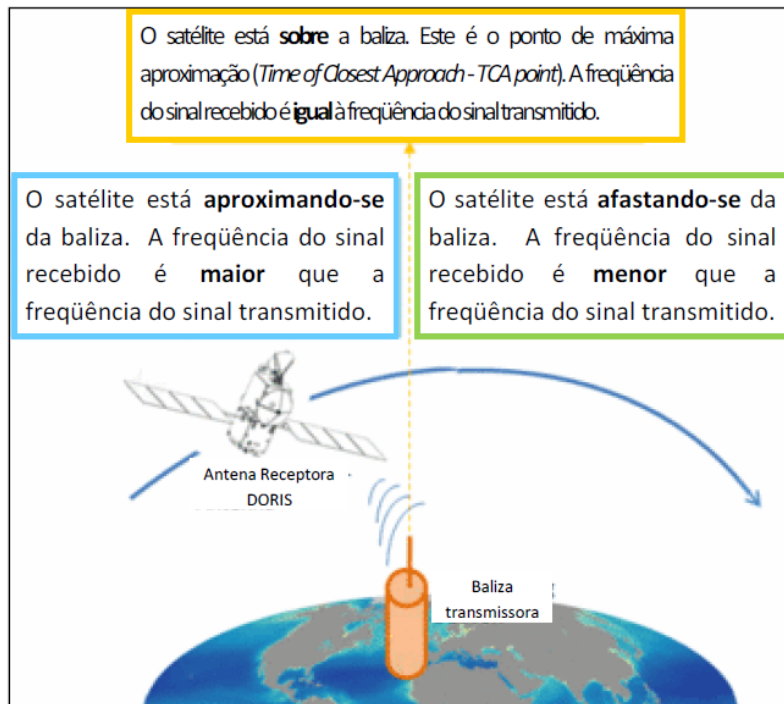


Figura 4.9 – O efeito Doppler (CNES/CLS (*Collecte Localisation Satellite*), 1992).

O impacto do DORIS nos objetivos da missão ENVISAT são os seguintes:

- determinação precisa da órbita;
- estudos de mudanças climáticas; e,
- monitoramento do nível do mar.

4.6 – TRATAMENTO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS

O tratamento das medidas altimétricas deve ser adaptado ao tipo de missão e ao modo de funcionamento dos instrumentos em órbita.

O sinal de retorno ao altímetro consiste em um dado bruto, que necessita passar por um tratamento para ser transformado em uma informação sobre a estimativa dos parâmetros físicos da superfície adquiridos pelo instrumento. A partir da análise da distribuição da energia recebida pelo altímetro, busca-se a localização precisa da posição do eco no tempo t (Figura 4.10). Na mesma figura, o eixo vertical é posicionado no momento da emissão do pulso do radar. A informação de tempo de ida e volta é procurada na forma do eco refletido pela superfície do plano de água. No exemplo teórico da Figura 4.10, para uma superfície oceânica, o tempo de ida e volta é correspondente à distribuição da energia (P) recebida na metade da curva ascendente (passagem do verde ao vermelho no terceiro quadro).

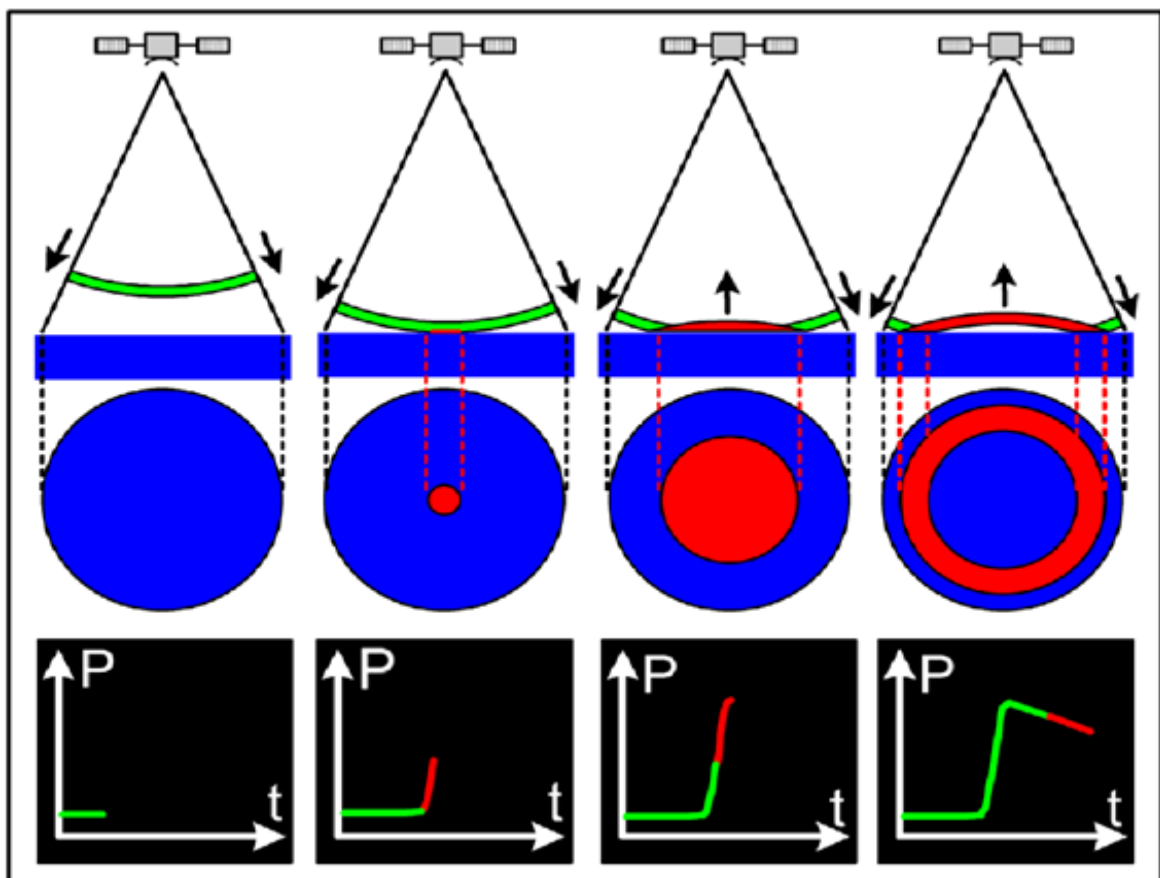


Figura 4.10 - Formação do sinal do altímetro sob uma superfície plana (Santos da Silva, 2010).

Entretanto, o processo de formação do sinal da Figura 4.10 representa uma situação ideal. Na prática, o ambiente de formação do sinal do altímetro é diferente, principalmente quando se trata de medidas realizadas sobre superfícies continentais. A Figura 4.11, mostra o processo de formação do sinal em um ambiente realista.

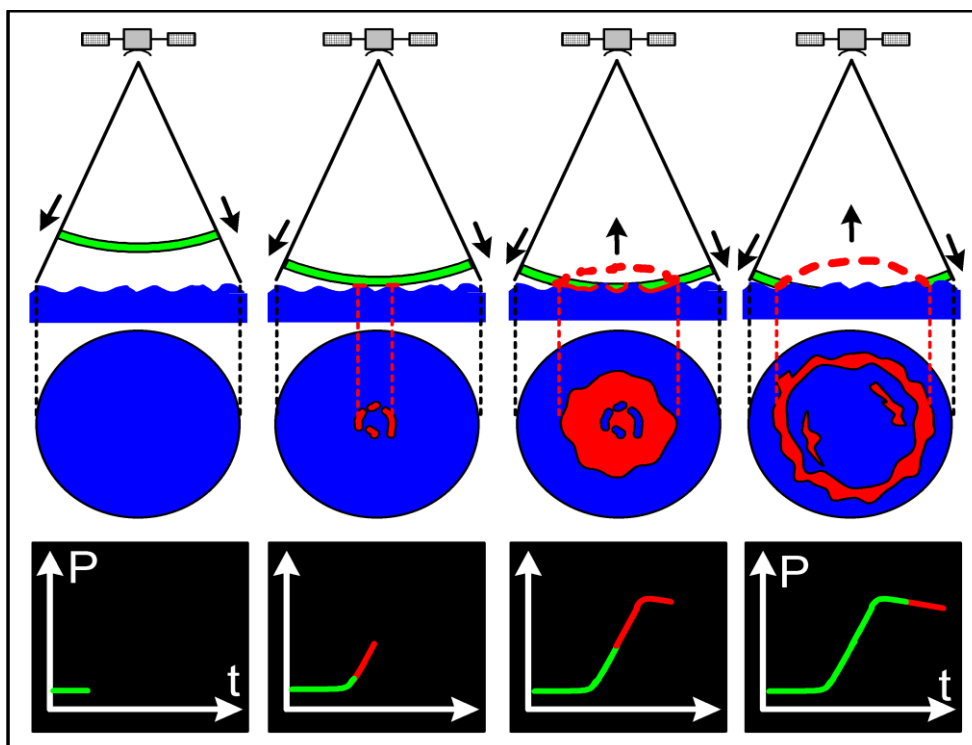


Figura 4.11 - Formação do sinal do altímetro sob uma superfície real (Santos da Silva, 2010).

Como mostra a Figura 4.11, na prática, a superfície não é plana e horizontal. Têm-se diferentes alturas geradas por cristas e depressões da superfície. Logo, a reflexão do sinal emitido pelo altímetro não é homogênea e, conseqüentemente as formas de onda (FOs) obtidas são brutas. A forma de onda consiste na representação da potência recebida pelo altímetro em função do tempo. Dessa forma, os sinais que retornam da superfície necessitam passar por tratamentos específicos para cada situação. Esses tratamentos são realizados a bordo do satélite (alinhamento), no trajeto do sinal ao solo (“*retracking*”), por meio de algoritmos e, a distância medida entre o satélite e a superfície (range) também deve ser tratada.

O processo de tratamento dos sinais refletidos pelos planos de água continentais é bastante complexo, uma vez que as formas de onda (FOs) são extremamente diversas. Sobre os corpos de água continentais, os terrenos proeminentes no interior da cobertura do altímetro geram complexos ecos de radar (FOs) sobre os quais o processo de

recuperação dessas alturas não é tão preciso como para os ecos adquiridos sobre os oceanos (Mercier e Zanife, 2006).

A Figura 4.12-b ilustra a diversidade das FOs extraídas de um segmento do traço do satélite Topex/Poseidon (T/P) nas proximidades de Manaus. As FOs da Figura 4.12-b foram adquiridas em 1998 e representam as médias das leituras discretizadas em $0,05^\circ$ de latitude ao longo do traço 63 do T/P. O gráfico apresentado em (a) representa um exemplo das formas de onda sobre superfícies oceânicas evidenciando uma similaridade elevada ao longo do traço. O eixo vertical representa as variações de energia. Os eixos horizontais representam a delimitação da área imageada pelo satélite (latitude e longitude). No caso da FO oceânica (Figura 4.12-a), costuma-se examinar um segmento de 50 km (comprimento do retângulo, ou distância entre latitudes), enquanto, para a FO não oceânica (Figura 4.12-b), o costume é avaliar um segmento de 70 km (Santos da Silva, 2009). É a altura do retângulo azul (ou distância entre longitudes) na imagem Landsat da Figura 4.12-b. O sentido das setas nos dois gráficos representa a direção de passagem do satélite.

A Figura 4.12-b representa um exemplo das formas de onda extraídas na bacia Amazônica. A imagem na esquerda da figura mostra a foz do rio Negro (águas em preto na imagem Landsat), com o rio Solimões (águas em azul na imagem Landsat). O gráfico apresentado à direita da imagem destaca a variabilidade elevada na forma de onda, o que dificulta o processo de tratamento. Assim como no gráfico apresentado em (a), o eixo vertical do gráfico em (b) representa a amplitude do sinal recebido pelo altímetro proveniente do alvo durante a passagem do satélite pelo sobre a parte interior do polígono desenhado sobre a imagem Landsat. Essa variável é dada pelo coeficiente de retrodifusão (σ_0), representado pela relação entre a potência emitida pelo radar e a potência recebida, expresso em decibel (dB). Esse coeficiente é dado pelas características da superfície.

A Figura 4.12 (a) e (b) mostra a diferença de homogeneidade entre as FOs oceânicas e as FOs não oceânicas. No gráfico (b) é possível observar o considerável deslocamento existente na parte ascendente das FOs. Essas variações de energia demonstradas na figura representam a diversidade de superfícies existentes sobre os corpos de água continentais (ilhas, meandros, zonas de inundação, etc.). Entretanto, por meio da comparação de diversas FOs ao longo do tempo, correspondentes às diversas passagens do satélite sobre um mesmo local, é possível observar as variações temporais importantes da FO ao longo do ciclo hidrológico anual. Isso significa que, unindo o conhecimento do

comportamento característico dos níveis das águas locais e a morfologia do corpo d'água nas secas e cheias com a observação das FOs geradas nesses diferentes períodos, é possível apurar o entendimento dos sinais refletidos em cada caso.

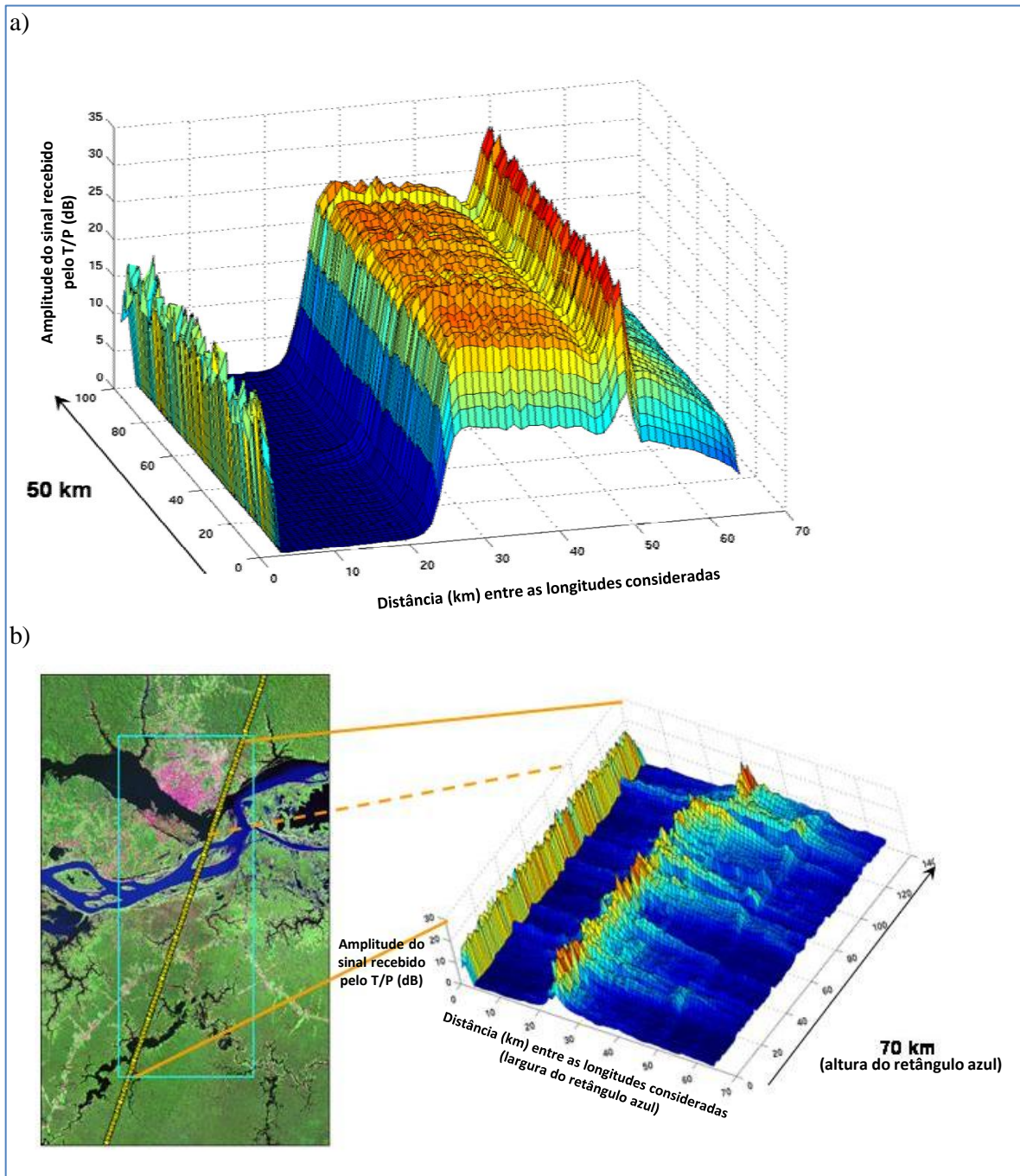


Figura 4.12 - Formas de onda sobre diferentes planos da água. Redesenhado por Mercier e Zanife (2006), (Calmant *et al.*, 2008).

Atualmente, ainda não se dispõe de um algoritmo específico para o acompanhamento das águas continentais. Os algoritmos existentes foram desenvolvidos

para os estudos dos oceanos, gelo e *icebergs*. Brown (1977) apresentou soluções para os problemas de determinação do ângulo de visada e correção dos desvios de altitude da antena do altímetro, além de tratar dos efeitos causados pela variação de topografia das superfícies. Sandwell e Smith (2005) desenvolveram o algoritmo *ocean* para retratar os dados da missão geodésica do ERS-1 em estudos dos meios oceânicos. Wingham *et al.* (1986) desenvolveram o *ice-1*, que foi aplicado por Bamber (1994) para os dados dos satélites ERS-1 e ERS-2. Legrésy e Rémy (1997) desenvolveram o *ice-2* para estudos em gelo. Os estudos de *icebergs* foram objeto da pesquisa de Laxon (1994), que desenvolveu o *sea ice*.

Em geral, as FOs obtidas nos locais com gelo são tão específicas quanto às adquiridas em águas continentais. O algoritmo *ice-1* pretende estimar as alturas das calotas polares e, mais geralmente, das superfícies continentais. Esse algoritmo é baseado no método de deslocamento do centro de gravidade (*Offset Centre of Gravity* ou *OCOG*), ou seja, busca o centro de gravidade da FO.

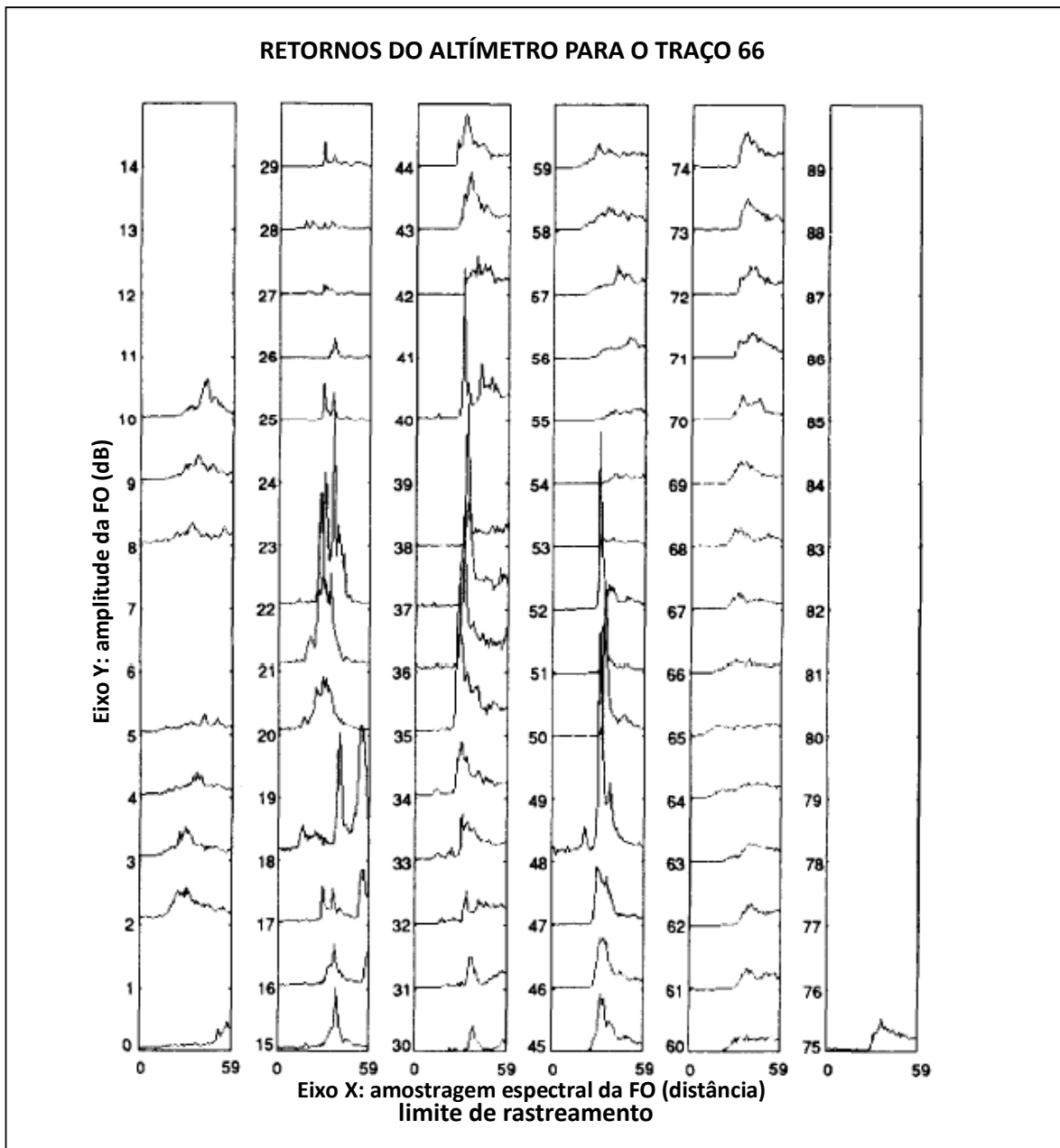
Frappart *et al.* (2006a), realizaram testes utilizando quatro algoritmos para aquisição de níveis em rios da bacia Amazônica. Segundo os autores, o *ice-1*, ainda que idealmente, não tenha sido ajustado para aplicação hidrológica, é bastante robusto para FOs obtidas nas medições altimétricas realizadas em águas continentais. Eles compararam os dados adquiridos através dos algoritmos *ocean*, *ice-1*, *ice-2* e *sea ice*. Os resultados mostraram que cada um dos quatro algoritmos forneceu estimativas realistas do nível de água. Não obstante, algumas medidas de altura derivadas do *ocean*, do *ice-2*, e do *sea ice* são claramente equivocadas, pois subestimam os níveis de água em alguns metros para latitudes maiores que 3,2° S. Situações similares foram observadas em diferentes configurações comparáveis na bacia amazônica, onde os níveis de água provenientes do *ice-1* se mostraram mais confiáveis do que as estimativas oriundas dos outros algoritmos.

Além disso, no mesmo estudo, quando os dados das estações virtuais foram comparados com os dados fornecidos pelas estações *in situ*, os autores observaram que o *ice-1* forneceu entre 8% e 15% mais dados válidos que os outros algoritmos. A dispersão foi menor com o *ice-1* do que com os demais algoritmos, tipicamente menor que 0,2 e 0,1 metros pra níveis baixos e altos, respectivamente. Em todos os casos, o *ice-1* apresentou o menor erro médio quadrático (rms) comparado com os outros algoritmos. Segundo os autores, os resultados obtidos em rios são melhores do que os obtidos em zonas inundadas

(estudos realizados na várzea do Curai, ao sul da cidade de Óbidos). Nesse estudo, o algoritmo *ice-1* parece ser o melhor arranjo para aplicações hidrológicas.

Um conjunto de FOs correspondente a um sobrevoo do traço 66 do Geosat (Koblinski *et al.*, 1993), é mostrado na Figura 4.13. O eixo vertical representa a amplitude de cada uma das FOs apresentadas (numeradas entre 0 e 75). O eixo horizontal representa a amostragem espectral de cada uma das FOs. As FOs numeradas de 0 a 10 mostram características difusas que são consistentes com os retornos adquiridos sobre o continente. As FOs 15 a 26 são retornos especulares, ou seja, os sinais refletidos são paralelos entre si. Esse tipo de retorno é observado sobre superfícies planas como corpos d'água. Após a FO 26 o sinal se torna menos forte e mais difuso na forma. Esse padrão continua até a FO 35, onde altos picos são novamente evidentes.

Os picos das FOs da Figura 4.13 ocorrem quando o rio, objeto brilhante no radar, está no interior da janela do altímetro do radar. Quando o altímetro está diretamente sobre o rio o retorno tem um pico dominante bem pronunciado como nas FOs 52 e 53. Quando existem também tributários dentro da janela, um deles pode ser visto como um pico dominante no centro da FO juntamente com diversos picos menores mais atrasados na FO, como pode ser visto nas FOs 35 a 40. Os picos progridem através da FO na medida em que o satélite flutua sobre cada tributário.



OBS.: Eixo horizontal: amostragem espectral da FO; eixo vertical: amplitude da FO; numeração (de 0 a 75) no lado esquerdo dos gráficos: ordenação das amostras de FO.

Figura 4.13 – Amostra de formas de onda (FOs) de dados reais de altímetro de uma passagem ao longo do traço 66 do Geosat sobre a estação de réguas Serrinha, no rio Negro ($0^{\circ} 27'S$, $64^{\circ}50'W$), (Koblinsky *et al.*, 1993).

O tratamento das medidas altimétricas também inclui correções na recepção e na avaliação dos dados (*tracking/retracking*). A partir dessas operações, os dados passam a representar medidas dotadas de data e posição, expressas em unidades adequadas e, passam também, a representar informação com garantia de qualidade. Após esse tratamento, os dados devem ser preparados para a sua disponibilização como registros de dados geofísicos – GDRs (*Geophysical Data Records*). Nesse momento são realizadas diversas correções relativas a erros instrumentais, erros de propagação através da atmosfera, erros causados pelas perturbações relativas à reflexão da superfície, além das correções geofísicas necessárias devido ao deslocamento da Terra em relação ao elipsoide de referência. Entre essas correções, a literatura destaca as relativas aos efeitos da ionosfera, da troposfera seca e úmida e das marés (terrestres e polares).

A correção relativa ao efeito da ionosfera busca compensar o atraso no tempo de percurso da onda do radar altimétrico devido à quantidade de elétrons presente na atmosfera. O cálculo da correção é realizado a partir da comparação entre as medidas do radar altimétrico em cada uma das duas frequências e as medidas do sistema DORIS, ou, ainda, comparando com medidas fornecidas por modelos globais. Essa correção tem ordem de grandeza variando entre 0 e 10 cm (Santos da Silva *et al.*, 2009).

A correção necessária devido aos efeitos da troposfera seca representa o atraso no tempo de percurso da onda do radar altimétrico causado pela densidade da atmosfera. O ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) possui modelos meteorológicos, desenvolvidos por Trenberth e Olson (1988), que calculam essa correção. A ordem de grandeza varia entre 2,30 m no nível do mar e 1,80 m nas demais altitudes. O efeito causado pela troposfera úmida se refere ao atraso na onda do radar causado pela água em estado líquido presente na atmosfera (Tapley *et al.*, 1982). Esse efeito é calculado a partir de medidas de radiômetro e, em domínios continentais, onde as medidas do radiômetro não são utilizáveis, o efeito é calculado por meio do modelo meteorológico do ECMWF e do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). A ordem de grandeza dessa correção varia entre 0 e 40 cm.

As marés terrestres e polares causam variações na altura da superfície terrestre em virtude da atração causada pela lua e pelo sol. As correções relativas a esse efeito são modeladas com precisão milimétrica (Cartwright e Tayler, 1971; Cartwright e Edden, 1973; Wahr, 1985).

A quantificação dos níveis de água em domínio continental exige a realização de um grande número de medidas, que são possíveis através dos avanços recentes obtidos na aquisição e no tratamento dos dados da altimetria espacial. A utilização desses dados com aplicações em hidrologia na região amazônica exigiu a exploração de várias vertentes: acompanhamento das variações de nível de água dos lagos, rios e mesmo das zonas de inundação permanentes e temporárias por altimetria espacial e radar de interferometria (Alsdorf *et al.* 2000, 2001a e 2001b; Oliveira Campos *et al.*, 2001; Mercier, 2001; Birkett *et al.*, 2002; Callede *et al.*, 2002; Alsdorf e Lettenmaier, 2003; Frappart *et al.*, 2005; Calmant e Seyler, 2006; Leon *et al.*, 2006; Calmant *et al.*, 2008); cálculo da declividade dos rios (Cudlip *et al.*, 1992; LeFavour e Asdorf, 2005; Birkett *et al.*, 2002) e estimativa dos estoques de água continentais e evapotranspiração por gravimetria espacial (Frappart *et al.*, 2006b; Schmidt *et al.*, 2006; Ramillien *et al.*, 2006).

Nos estudos citados, existem algumas limitações ao uso dos dados adquiridos, que precisam de muitos estudos metodológicos para alcançar o nível de confiança necessário para monitoramento dos níveis de água em meio continental. Entre essas limitações, destacam-se a perda da ancoragem do altímetro e a ancoragem persistente do altímetro.

O altímetro possui a bordo um instrumento que calcula o eco refletido pela superfície do plano de água. Com o objetivo de alcançar um melhor ajuste dos parâmetros aos ecos a serem recebidos, esse instrumento utiliza as informações do tratamento realizado no tempo atual e nos tempos anteriores para antecipar os ajustes a serem realizados no tempo seguinte. Nesse processo, o instrumento a bordo do altímetro ajusta a posição e a amplitude da janela de registro. A janela de registro tem amplitude constante e é centrada no instante provável de retorno do sinal. Entretanto, o instrumento de recepção do sinal estará calibrado para a potência prevista, uma vez que o eco refletido deve ocupar o máximo da janela de registro.

O problema é que essa antecipação é, particularmente, adaptada às superfícies homogêneas. Assim, um desnível importante entre o corpo d'água e suas margens, mudanças bruscas de relevo e contrastes de retrodifusão, que ocorrem na passagem brusca de um meio pouco reflexivo (planície) para um meio muito reflexivo (água), podem produzir uma saturação no sensor de captação do altímetro. A perda da ancoragem do altímetro ocorre quando o algoritmo de acompanhamento de bordo é

incapaz de adaptar os seus parâmetros de aquisição ao terreno encontrado. Segundo Calmant *et al.* (2008), onde o meio não é uniforme, o altímetro é perturbado por contrastes topográficos no interior da faixa imageada.

Uma vez não ancorado, o altímetro dá início a processos automáticos de reinicialização. Ao encontrar um terreno favorável, esses processos adaptam o instrumento às novas condições de medida (fase de aquisição). Essa adaptação necessita de 1 a 3 segundos para o satélite T/P (Fu e Cazenave, 2001).

Todo esse processo representa uma limitação no uso dos dados altimétricos, pois o satélite percorre vários quilômetros enquanto o instrumento está se adaptando. Consequentemente, muitas medidas sobre pequenas extensões de água podem ser perdidas. Esse problema foi a causa de um elevado número de dados perdidos, particularmente na missão Jason-1. Dessa forma, nos satélites ERS-1 e ERS-2, as janelas de recepção foram ampliadas em 4 vezes e, entre 4 e 16 vezes no satélite ENVISAT. Além dessa medida, o altímetro de radar Poseidon-3 foi desenvolvido para equipar a missão Jason-2.

A outra limitação destacada, a ancoragem persistente do altímetro, ou ainda, efeito *hooking* (Figura 4.14), também ocorre na passagem do satélite de um meio pouco reflexivo (planície) para um meio bastante reflexivo (água) (Nuth *et al.*, 2002 e Frappart *et al.*, 2006a). O problema tem a mesma causa da limitação anterior, porém as consequências nos dados são diferentes. O instrumento inicia a medida altimétrica da superfície reflexiva que se encontra antes do seu nadir ou, simetricamente, o instrumento continua a medir a altura de uma superfície reflexiva que cessou de sobrevoar.

Consequentemente, apesar dos perfis hidrológicos dos lagos, rios e zonas de inundação, obtidos pelo radar altimétrico serem supostamente planos ou ligeiramente inclinados devido à inclinação do plano de água, em diversos perfis obtidos, observa-se, estruturas parabólicas com concavidade para baixo. Esse efeito é produto de uma medida altimétrica alterada pelo efeito *hooking*, esquematizado na Figura 4.14, que apresenta a geometria caracterizada pela Equação 4.4.

$$R = h + \delta$$

Equação 4.4

onde,

R é a distância superestimada pelo altímetro;

h é a distância real entre o altímetro e a superfície; e

δ é o erro da estimativa.

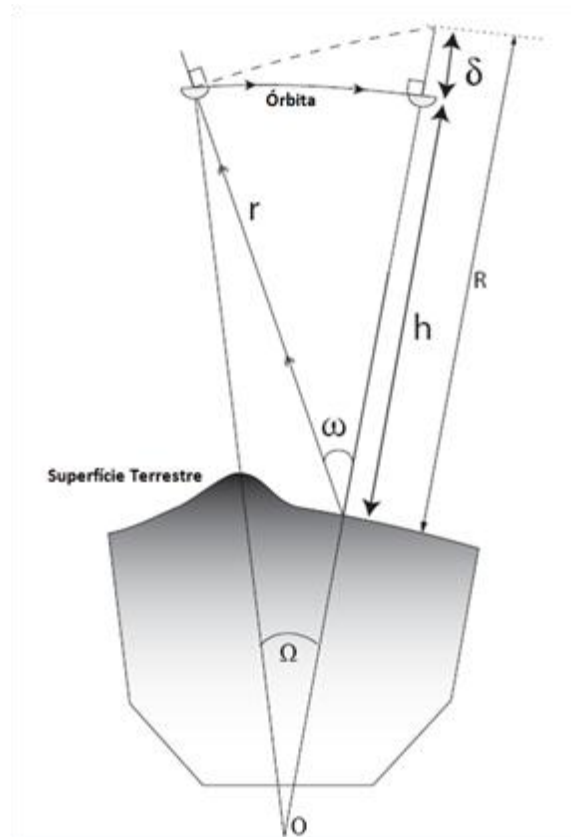


Figura 4.14 – Esquema da geometria do efeito *hooking* (Calmant, S., 2009).

A Figura 4.15 apresenta um exemplo dessa situação ocorrendo no traço 650 do satélite ENVISAT. O tempo de trajeto da onda refletida, entre o satélite e a superfície da água, e, por consequência, a medida altimétrica, são subestimados. O altímetro sobrevoa um terreno complexo, incluindo um pequeno rio, coberto de vegetação, na direção norte-sul. Assim, o instrumento adquire a medida da altura de superfície reflexiva do rio. Porém, essa medida não se encontra, ainda, em seu nadir, e, equivocadamente, o instrumento continua realizando a medida desse alvo, mesmo após passar completamente sobre ele.

A imagem apresentada em (a), na Figura 4.15, mostra a trajetória do satélite ENVISAT no sentido norte-sul, traço 650 (em azul), que cruza o Igarapé Nelson Pinheiro, recoberto por vegetação inundada, representada pelas regiões mais brilhantes da imagem JERS-1. A seleção dos dados altimétricos foi realizada através do polígono vermelho. O perfil hidrológico em formato parabólico mostrado em (b) foi medido pelo altímetro RA-2 do satélite ENVISAT. Na parte superior da figura, os círculos laranja identificam as medições realizadas nas margens do rio ou no solo, e, na parte inferior da figura, no polígono verde, aparece o efeito *hooking* nas medições. Os dados que sofreram o efeito *hooking* apresentados no polígono verde em (b) são os dados extraídos da região em amarelo mostrada em (a).

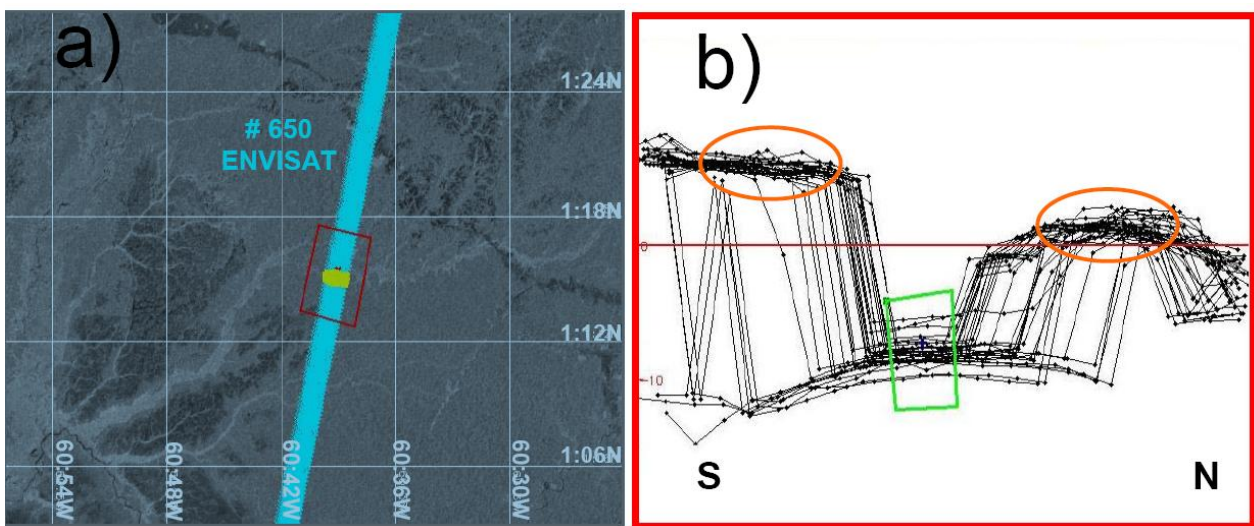


Figura 4.15 — Exemplo de ancoragem do altímetro (ENVISAT) ao longo do Igarapé Nelson Pinheiro (bacia do Rio Negro), (Santos da Silva *et al.*, 2010).

4.7 – O ALGORITMO *ICE-1*

As formas de onda (FOs) originadas pelos ecos de radar localizados em domínio continental são muito diferentes das FOs originadas sobre os oceanos. Diferentes soluções de reprocessamento das FOs foram desenvolvidas, de acordo com a natureza da superfície considerada. Tais soluções podem ser divididas em três grandes famílias: os métodos de limiar (“*thresholding*”), os métodos analíticos e o reconhecimento das formas.

O *ice-1* pretende estimar as alturas das calotas polares e, mais geralmente, das superfícies continentais. Esse algoritmo de reprocessamento pertence à família dos

métodos de limiar (“*thresholding*”), necessitando, assim, da estimativa da amplitude da FO. Essa estimativa deve ser pouco sensível ao ruído de *speckle* e às variações na forma do eco do radar. *Speckle* é conhecido como o efeito resultante da interferência de várias ondas com diferentes fases que se somam formando uma onda resultante cuja amplitude e, portanto, intensidade varia aleatoriamente. Os efeitos do ruído são reduzidos conforme o número dos pontos de amostragem da FO aumenta.

Esse algoritmo é baseado no método de deslocamento do centro de gravidade (*Offset Centre of Gravity* ou *OCOG*) desenvolvido por Wingham *et al.* (1986) e aplicado por Bamber (1994) para os dados dos satélites ERS-1 e ERS-2. O *ice-1* calcula o centro de gravidade, a amplitude e a largura de um retângulo que engloba o máximo de amostras da FO (Figura 4.16). A amplitude do retângulo é o dobro do valor do centro de gravidade. Nas Equações 4.5, 4.6 e 4.7, o quadrado do valor de cada amostra é utilizado para reduzir o efeito dos pontos de amostragem de baixa amplitude que se encontram antes e depois do limite de rastreamento (“*leading edge*”) (Wingham *et al.*, 1986).

$$\text{Centro de gravidade} = \frac{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} ny^2(n)}{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^2(n)} \quad \text{Equação 4.5}$$

$$\text{Amplitude} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^4(n)}{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^2(n)}} \quad \text{Equação 4.6}$$

$$\text{Largura} = \frac{\left(\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^2(n) \right)^2}{\sum_{n=1+aln}^{n=N-aln} y^4(n)} \quad \text{Equação 4.7}$$

Onde y é o valor do $n^{\text{ésimo}}$ ponto de amostragem e aln é o número de pontos de amostragem que pode ser afetado pela reprodução do espectro no início e no fim da FO. Considera-se um valor máximo de 25% da amplitude para determinar, por interpolação, a

posição de rastreamento nominal. O início do rastreamento será o ponto da FO em que a intensidade ultrapassar o limite de 25% da amplitude (Figura 4.16).

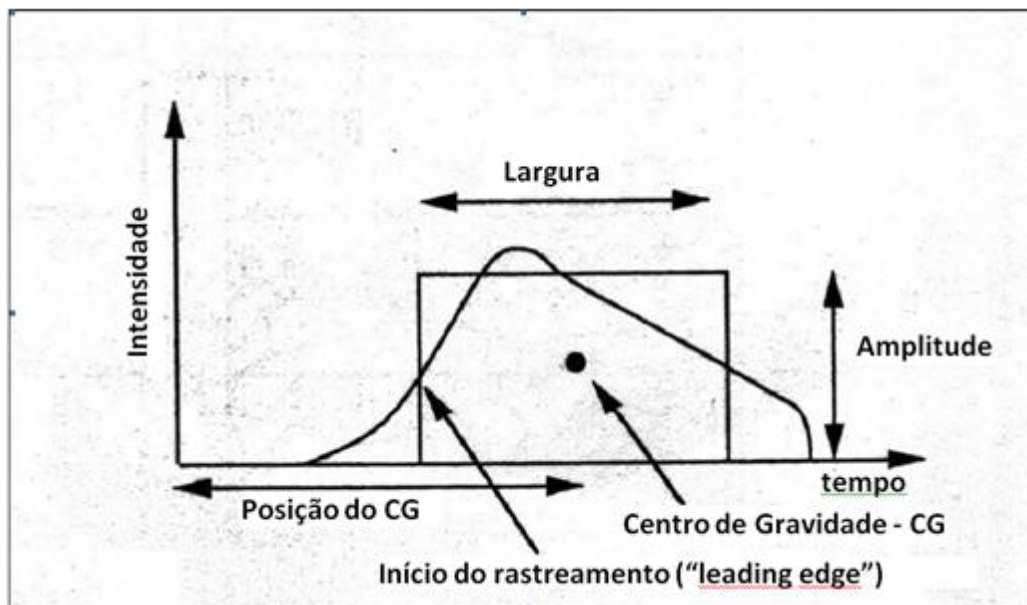


Figura 4.16 – Princípio do algoritmo *ice-1* (apresentado por Wingham *et al.*, 1986).

4.8 – LIMITAÇÕES AO USO DOS DADOS ALTIMÉTRICOS

Segundo Oliveira Campos *et al.* (2001), uma das limitações ao uso da altimetria por radar para monitorar os níveis dos rios é a grande distância entre duas medidas (*ground track resolution*). Os autores estudaram as medidas do T/P, o qual possui espaçamento mínimo das medidas ao longo da trilha de cerca de 580 metros entre cada eco do radar. Já para o ENVISAT, o espaçamento é de 350 metros entre as medidas. Isso faz com que os rios estreitos não possam ser observados. Além disso, a vegetação formada pela copa das árvores dos terrenos próximos e a presença de topografia irregular produz reflexões parasitas que deterioram os ecos do radar. Assim, diferentemente da área oceânica, a primeira tarefa é identificar as reflexões de água no sinal.

Nesse mesmo trabalho, os autores concluíram que, para estudos em águas continentais, os modelos de correção otimizados para oceanos abertos não são necessariamente adequados. Mais problemático é o fato que, sobre os continentes, algumas correções como a da troposfera úmida, podem ser simplesmente desprezadas. Esse problema, juntamente com a distância entre duas medidas (*ground resolution*), é a mais séria limitação quando se utiliza dados altimétricos para monitorar níveis de água

continentais. No estudo citado, foram aplicadas as correções de ionosfera, troposfera seca e correção contínua da maré de terra. A maré de polo, maré de oceano, carregamento da maré de oceano, barômetro invertido e polarização do estado de mar (*sea state bias*) não foram considerados, uma vez que são efeitos de oceano.

No caso da bacia Amazônica, que é extremamente plana, os problemas podem advir da interferência entre a vegetação da copa das árvores e da água das áreas alagadas, das zonas de inundação, dos tributários e do rio principal. Fora das áreas molhadas, a maioria dos ecos do radar são automaticamente rejeitados. Assim, para diferenciar as águas de superfície das terras secas, Oliveira Campos *et al.* (2001), consideraram uma série de testes para as análises de dados do T/P:

- teste de medida de densidade (*'measurement density' test*): ao longo de um dado traço do satélite, foi considerado todo o conjunto de 10 dias de passagens repetidas no período total de oito anos. Na posição média, ao longo de cada traço de medida de 1 segundo, foi contado o número total de dados válidos. Para esse propósito, os autores consideraram todas as medidas disponíveis (em intervalos de 10 dias sobre os oito anos) dentro de círculos sucessivos de 3 km de raio. Pontos (isto é, círculos), com menos de 50% das medidas válidas foram rejeitados;
- teste da flutuação do nível d'água (*'water level fluctuation' test*): sobre alguns traços selecionados, os autores construíram séries temporais de níveis da superfície durante os oito anos de tempo de extensão. Pontos com sinais claros de sazonalidade (amplitude anual de, pelo menos, 1 metro) permitem mapear corpos d'água abertos quando são interceptados pelos traços do T/P, enquanto superfícies secas ou vegetadas não exibem qualquer variação de altura sazonal detectável;
- teste do coeficiente de retorno (*'backscatter coefficient' test*): em cada local ao longo do traço, foram construídas séries temporais de coeficientes de retorno do radar maiores que 20 dB. Esse limite foi empregado a partir do trabalho de Birkett (1998) que identificou esse valor como característico dos coeficientes de retorno das FOs continentais. A partir desse princípio, foram selecionadas as áreas molhadas.

4.9 – ESTUDOS PARA VALIDAÇÃO DOS DADOS DE SATÉLITE

Segundo Birkett *et al.* (2002), a validação de um resultado altimétrico é realizada pela comparação com medidas diárias dos níveis locais obtidas a partir de uma régua bastante próxima ao traçado de passagem do satélite. Esses autores obtiveram os dados de níveis a partir de alguns locais na bacia amazônica na década de 1990. No geral, o resultado para os valores de rms, entre as estações *in situ* e o altímetro, teve uma variabilidade considerável, com uma média geral de 1,1 m. Os melhores valores obtidos ficaram entre 40 e 60 cm de rms, obtidos para os rios Amazonas, Solimões, Unini e Xingu. Em outro trabalho, Birkett (1998) analisou dados do T/P em alguns locais dos rios Amazonas e Solimões. Esses testes de validação revelaram que a precisão das séries temporais dos níveis do rio variou entre 19 e 75 cm de rms.

O valor rms (*root mean square* ou raiz da média dos quadrados), usualmente utilizado em bibliografia da área de altimetria, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável. É especialmente útil quando as variações são positivas e negativas. Portanto, sempre que mencionado, significa o desvio padrão das diferenças entre os níveis altimétricos e os níveis *in situ*.

Vários fatores podem influenciar as correlações (Birkett *et al.*, 2002). Enquanto uma medida de régua será dada para um local geográfico exato, os valores de alturas brutos do altímetro representam uma média da topografia encontrada no interior da janela do instrumento. Além disso, durante a construção das séries temporais altimétricas, são calculadas médias adicionais quando uma seção larga do traço é utilizada para maximizar o número de ecos do radar no alvo. A precisão de altura do altímetro, conseqüentemente, é baseada fortemente nesse processo de cálculo de médias sobre uma escala geográfica.

Embora o tempo de passagem do satélite seja precisamente conhecido, a maioria dos dados de níveis da rede hidrometeorológica brasileira estão disponíveis na forma de médias de duas leituras diárias (via régua ou linígrafos) realizadas às 7 horas e às 17 horas (horário local). Segundo Birkett *et al.* (2002), essa diferença no tempo se tornará mais significativa para rios com áreas de drenagem inferiores a 1.000 km² onde as cheias causam mudanças nos níveis significantes dentro de um período de 24 horas, e para os locais com histórico de fortes influências de maré. A distância entre a localização da estação fluviométrica e a passagem do satélite também será importante considerando a

influência de tributários afluentes e as rápidas mudanças na hidrologia em função da distância a rios menores.

Oliveira Campos *et al.* (2001), validaram as séries temporais do satélite T/P através de duas metodologias: (1) comparação das séries temporais de níveis d'água próximas a um ponto de cruzamento entre perfis ascendentes e descendentes, e (2) comparação com dados de níveis de água fixos oriundos de estações fluviométricas.

A comparação cruzada entre perfis ascendentes e descendentes é um método clássico para estimar a precisão interna de alturas altimétricas sobre a superfície dos oceanos. Essa comparação cruzada é realizada através da análise de dados adquiridos por dois traços do satélite que se cruzam em suas trajetórias ascendentes e descendentes. Assim, é possível validar os dados adquiridos a partir da comparação entre medidas do mesmo satélite, adquiridas em locais bastante próximos. Por isso diz-se que esse é um método clássico para estimar a precisão interna das medidas. Entretanto, deve ser ressaltado que, no caso do T/P, as medidas de perfis ascendentes e descendentes ocorrem com 1 a 5 dias de intervalo de tempo (*lag time*) e o nível de água do rio sofreu alterações entre essas duas medidas.

A aplicação do método aos dados do T/P na bacia Amazônica requer que o cruzamento seja localizado sobre uma superfície molhada. No trabalho de Oliveira Campos *et al.* (2001), um único cruzamento atinge, aproximadamente, essa condição, localizado nas proximidades do rio Japurá. Não está localizado exatamente sobre o rio, mas cerca de 10 km ao norte, em terra. Assim, os autores decidiram comparar as séries temporais de níveis de água em locais onde os dois traços do T/P cruzam o rio (distante cerca de 15 km). As duas séries temporais de medidas de nível de água se sobrepuseram completamente bem. Entretanto o rms calculado para todos os 134 dados comuns medidos foi de 82 cm.

Essa diferença rms pode ser interpretada como o erro médio das medidas instantâneas nessa seção do rio Japurá, no qual o maior valor é devido, provavelmente, à largura estreita do rio (500 m). Para extensões de tempo mais longas, o erro médio será menor. Se rodado através de uma média corrida de 150 dias, a diferença das séries temporais teria certamente um rms menor, de 55 cm.

A comparação da medida *in situ*, realizada por Oliveira Campos *et al.* (2001), usou dados da rede permanente de mais de 200 estações fluviométricas

administrada, na época, pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) ao longo do rio principal e tributários da bacia Amazônica desde o início dos anos 70. As medidas de régua dos níveis são relacionadas a alguma referência arbitrária, enquanto as medidas do T/P são relativas ao elipsoide. Os autores desenvolveram dois métodos para comparar as medidas brutas do T/P (a cada 10 dias) com as medidas das estações fluviométricas (todos os dias). O primeiro método consistiu em remover de cada série temporal a sua média dos oito anos e então comparar a média zero (*'zero mean'*) do T/P resultante e as séries temporais *in situ*. Esse método apresentou dois inconvenientes: a densidade das medidas do T/P é maior durante o período de cotas altas do que durante o período de cotas baixas, a qual leva a uma superestimação no nível de água médio dado pelo T/P. Além disso, a estação fluviométrica pode estar longe da interseção do traço, resultando em uma diferença na amplitude do sinal (flutuação anual do nível de água).

Um segundo método foi desenvolvido para minimizar esses inconvenientes: reconstruir uma série temporal *'in situ'* contínua de níveis de água no traço do T/P utilizando regressão linear entre as medidas do T/P e a estação fluviométrica selecionada. Isso permitiu aos autores comparar séries brutas do T/P com séries *in situ* reconstruídas. Para ambos os métodos, o rms entre as medidas do T/P e as séries *in situ* (observadas e reconstruídas) quantificam a dispersão das medidas do T/P e podem ser interpretadas como a precisão das medidas do altímetro.

Koblinsky *et al.* (1993), direcionaram seu estudo na comparação entre séries temporais de alturas altimétricas estimadas dos níveis dos rios com estimativas de estações convencionais fluviométricas. As comparações foram realizadas entre as medidas altimétricas e as observações das estações convencionais de régua para o período entre novembro de 1986 e dezembro de 1988. Foram selecionados locais onde as medidas do Geosat foram realizadas com uma distância de 5 km da estação de régua. Os autores encontraram quatro traços do Geosat cruzando diretamente sobre as estações *in situ*, nessa região; Serrinha, no rio Negro; Novo Aripuanã, no rio Madeira; Careiro, no rio Paraná; e Manaus, no rio Negro.

Nesse estudo, o nível médio da estação fluviométrica (estação *in situ*) foi adicionado às séries temporais de medidas do altímetro, o qual tem uma média zero. A medida de ajuste de cada local entre as medidas do nível do rio dada pela estação de régua e pelo altímetro é dada pelo rms (desvio padrão da diferença). Esses valores variaram de

0,19 m para o traço 238 do Geosat em Manaus até 1,09 m para o traço 131 em Novo Aripuanã. As variações de alturas altimétricas foram consistentes com as alterações do nível do rio. Os autores observaram que o nível do rio superou os 12 m em Novo Aripuanã e superou os 5 m em Serrinha durante o período de dois anos analisado, e a altimetria refletiu essas variações. Conseqüentemente, a razão sinal/ruído das medidas do altímetro nessas regiões foi superior a 10.

Assim, os resultados desse trabalho sugeriram que os altímetros de radar podem ser praticáveis para realizar estimativas de rotina dos níveis de rios com uma precisão da ordem de 10 cm de rms. Também deve ser considerado que as diferenças entre as estimativas de altímetro e as medidas de nível *in situ* não podem ser necessariamente atribuídas a uma falta de precisão nas estimativas do altímetro. As medidas de nível *in situ* também são sujeitas a erro. As magnitudes dos erros de medidas dos níveis *in situ* raramente podem ser determinadas.

Uma ideia geral da confiabilidade das medidas de nível *in situ* foi dada por uma análise de medidas duplicadas de níveis de água em locais da Lagoa dos Patos, uma lagoa longa (300 km) e estreita (50 a 80 km) no sul do Brasil. Como a Amazônia, a lagoa é uma importante hidrovia, e tem sido intensamente estudada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e outras instituições de pesquisa ligadas a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e outras universidades do estado. Em relação à dimensão, acessibilidade, disponibilidade de observadores treinados, e suporte técnico para equipamentos, a Lagoa dos Patos não é diferente de algumas partes da rede hidrométrica da Amazônia, apesar de que, na Amazônia, as dificuldades devidas a esses fatores são consideravelmente mais graves.

O estudo foi realizado em dois locais: Rio Grande (próximo ao ponto onde a lagoa deságua no Atlântico) e Arambaré (na metade do caminho, subindo em direção à costa oeste da lagoa). Esses locais foram escolhidos por estarem equipados com uma estação fluviométrica convencional (estação de réguas) juntamente com uma estação linimétrica. Segundo as conclusões do estudo, os autores sugeriram que é inapropriado considerar que as medidas de nível de água *in situ*, necessariamente representam a “verdade” (Koblinsky *et al.*, 1993). Enquanto a análise não indica se os registros do linígrafo, quando eles existem, são “mais verdadeiros” que as leituras das réguas, ou o contrário, este sugere que as leituras de níveis realizadas em solo podem, por si só, estar

sujeitas a erros da ordem de ± 10 cm, ou talvez mais. Assim, é preciso ter em mente a existência de tais erros quando as variações de níveis de água estimados pelo altímetro são comparadas com as medidas de níveis de água registradas em solo.

Roux *et al.* (2010), avaliaram alguns métodos utilizados para gerar séries de níveis de água de rios a partir de dados de altimetria por satélite. Foi proposta uma metodologia para obtenção de séries temporais com período de amostragem diário. O método foi baseado em um modelo linear para exploração de dados de um número limitado de estações linimétricas.

Os autores avaliaram metodologias para trabalhar com o problema da limitação da resolução das séries temporais altimétricas, definida pelo ciclo dos satélites, que pode variar entre 10 e 35 dias. Esse limitante impossibilita o estudo de eventos de curto prazo e impede o registro preciso do nível atingido nos períodos de cheias e secas. Assim, o trabalho propôs um método de interpolação para fornecer dados altimétricos diários oriundos de estações virtuais utilizando informações de estações linimétricas adjacentes, referidas como estações de referência. O método foi baseado em um modelo linear. Três parâmetros para os procedimentos de estimação, isto é, os métodos de mínimos quadrados e mínimos quadrados ponderados e uma técnica de otimização multi-objetivo, foram avaliados.

Foi explorado o montante máximo de informação e conhecimento disponível no fenômeno a ser estimado, isto é, as alturas de água diárias em uma estação virtual, sem necessitarem de expressões matemáticas referentes ao conhecimento prévio. Particularmente para esse estudo, as séries diárias estavam disponíveis para as estações *in situ*. Eles consideraram que esses dados e as séries temporais altimétricas fornecidas pelo satélite continham grande parte da informação prévia necessária para a interpolação confiável dos dados altimétricos. Assim, não foi preciso definir expressões matemáticas para dados e/ou propriedades do modelo, como a covariância espaço-temporal de interpolações residuais (Tarantola e Valette, 1982) e foi possível adotar um ponto de vista empírico.

De fato, Roux *et al.* (2010) não definiram uma expressão matemática de espectro das séries temporais interpoladas. Eles construíram completamente esse espectro utilizando as séries temporais disponíveis nas estações *in situ*. Mais ainda, ao invés de confinar a solução projetando interativamente funções candidatas nos arranjos, eles

definiram funções de custo que integraram esses controles. Essas funções de custo foram, então, minimizadas por métodos clássicos, isto é, mínimos quadrados, mínimos quadrados ponderados e um algoritmo baseado no gradiente.

A metodologia proposta foi aplicada para simular dados altimétricos derivados dos registros *in situ* completos, permitindo uma avaliação quantitativa e absoluta. A sensibilidade do método para modelar a estrutura, para falhas de dados (intervalos nas séries temporais altimétricas) e para ruídos aleatórios, foi estudada. Então, a aplicação do método para séries temporais altimétricas “reais” foi analisada.

Assim, a avaliação do modelo descrito acima, mostrou que os melhores resultados são obtidos: (i) considerando mais informações pelo envolvimento de diversas estações de referência *in situ*; (ii) considerando estruturas de modelo de ordem não zero (*non-zero-order model*), isto é, definindo deslocamentos de tempo no modelo (e, assim, especialmente para estações distantes); e, (iii) aplicando o procedimento de otimização que pareceu ser mais preciso e robusto que os métodos dos mínimos quadrados e mínimos quadrados ponderados.



Figura 5.2 – Imagem e dados da bacia Amazônica (Monteiro, 2009).

A variabilidade do nível de água do rio Amazonas, tributários e zonas alagadas é dominada pelo ciclo anual. Essa variabilidade sazonal é guiada, principalmente, pela variação anual da precipitação, ligada à variação da circulação atmosférica sobre a América do Sul (Rao *et al.*, 1996). Os padrões de precipitação sobre a bacia Amazônica exibem fortes variações de ano a ano (Costa e Foley, 1999 e Marengo *et al.*, 1998). A vazão dos rios é, principalmente, o resultado da precipitação e da evaporação, sendo que a precipitação é o componente dominante (Costa e Foley, 1999), apesar das relações entre escoamento (runoff) e precipitação serem complicadas pelos “efeitos de memória da bacia” em grandes bacias de captação, como a bacia Amazônica (Richey *et al.*, 1989). Assim, a variabilidade da precipitação sobre a bacia Amazônica causa mudanças nos níveis de água da superfície e na descarga dos rios.

O fluxo de vapor d`água sobre a bacia Amazônica é predominantemente originado no oceano Atlântico equatorial. Entretanto, segundo Oliveira Campos *et al.* (2001), alguns estudos têm reportado que a variabilidade interanual predominante nos parâmetros hidrográficos, nível d`água e vazão, na bacia Amazônica, principalmente no norte da bacia, está relacionada a eventos El Niño. Certamente, na maioria das partes da bacia, os anos El Niño deram ascensão à escassez de precipitação e reduziu as descargas. A

única exceção é a bacia do Madeira, localizada no sudoeste da bacia Amazônica, que mostra um comportamento contrário, isto é, excesso de chuva durante os anos El Niño (Molinier *et al.*, 1999).

A bacia hidrográfica Amazônica estende-se por sete países, drenando uma superfície de 37% da América do Sul assim discriminada: Brasil (63%), Peru (17%), Bolívia (11%), Colômbia (5,8%), Equador (2,2%), Venezuela (0,7%) e Guiana (0,3%), totalizando 6.112.000 km² (Guyot *et al.* 1993). A bacia limita-se a oeste e a sudoeste, pela cordilheira dos Andes, a norte, pelo escudo das Guianas e a leste e sudeste, pelo escudo brasileiro.

O rio Amazonas nasce sob a denominação Ucayali nos Andes peruanos a uma altitude de 4.000 m. Ainda no Peru, após a confluência com o rio Marañon, passa a ser chamado de Amazonas. Ao ingressar em território brasileiro, é chamado de Solimões e recebe afluentes, em sua margem esquerda, que nascem na Colômbia (rios Içá, Japurá e Negro), e, em sua margem direita, que nascem no Peru (rios Juruá e Purus) e na Bolívia (rio Madeira). Após a confluência com o rio Negro em Manaus, o Solimões volta a se chamar Amazonas. Outros importantes afluentes de sua margem direita são os rios Trombetas, Tapajós e Xingu, cujas bacias estão completamente inseridas em solo brasileiro. Embora motivo de controvérsias, pesquisas recentes demonstram que a extensão total do Amazonas é de 6.868 km, o que o coloca como maior rio do mundo, também, em extensão, superando o rio Nilo na África (Santos da Silva *et al.*, 2010).

Estudos preliminares foram realizados na sub-bacia do rio Madeira. O rio Madeira é o maior tributário do rio Amazonas. Sua sub-bacia corresponde, em área, a 23% da bacia Amazônica, capta 18% da precipitação de chuvas e contribui com 15% do volume de água do rio Amazonas. A Figura 5.3 apresenta a área de estudo, os traços do satélite ENVISAT e as estações fluviométricas selecionadas.

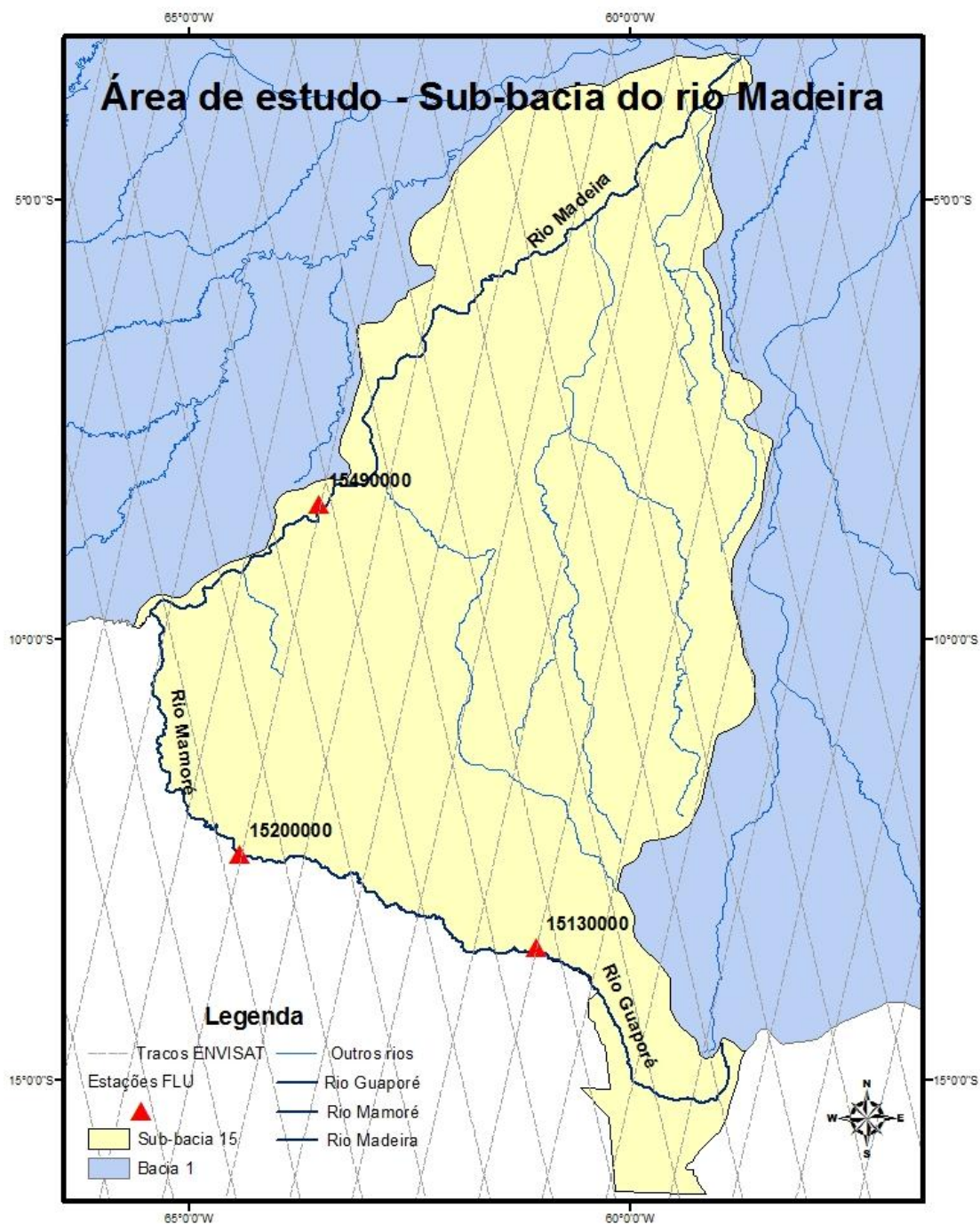


Figura 5.3 – Localização dos traços do ENVISAT e das estações fluviométricas na área de estudo (modificado de ANA, 2013).

A captação de água da bacia do rio Madeira é atípica em relação às demais bacias hidrográficas da Amazônia. Seus afluentes são de pequena importância quanto à descarga hídrica, constituindo, apenas, 25% do total de seu volume de água. Conseqüentemente, o seu regime hídrico é discordante com o do sistema Solimões/Amazonas, estando seu regime de cheia e vazante relacionado com o clima da região Andina do leste da Bolívia.

Em consequência de um clima muito particular da região sul Amazônica, na qual somente duas estações climáticas são bem definidas (verão e inverno), há um período em que as precipitações pluviométricas diminuem, interferindo no rebaixamento do nível das águas fluviais. Esse fenômeno coloca em evidência inúmeras ilhas ao longo do rio Madeira, normalmente constituídas de bancos de areia e afloramentos de variados tipos de rocha.

O rio Madeira nasce da confluência dos rios Mamoré e Beni, a jusante da cidade de Guajará-Mirim, na zona de fronteira internacional do Brasil com a Bolívia e, após drenar toda a parte leste do Bolívia, norte e oeste do estado de Rondônia e sul do estado do Amazonas, em um percurso em torno de 1.450 km, deságua na margem direita do rio Amazonas, 27 km a montante de Itacoatiara, que fica situada na margem esquerda do mesmo rio. Desde a sua nascente até a cidade de Porto Velho, o curso do rio Madeira é imposto sobre rochas pré-cambrianas. Daí, até a sua foz no rio Amazonas, o caudal atravessa, apenas, áreas sedimentares da formação Alter do Chão (65 a 60 milhões de anos) e a formação Solimões (2,6 a 2,4 milhões de anos). Quando corta o ambiente geológico do pré-cambriano, o rio apresenta segmentos encaixados estruturalmente, resultando em desníveis altimétricos de suas margens e afloramentos ao longo do percurso. Nesses terrenos, um elevado número de cachoeiras e corredeiras marca pequena ruptura de declive no leito do Madeira. Ao penetrar na área de sedimentos (formações Alter do Chão e Solimões) o rio não mais apresenta cachoeiras nem corredeiras, porém, continua com o mesmo aspecto de encaixamento de leito do trecho anterior (AHIMOC, 2003).

Por meio da análise da localização dos traços do satélite sobre a bacia, foram selecionados previamente alguns pontos de estudo onde os traços cruzam o rio principal e estão a menos de 10 km a montante ou a jusante de uma estação fluviométrica. Seguindo esses critérios foram encontrados três locais na sub-bacia do rio Madeira.

6 - MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 – FONTE DOS DADOS ALTIMÉTRICOS

A base de dados utilizada para os estudos que serão apresentados nesse trabalho foi criada no LEGOS (*Laboratoire d'Études en Geophysique et Océanographie Spatiales*), em Toulouse, França, como parte da estrutura do projeto CASH (*Contribution of Spatial Altimetry to Hydrology*), fundado pelo Ministério Francês de Pesquisa e Tecnologia. Esse projeto coletou observações em rios (cerca de 200 pontos) e lagos (cerca de 150 pontos) no mundo, principalmente provenientes do satélite Topex/Poseidon (T/P).

O trabalho proposto será executado com a utilização dos dados obtidos por meio do satélite ENVISAT. O passo de tempo das séries altimétricas é dado pelo período de repetição da órbita. No caso do ENVISAT, esse período é de 35 dias.

6.2 - EXTRAÇÃO GEOGRÁFICA DAS MEDIDAS ALTIMÉTRICAS

Os dados altimétricos aqui apresentados são provenientes da missão altimétrica ENVISAT, obtidos entre as coordenadas geográficas 65°W a 60°W e 8°S a 14°S, sendo extraídos da base de dados do CTOH (*Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère*) do LEGOS. O fluxo de geração desses dados pode ser visualizado pelo esquema da Figura 6.1. Algumas características da missão e dos dados estão resumidas na Tabela 6.1.

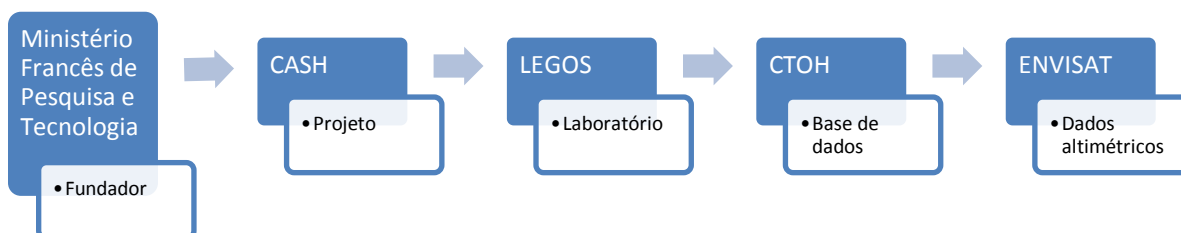


Figura 6.1 – Estrutura operacional de geração dos dados altimétricos (desenhado pelo autor).

Tabela 6.1 – Características da missão altimétrica utilizada (AVISO, 2008).

Missão	ENVISAT
Vocação	Análise ambiental e alterações climáticas
Disponibilidade de dados (período)	09/2002 – atualmente
Traços	2
Ciclos	56
Altitude	785 km
Inclinação da órbita	98,5°
Distância intertraço ao Equador	80 km
Período de revisita	35 dias
Algoritmo das formas de onda	<i>ice-1</i>
Frequência de medidas / Distância entre duas medidas	20 Hz / 350 m

Para o satélite ENVISAT, extraíram-se dois traços, totalizando 56 ciclos entre 15/09/2002 e 27/02/2008.

O termo “traço” do satélite (“*ground-track*”) se refere à projeção de meia órbita do satélite no solo, entre a latitude mais ao norte e a latitude mais ao sul da trajetória. Cada revolução do satélite ao redor da Terra corresponde a dois traços. Para cada satélite, o espaçamento entre as passagens é diferente, assim como cada satélite possui diferentes altitudes e inclinação da órbita. Todos os traços dos satélites tem uma numeração que os identifica segundo sua localização na superfície terrestre. Por exemplo, na dissertação aqui apresentada, serão utilizados os traços 478 e 192 do satélite ENVISAT, que são dois locais de passagem do satélite sobre a bacia hidrográfica do rio Madeira. Já o ciclo se refere a cada uma das passagens do satélite sobre um mesmo local, adquirindo dados sob um mesmo traço. Assim, cada ciclo tem os dados adquiridos em intervalos fixos de tempo, chamados períodos de revisita. Nesse estudo, por exemplo, serão usados 56 ciclos do satélite ENVISAT divididos entre os traços 478 e 192.

6.3 – ESTAÇÕES VIRTUAIS

Sempre que um traço do satélite cruza um plano de água, tem-se uma potencial estação virtual. Uma estação virtual é definida pelos pontos de medições altimétricas utilizados para o cálculo dos níveis. A estação virtual representa uma janela retangular. Em cada uma dessas janelas, é possível obter uma série temporal dos níveis de água.

As séries temporais são geradas por meio da seleção da informação referente aos dados altimétricos adquiridos pelo satélite dentro da janela de interesse. Isso significa dizer que, dentro do conjunto de dados adquiridos por um traço do satélite em seus diversos ciclos, é possível escolher, a partir da localização da área de interesse, apenas os dados referentes aos níveis de água dessa área. Nesse estudo, a seleção dos dados é realizada através do programa VALS (*Virtual ALtimetry Station*), que identifica os pontos dentro da área de interesse e apresenta seus respectivos valores de níveis em cada tempo. O VALS é um programa disponibilizado através do endereço eletrônico do IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*). O programa utiliza o aplicativo *Java Web Start* para possibilitar a sua distribuição.

O VALS é composto por rotinas desenvolvidas e incorporadas ao programa GRASS GIS 6.2.1 que permitem a seleção tridimensional dos dados em um espaço superfície-profundidade. Essa metodologia é descrita detalhadamente em Roux *et al.* (2010) e Seyler *et al.* (2008).

Basicamente, uma estação virtual pode ser definida como qualquer interseção entre a superfície de um corpo d'água e um traço de satélite. A Figura 6.2 mostra um cruzamento entre os traços de dois satélites: ENVISAT (traço amarelo) e Topex Poseidon/Jason 2 (traço vermelho), sobre o rio Danúbio. O cruzamento está localizado próximo a um meandro do rio Danúbio o que faz com que os traços passem duas vezes sobre o rio em seções bastante próximas. Essas seções representam duas estações virtuais para as quais serão extraídos os dados dos dois satélites, ENVISAT e Topex Poseidon/Jason 2.

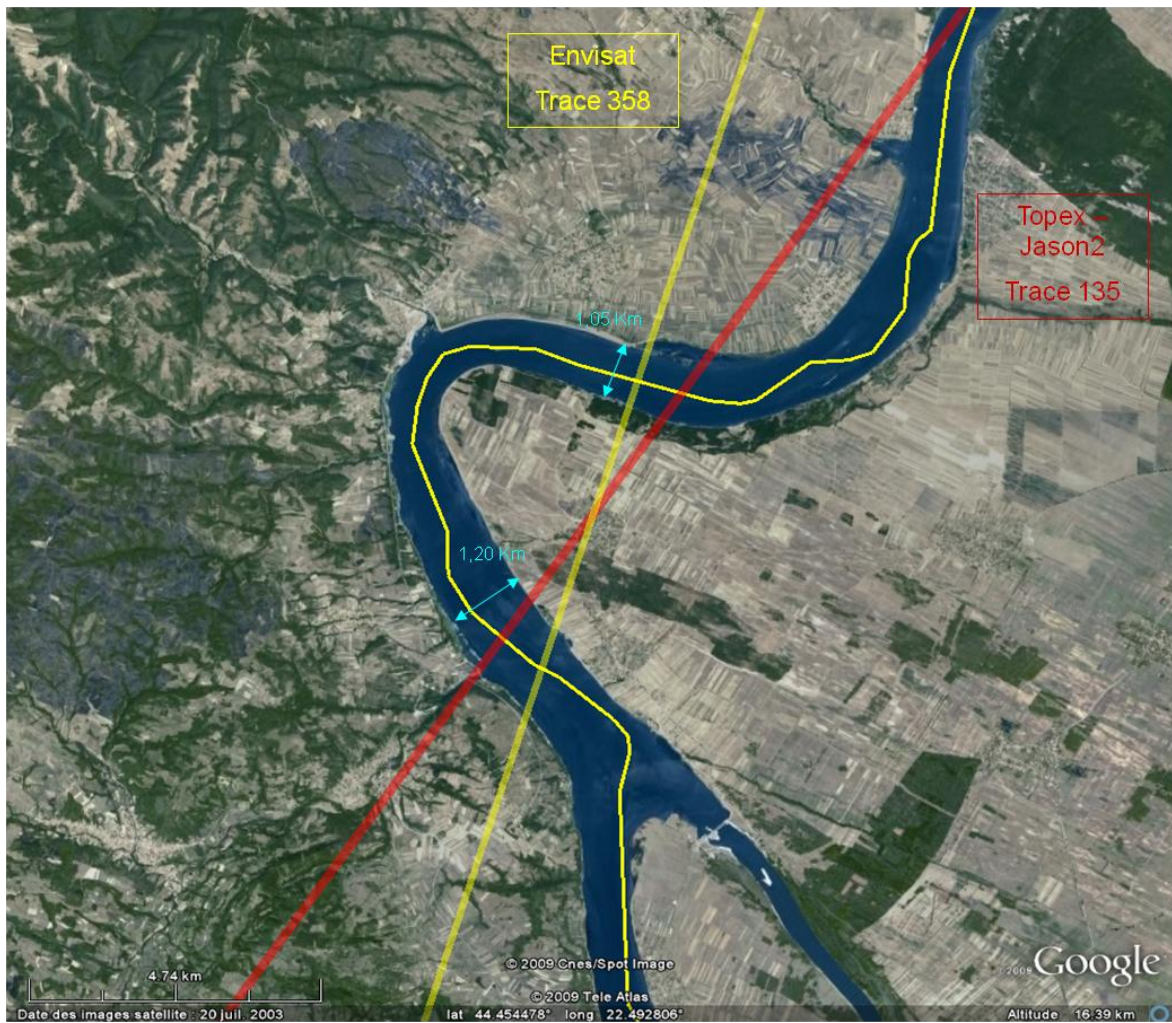


Figura 6.2 – Determinação de estações virtuais no Rio Danúbio, na fronteira entre Servia e Romênia (Perrot, 2009).

A definição da área de estudo é realizada utilizando o programa *Google Earth*, programa de domínio público que permite, por meio de um globo virtual, visualizar imagens, mapas, terrenos, etc., via satélite. O primeiro passo a ser tomado é a projeção das trajetórias do satélite sobre a superfície da Terra que será estudada, ou seja, sobre a área de estudo. Para cada missão de observação altimétrica, o mapeamento das trajetórias é realizado por meio do acesso aos sites específicos de cada missão. Os arquivos são disponibilizados em formato reconhecido pelo *Google Earth*. No caso do ENVISAT, a trajetória é disponibilizada no site <http://www.aviso.oceanobs.com/fr/donnees/boite-a-outils/localiser-une-demi-orbite/index.html>.

Com as trajetórias do satélite sobre a região de estudo é possível delimitar uma área geográfica em torno da interseção de interesse (traço + superfície) e definir uma direção principal de escoamento do fluxo de água na área de interseção. A delimitação da área é feita a partir do desenho de um polígono ao redor da interseção. O desenho do

polígono deve considerar alguns princípios. A largura do polígono deve ser de alguns quilômetros para levar em conta o deslocamento da interseção entre um ciclo e outro (o satélite nunca passa exatamente na mesma trajetória em ciclos diferentes). Isso para não omitir nenhum ciclo já concluído ou não. Além disso, o polígono não deve ser limitado às margens do rio para poder selecionar medições altimétricas em período de cheias.

A direção do rio deve ser informada para que os traços sejam projetados na direção perpendicular ao escoamento. Isso é feito pelo desenho de uma linha sobre o rio na direção de montante a jusante (Figura 6.3).

Em relação à precisão das coordenadas calculadas pelo *Google Earth* é preciso considerar que as imagens fornecidas pelo programa são atualizadas regularmente conforme a área imageada. As imagens fornecidas são formadas por mosaicos, de forma que na mesma imagem selecionada para estudo é possível existir diferentes datas de aquisição e também diferentes precisões de coordenadas. Assim, nesse estudo, a precisão das coordenadas fornecidas pelo *Google Earth* está estimada em ± 10 metros. Esse valor de precisão foi obtido pela CPRM, de forma prática, a partir da aquisição de coordenadas em campo, nas áreas estudadas, e da plotagem dessas coordenadas sobre a imagem do *Google*.

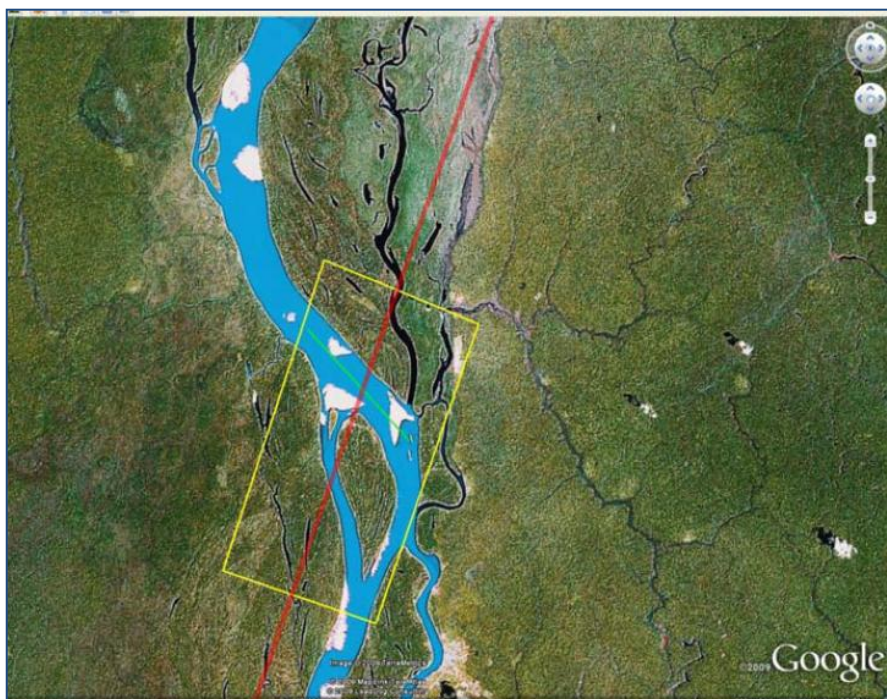


Figura 6.3 – Projeção sobre a área de estudo (imagem do *Google Earth*) do traço do satélite (vermelho) sobre o rio, delimitação do polígono (amarelo) e desenho da linha que define a direção do rio (verde) (programa VALS versão 0.6.2).

Uma vez preparada a área a ser estudada é preciso definir os dados para processamento pelo VALS. Antes de utilizar as principais funções de VALS, os dados a serem processados precisam ser importados numa base de dados onde serão hierarquizados de acordo com as exigências do aplicativo. Um usuário pode definir várias bases de dados para separar estudos diferentes, por exemplo. Dados altimétricos brutos provenientes de várias fontes podem ser processados pelo VALS.

A fase de preparação consiste em adquirir os arquivos de dados junto às entidades adequadas, sendo que a forma de disponibilização pode ser diferente de uma missão para outra. Os arquivos serão importados numa base de dados local do VALS que possui várias funções de importação, cada qual adaptada ao tipo de arquivo a ser importado.

Depois de escolher uma área de estudo e ter importado, numa base local, os dados altimétricos que se encontram na área de estudo (traços que interceptam o polígono), torna-se possível analisar os dados altimétricos para definir uma estação virtual e extrair uma série cronológica de cotas.

Após importados, os dados são visualizados em três janelas (Figura 6.4):

- a primeira (janela 1) deve ser utilizada pelo usuário para informar metadados a respeito da estação virtual (nome, código, bacia, rio, satélite, *retracking* utilizado, etc.). Grande parte dessas informações deve ser fornecida pelo usuário antes de salvar os resultados;
- a segunda janela (janela 2) apresenta um gráfico de todas as medições altimétricas encontradas na área de estudo e será utilizada para selecionar as medições que vão ser utilizadas para definir a estação virtual;
- a terceira (janela 3) visualiza a posição georeferenciada das medições encontradas, ou melhor, a posição (latitude/longitude) do satélite no momento da medição.

1

2

3

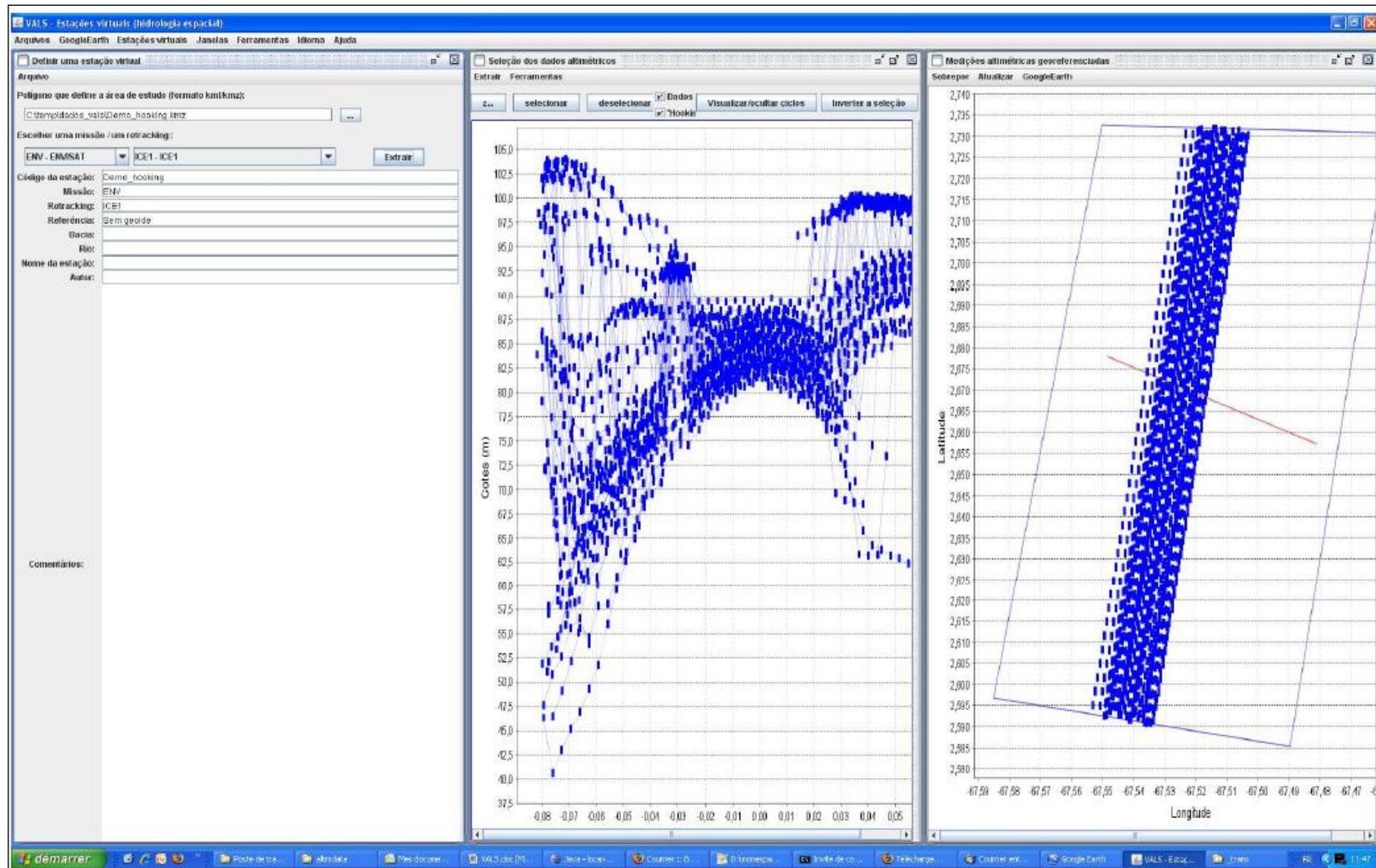


Figura 6.4 - Três janelas visualizadas após a importação dos dados altimétricos no VALS (programa VALS versão 0.6.2).

Para uma dada estação virtual, o período de amostragem das séries temporais de níveis d'água é definido pelo período de repetição do ciclo do satélite. Esse ciclo varia de 10 a 35 dias, dependendo do satélite.

A baixa resolução temporal é considerada um dos maiores inconvenientes do uso do satélite para estudo das superfícies de água continentais (Calmant e Seyler, 2006). Entretanto, essa resolução não representa uma perda de informações muito significativa tratando-se da região amazônica. Ainda que se considere a grande amplitude dos níveis, a velocidade de variação, em termos gerais, possui inércia provocada pela grande área das seções. Tal limitação não permite o estudo de eventos de curto prazo, ou ainda, o registro preciso do nível de água em períodos de águas altas e baixas.

Em relação à baixa resolução temporal fornecida pelo altímetro, ou seja, registros de níveis a cada 35 dias, a Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7, apresentam os cotogramas das estações fluviométricas Pimenteiras (15130000), Príncipe da Beira (15200000) e Prosperidade (15490000), respectivamente. Nos cotogramas das estações é possível verificar que os ciclos de máximas e mínimas são anuais. Dessa forma, a comparação entre dados com intervalo de 35 dias pode ser realizada uma vez que o objetivo é analisar os dados ao longo da série histórica e não analisar, especificamente, o registro de dados pelo altímetro nos níveis máximos e mínimos.

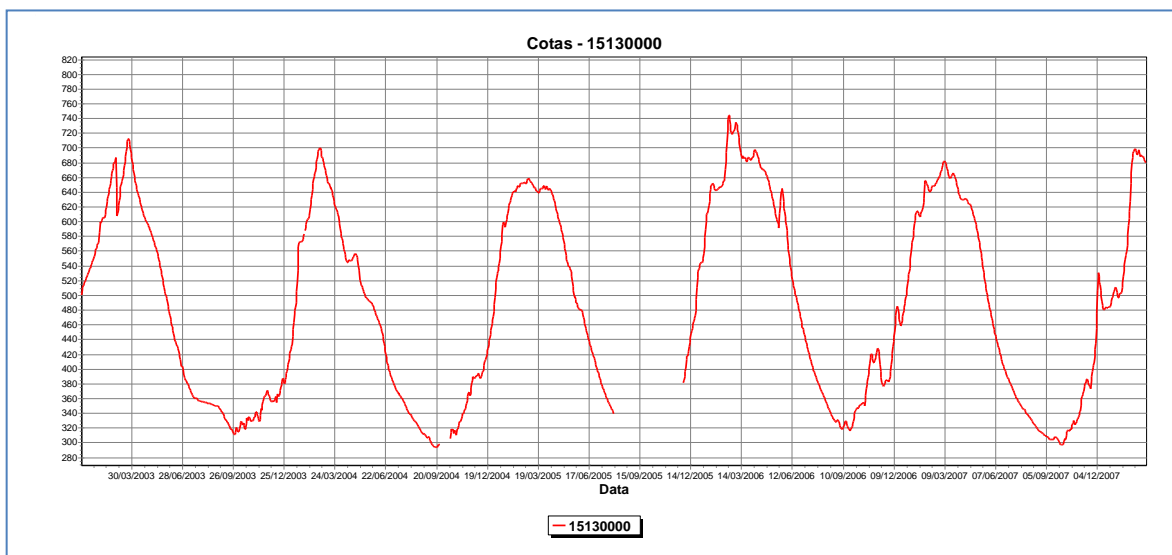


Figura 6.5 – Cotograma da estação fluviométrica Pimenteiras (15130000).

O cotograma apresentado na Figura 6.5 apresenta os níveis registrados pela estação fluviométrica Pimenteiras no período entre janeiro de 2003 e fevereiro de 2008. Ou seja, o mesmo período de dados disponíveis medidos pelo altímetro. Logo, é possível

observar que a duração média entre secas e cheias é de 6 meses, ou 180 dias. Assim, considerando a resolução temporal do satélite de 35 dias, é possível obter, no mínimo, 5 registros do altímetro em cada regime do rio Guaporé para análise dos níveis.

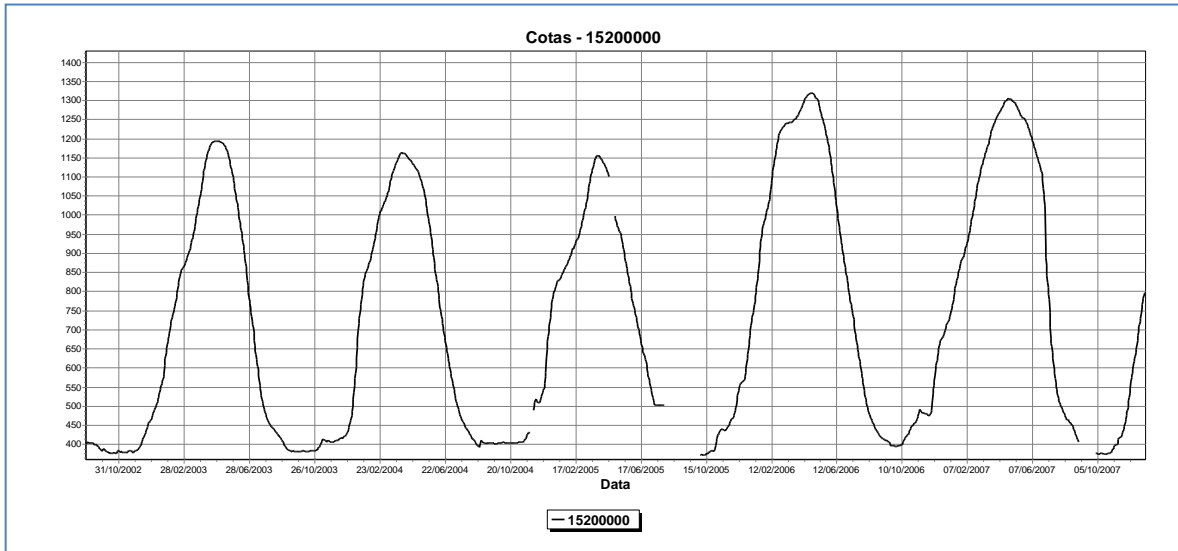


Figura 6.6 – Cotograma da estação fluviométrica Príncipe da Beira (15200000).

A Figura 6.6 apresenta o cotograma registrado pela estação fluviométrica Príncipe da Beira no período entre setembro de 2002 e janeiro de 2008. O mesmo período de registro medido pelo altímetro. Da mesma forma que no cotograma da Figura 6.5, a duração média entre secas e cheias é de 6 meses, ou 180 dias. Ou seja, obtém-se, pelo menos, 5 registros em cada regime considerando a resolução temporal do satélite de 35 dias.

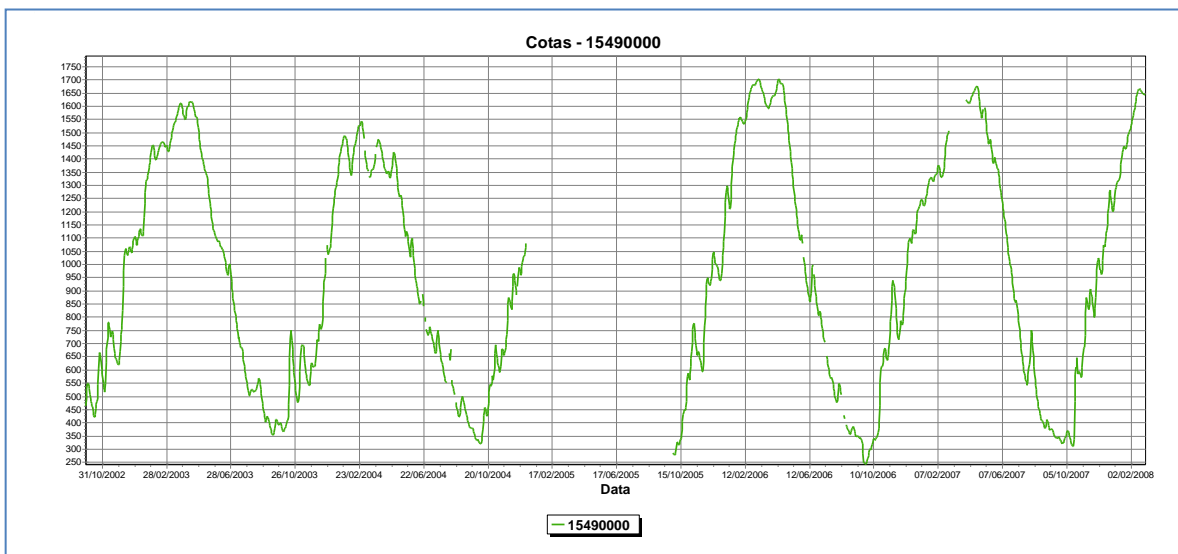


Figura 6.7 – Cotograma da estação fluviométrica Prosperidade (15490000).

A estação fluviométrica Prosperidade possui o cotograma apresentado na Figura 6.7, durante o período entre outubro de 2002 e fevereiro de 2008. Esse foi o período de registros fluviométricos selecionado para possibilitar a análise durante o mesmo período medido pelo altímetro. Nesse cotograma se observa que as secas e cheias possuem um intervalo médio de 180 dias, ou 6 meses. Assim, da mesma forma que nas estações anteriores (Figura 6.5 e Figura 6.6) é possível obter 5 registros do altímetro, no mínimo, em cada um dos regimes para a análise dos níveis medidos pelas réguas e pelo satélite.

Além das análises dos cotogramas das estações que serão analisadas, também foram calculados os tempos de concentração (t_c) de cada estação. O t_c pode ser entendido como o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante da bacia chegue até a seção de controle. Ou ainda, pode ser definido como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma (Tucci, 2004).

Assim, o cálculo do tempo de concentração de cada estação em análise nesse estudo, nesse estudo, fornece informações adicionais sobre o comportamento da bacia, de forma a assegurar que a resolução temporal de 35 dias para as medidas de níveis realizadas pelo satélite, não representa uma limitação no caso desse estudo. A

Tabela 6.2, apresenta os tempos de concentração calculados para cada estação fluviométrica por meio da Equação 6.1, fórmula de Kirpich (Carvalho e Batista da Silva, 2006).

$$t_c = \left(0,87 \times \frac{L^3}{H}\right)^{0,385} \quad \text{Equação 6.1}$$

em que:

t_c = tempo de concentração, em h;

L = comprimento do talvegue principal, em km; e

H = desnível entre a parte mais elevada e a seção de controle, em m.

Tabela 6.2 – Tempos de concentração (t_c) para as estações fluviométricas analisadas.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (h)	TEMPO DE CONCENTRAÇÃO (dias)
15130000	250	10
15200000	596	25
15490000	954	40

Segundo Carvalho e Batista da Silva (2006) a equação mais utilizada tem sido a de Kirpich, uma vez que, normalmente, fornece valores menores para t_c , ou seja, resulta em valores a favor da segurança. Os tempos de concentração constantes na Tabela 6.2 foram calculados considerando a estação Mato Grosso, código 15120001, localizada no rio Guaporé, a montante das estações em análise, localizada no município de Vila Bela da Santíssima Trindade/MT. Foi escolhida essa estação como referência uma vez que os dados do perfil longitudinal do rio Guaporé foram obtidos para esse trecho por meio do estudo do Ministério dos Transportes (<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/Palestras/PalestraAHIMOC.pdf>).

Os valores de t_c apresentados na Tabela 6.2 significam que a ocorrência de uma precipitação no ponto a montante considerado, ou seja, o município de Vila Bela da Santíssima Trindade/MT influenciará as estações 15130000, 15200000 e 15490000, a montante, após 10, 25 e 40 dias, respectivamente.

Assim, nesse estudo, serão comparados os dados diários adquiridos pelo altímetro com os dados registrados pelas réguas no mesmo dia. As estações virtuais criadas a partir dos dados do ENVISAT fornecerão séries de níveis de água com intervalo de 35 dias. Serão criadas séries temporais fluviométricas e altimétricas formadas pelos dias de passagem do satélite sobre as seções em estudo.

6.4 – SÉRIES TEMPORAIS PARA CADA ESTAÇÃO VIRTUAL

As séries temporais de níveis de água altimétricos são geradas pela seleção dos dados altimétricos. Inicialmente, todos os pontos encontrados na área de estudo definida pelo polígono, determinado no item 6.3, são representados num gráfico onde:

- no eixo das ordenadas (y) é mostrada a altura (medição altimétrica) em relação ao elipsoide de referência do satélite;

- perpendicularmente à direção de escoamento informada para a área de estudo; a distância é calculada com as coordenadas dos pontos em graus geográficos.

Neste momento, diferentes ações podem ser efetuadas sobre a representação gráfica (ver Figura 6.4). É sobre esse gráfico que será realizada a seleção de pontos sobre a água e a exclusão dos demais, obtidos sobre a superfície.

Ainda nessa etapa, também é possível visualizar ou ocultar, no gráfico, as séries de pontos correspondentes aos dados brutos e aos dados corrigidos do efeito *hooking*. Outra ferramenta importante para a escolha dos dados medidos sobre a água é a apresentação de uma tabela separada por ciclo do satélite (Figura 6.8). Na figura, os pontos selecionados, em vermelho, correspondem aos ciclos iluminados em amarelo na tabela. Essa tabela apresenta o número do ciclo, data e hora da medição e a incerteza associada com cada método de cálculo da altura (média, mediana ou *hooking*). No caso da avaliação manual realizada por meio do gráfico, também é possível recalcular as incertezas apresentadas na tabela de acordo com os pontos selecionados. A tabela também proporciona a visualização separada dos ciclos no gráfico, de forma a ter uma visão melhor dos ciclos correspondentes.

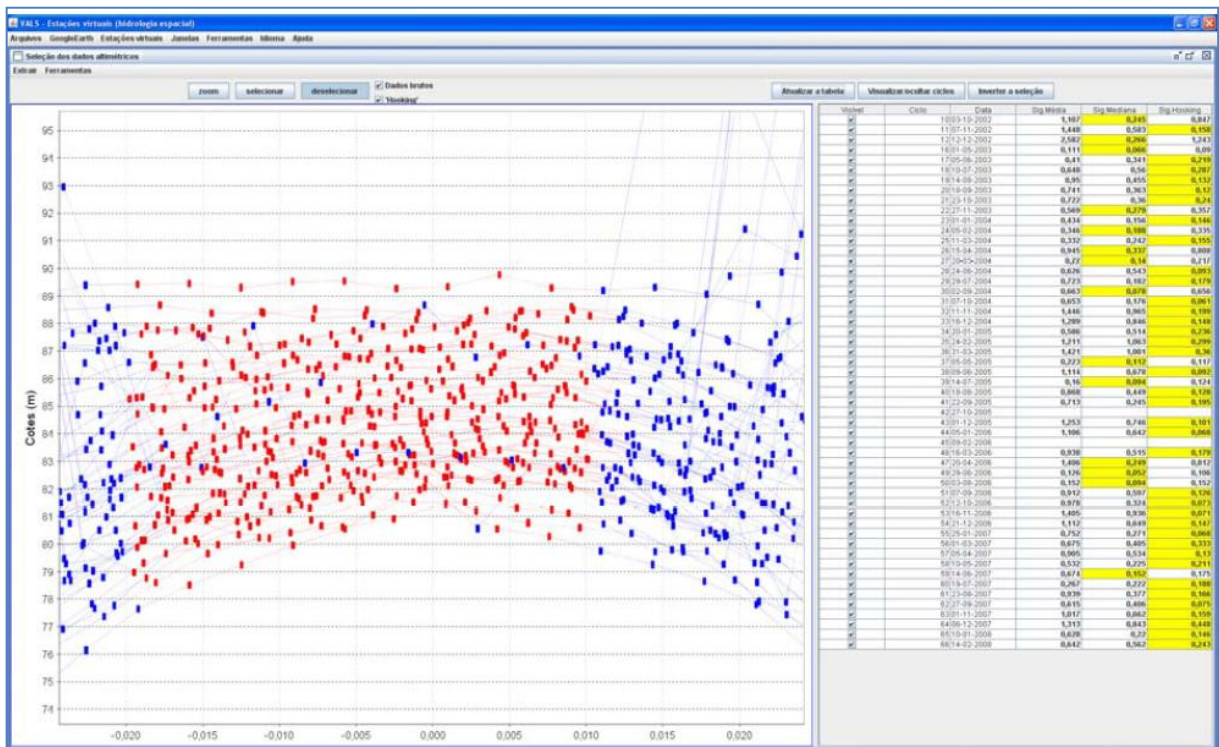


Figura 6.8 - Janela 2 do VALS com pontos selecionados e tabela dos ciclos (programa VALS versão 0.6.2).

Após finalizada a escolha dos pontos representantes de níveis de água, esses dados são exportados para um arquivo texto. Dessa forma, uma vez que só os pontos escolhidos são exportados, a série temporal de dados de níveis de água altimétricos está gerada nesse momento. A Figura 6.9 apresenta a seleção de pontos realizada por meio do perfil disponibilizado na janela 2 do VALS. Nessa figura, os pontos vermelhos foram selecionados e os pontos azuis foram excluídos da série temporal.

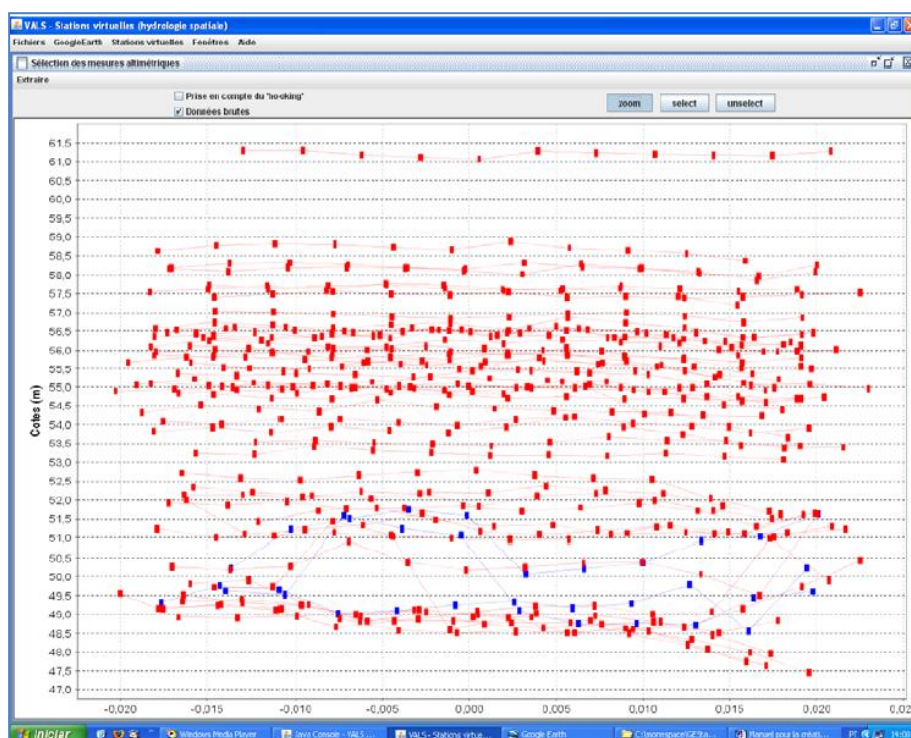


Figura 6.9 - Janela 2 do VALS com um exemplo de maus ciclos não selecionados (programa VALS versão 0.6.2).

A qualquer momento, existe uma correspondência entre os pontos da janela 2 e da janela 3 (ver Figura 6.4). Ao selecionar um dos pontos a posição do ponto no gráfico da outra janela é iluminada.

A metodologia para a obtenção da informação inerente às medidas altimétricas é finalizada pela estimativa das séries temporais de níveis de água. A estimativa dos níveis é dada pelo cálculo da média e da mediana do conjunto de valores medidos pelo altímetro.

Frappart *et al.* (2006a), utilizaram a mediana como medida estatística representativa na definição do nível de água em cada ciclo do traço do satélite. Segundo os autores, para cada ciclo, o nível de água em uma dada estação virtual é obtido pelo cálculo da mediana para todos os dados existentes no interior da janela de interesse. Repetindo esse

processo para cada ciclo, é possível construir séries temporais de níveis associadas a uma estação virtual.

A caracterização da qualidade dos resultados obtidos é realizada pela associação de uma dispersão à mediana. Essa dispersão foi calculada pelo desvio médio absoluto da mediana – DAM (Equação 6.2). Para evitar o problema de estimativas em amostras pequenas, chamado tendenciosidade, costuma-se usar uma correção para o desvio em que o denominador N é substituído por N-1.

$$DAM(h) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [h_i - h_{med}] \quad \text{Equação 6.2}$$

onde, N é o número de observações, h_i é a i ésima observação e h_{med} é a mediana.

6.5 - TRATAMENTO DOS DADOS UTILIZADOS

Nessa etapa, serão efetuadas as operações necessárias para a determinação das alturas de água. As médias das medidas disponibilizadas em intervalos de tempo de 1 segundo apresentam uma grande contaminação por ecos parasitas. A passagem da medida de 1 segundo, ou seja, 1 Hz, para as medidas elementares de 20 Hz permite, portanto, eliminar os dados contaminados. Essas medidas são, então, redistribuídas em espaços geográficos de 350 metros para as medidas de 20 Hz da missão ENVISAT.

Ressalta-se que esse intervalo entre as medidas é inferior à faixa imageada, que corresponde a 2 ou 3 km, resultando em um recobrimento espacial importante entre as medidas sucessivas, conduzindo, dessa forma, a uma amostragem espacial mais precisa dos planos de água observados. No entanto, somente os parâmetros correspondentes à altura da órbita e à altura altimétrica apresentam esse valor médio a 20 Hz. Todos os demais parâmetros são fornecidos na forma de um valor médio a 1 Hz.

Dessa forma, os algoritmos desenvolvidos para os altímetros de satélite permitem calcular a posição a 10 Hz ou a 20 Hz a partir da posição a 1 Hz e da equação da órbita do satélite. As correções ambientais e geofísicas são supostas constantes sob a medida de 1 Hz e não são interpoladas. Finalizando o tratamento, foram criados arquivos para as posições a 10 Hz ou a 20 Hz, segundo a missão, com data, latitude e longitude

interpoladas e altura do nível de água para cada satélite e para cada algoritmo de forma de onda (FO).

6.6 – CRIAÇÃO DAS SÉRIES DE DADOS ALTIMÉTRICOS

Analisando a localização dos traços do satélite ENVISAT sobre a sub-bacia escolhida para o estudo preliminar, são selecionados os locais que preenchem dois requisitos:

- o traço do ENVISAT cruza o canal do rio;
- existe uma estação fluviométrica a menos de 10 km a jusante ou a montante do traço.

Após a seleção dos locais, são criadas as estações virtuais que dão origem às séries temporais de níveis de água. A metodologia para criação das estações virtuais utilizadas nesse estudo está descrita no item 6.3, além disso, também foi empregada no trabalho de Roux *et al.* (2010), como descrito no item 4.9.

Nesse estudo, as séries temporais de cada estação virtual criada por meio dos dados adquiridos pelo ENVISAT, serão geradas com o auxílio do algoritmo *ice-1*. A escolha do algoritmo foi baseada no consenso de que o *ice-1* é o algoritmo que melhor se adapta às medições altimétricas em águas continentais (Frappart *et al.*, 2006a).

A partir da região de interesse, nesse caso a bacia do rio Madeira, a escolha dos pontos de estudo é realizada pela análise das imagens fornecidas pelo programa *Google Earth*. Sobre as imagens da bacia são, então, inseridas as estações fluviométricas (estações *in situ*) com o auxílio do cadastro das estações da rede hidrometeorológica nacional disponibilizado e atualizado pela Agência Nacional de Águas (ANA). Esse processo permite que sejam determinados os locais que se encaixam nas limitações estabelecidas no objetivo desse trabalho, ou seja, comparar os níveis altimétricos com os níveis *in situ*, em locais onde a distância entre o traço do satélite e a estação não ultrapasse a distância de 10 quilômetros a jusante ou a montante.

A distância limitante de 10 km foi estabelecida de forma preliminar, levando-se em conta experiências como a de Birkett *et al.* (2002), que realizaram estudos de dados altimétricos adquiridos sobre a bacia amazônica utilizando como base, dados *in*

situ limitados por um raio de 10 km ao traço do satélite. Entretanto, o resultado alcançado não foi satisfatório, e a distância limite foi ampliada.

Nesse estudo, a mesma limitação de condições iniciais do estudo de Birkett et. al. (2002) possibilitou a seleção de três locais na bacia do rio Madeira. Assim, para cada uma das interseções escolhidas entre o traço do satélite e o rio estudado, extraem-se as medidas altimétricas correspondentes ao plano de água.

Pelo programa VALS, é possível acessar os dados do traço ENVISAT escolhido. A área de estudo é estabelecida por meio do desenho de um polígono sobre a imagem do *Google Earth*, que englobe a seção do rio sendo cruzada pelo traço do satélite (ver item 5.3). Assim, o programa seleciona apenas os dados que serão analisados, ou seja, as medidas realizadas no interior do polígono. Trabalhos de campo realizados pela CPRM mostraram que a precisão fornecida pelas imagens do *Google Earth* é de ± 10 metros.

Após o acesso aos dados de interesse, o VALS produz um gráfico com os níveis altimétricos medidos no interior do polígono. De posse das medidas dos níveis altimétricos adquiridas dentro do polígono, parte-se para a fase da análise visual realizada pelo usuário. Esse é um ponto decisivo nessa metodologia, pois deverão ser excluídos todos os pontos que não representam planos de água (margens do rio, ilhas, vegetação ciliar, etc.), assim como serão identificados os ciclos defeituosos. Esse processo é realizado pela análise das medidas de níveis visualizadas no VALS. Assim, por exclusão, são selecionados os pontos que representam alturas de níveis de água. Todos os pontos que representem qualquer alvo além do plano de água são excluídos e não pertencerão à estação virtual, assim como não serão considerados na geração da série temporal.

De posse dos pontos escolhidos para definir a estação virtual, o VALS gera a série cronológica dos níveis dos valores médios e dos valores da mediana dos pontos selecionados para um ciclo, além dos valores após a correção do efeito *hooking*. Nessa série, cada ponto vem acompanhado de uma barra de incerteza e, conforme o objetivo, as três séries podem ser sobrepostas para efeitos de comparação. A incerteza é calculada pelo desvio de cada medida dentro do mesmo ciclo que dará origem a um único ponto da série temporal. Todos os dados de níveis extraídos são, então, exportados por meio de um arquivo texto. Assim os pontos são caracterizados individualmente através da posição geográfica, data de aquisição e valores estatísticos (média, mediana, etc.) das alturas.

Pela análise e comparação desses resultados, busca-se validar ou não o uso dos dados do satélite para o objetivo proposto, ou seja, a complementação e verificação das informações geradas pela rede de estações fluviométricas presentes na bacia em estudo.

Criada a estação virtual e gerada a série temporal de níveis altimétricos, parte-se para o estabelecimento da série temporal *in situ* que servirá como base de comparação para a avaliação do comportamento dos dados gerados pelo altímetro através da metodologia proposta.

Para que os dados da estação virtual possam ser comparados aos dados fornecidos pela estação fluviométrica, torna-se necessário trazer os dados da estação de réguas para a mesma referência fornecida pelos níveis medidos pelo altímetro. Assim, calcula-se a média entre as diferenças dos níveis do altímetro e das cotas das réguas. Essa média calculada é, então, somada aos valores de cota registrados pelas réguas fluviométricas, trazendo-as para a mesma referência.

7 - RESULTADOS

Na bacia escolhida para estudo, a bacia hidrográfica do rio Madeira, foram encontrados três locais que satisfizeram as condições iniciais de escolha, ou seja, uma distância máxima de 10 quilômetros entre o cruzamento do traço do satélite sobre o rio e a estação *in situ*. Esses locais foram selecionados com o auxílio das imagens do *Google Earth*.

A Figura 7.1 mostra uma imagem com os traços do satélite ENVISAT sobre a área de estudo. As linhas diagonais representam as passagens do satélite sobre a região. A figura também apresenta a localização das três estações fluviométricas selecionadas para a comparação de dados de níveis com os dados do satélite. É possível observar que o satélite sobrevoa com bastante proximidade as três estações selecionadas (áreas delimitadas em vermelho). Também foram marcados na imagem os limites do Estado de Rondônia e o limite da fronteira com a Bolívia, representados, respectivamente, pelas linhas azul clara e amarela.



Figura 7.1 – Imagem do local de estudo identificando as interseções das passagens do ENVISAT com as estações fluviométricas (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

As características das estações fluviométricas (Tabela 7.1) são provenientes do inventário pluviométrico/fluviométrico disponibilizado pela ANA (Agência Nacional de Águas), que tem a atribuição de administrar e disponibilizar os dados hidrológicos da rede hidrometeorológica nacional. Esses dados foram validados pela entidade operadora das estações, CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), juntamente à REPO (Residência da CPRM de Porto Velho), unidade regional responsável pela rede do estado de Rondônia (no qual as três estações estão inseridas).

Tabela 7.1 – Características das estações fluviométricas.

Código da estação fluviométrica	Local	Longitude média (°)	Latitude média (°)	Largura média da seção (m)	Profundidade média da seção (m)
15130000	Rio Guaporé	-61,0300	-13,2909	160	9
15200000	Rio Guaporé	-64,2531	-12,2536	700	-
15490000	Rio Madeira	-63,3104	-8,2708	890	-

Vale ressaltar que a localização das estações fluviométricas é bastante imprecisa. Por esse motivo, as coordenadas foram consideradas com precisão quilométrica e, conseqüentemente, são apresentadas como “médias” na Tabela 7.1.

A estação Pimenteiras, código 15130000, é classificada como tipo FD. Isto significa que a estação registra dados de níveis por meio das réguas fluviométricas (tipo F) e também há registros de vazão (tipo D) obtidos por meio de medições de descarga realizadas pela entidade operadora.

A estação Príncipe da Beira, código 15200000, e a estação Prosperidade, código 15490000, possuem apenas registros de níveis, portanto são classificadas como tipo F. Uma vez que não há medição de descarga, nessas estações também não se realiza levantamento do perfil da seção transversal. Dessa forma, para essas estações não se dispõe de informação sobre a profundidade da seção. As larguras de seção dessas estações foram medidas sobre a imagem do *Google Earth* e, conforme citado anteriormente, possuem precisão de ± 10 metros.

Cada um dos três locais escolhidos representa uma interseção entre o rio e um traço do ENVISAT. Nessas interseções foram extraídas as medidas altimétricas que correspondentes aos planos de água. Essas medidas geraram as estações virtuais apresentadas na Tabela 7.2 e foram adquiridas por meio das imagens do *Google Earth*.

Tabela 7.2 – Características das estações virtuais.

Estação virtual	Local	Longitude média (°)	Latitude média (°)	Largura média da seção (m)
EV-15130000	Rio Guaporé	-61,0600	-13,5100	190
EV-15200000	Rio Guaporé	-64,4100	-12,4500	660
EV-15490000	Rio Madeira	-63,5100	-8,4500	2.360

Assim, foram criados três pares de estações. Cada par é formado por uma estação *in situ* e uma estação virtual, de forma a possibilitar a análise e comparação dos dados. A Tabela 7.3 mostra os três pares de estações gerados.

Tabela 7.3 – Correspondência entre estações fluviométricas e estações virtuais.

Denominação do par	Estação fluviométrica	Estação virtual	Traço ENVISAT	Distância aproximada entre A e B (km)
	(A)	(B)		
P-15130000	15130000	EV-15130000	478	5,81 (a montante)
P-15200000	15200000	EV-15200000	192	3,37 (a jusante)
P-15490000	15490000	EV-15490000	192	3,40 (a montante)

Na Tabela 7.3, as distâncias entre a seção de réguas (estação fluviométrica) e a seção do rio cruzada pelo satélite (estação virtual) foram calculadas no *Google Earth* com precisão de ± 10 metros.

Após geradas as estações virtuais, os pontos medidos pelo satélite e seus respectivos níveis são visualizados no VALS. Essa visualização ocorre em três janelas, conforme mostrado na Figura 7.2, as quais possibilitam analisar de forma simultânea informações sobre a estação virtual (1), o perfil dos níveis altimétricos em metros (posição no eixo horizontal x nível no eixo vertical) de cada ponto medido pelo satélite (2), e a localização, em planta (longitude no eixo horizontal x latitude no eixo vertical), desses pontos ao longo do traço (3).

1

2

3

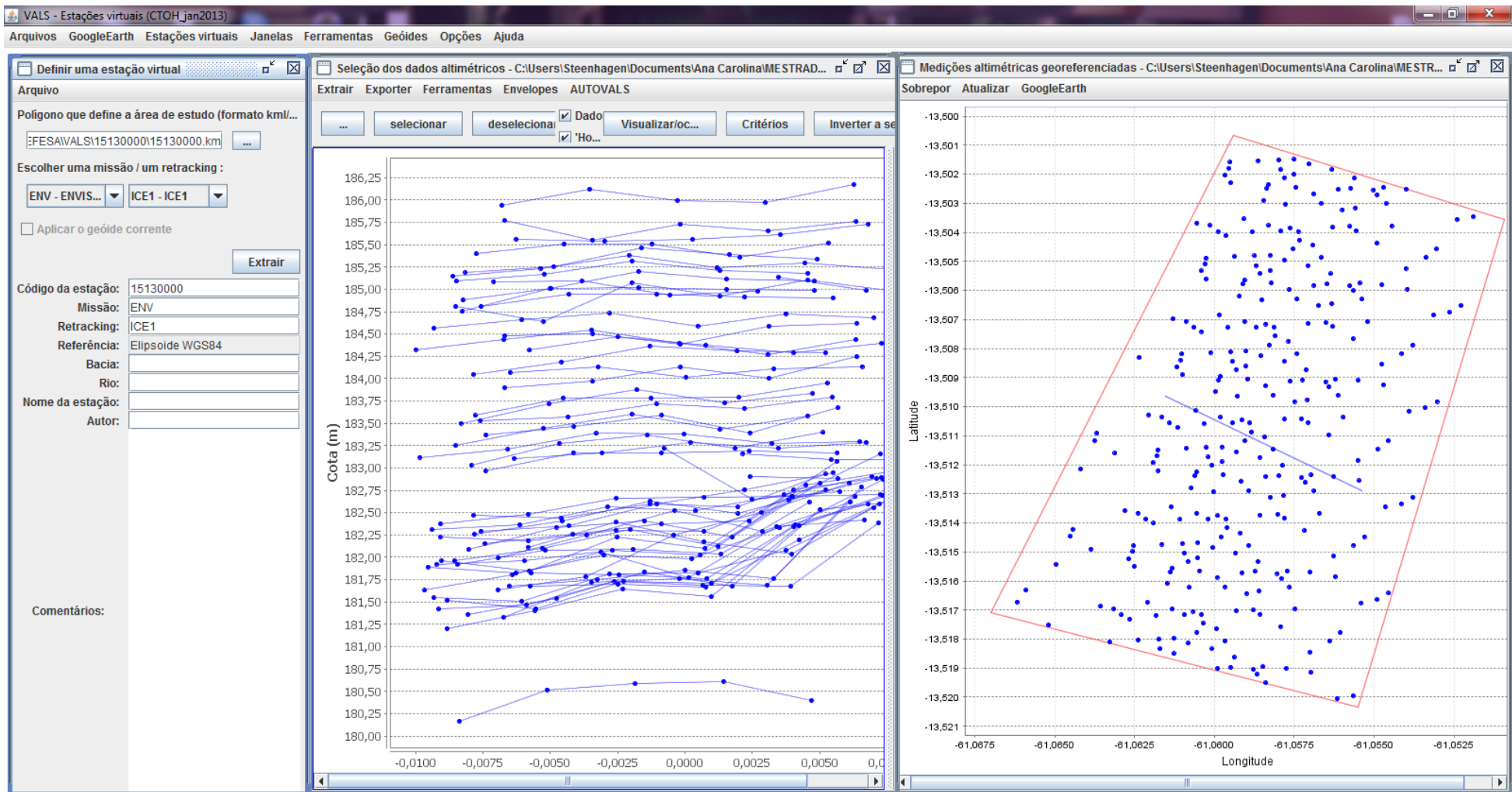


Figura 7.2 - Três janelas visualizadas após a extração da estação virtual 15130000 no VALS (programa VALS versão 0.6.2).

A partir da observação simultânea das janelas 2 e 3 (Figura 7.2), parte-se para a fase de escolha dos pontos que, efetivamente, serão utilizados para gerar a série virtual. Essa escolha é visual. O objetivo é selecionar os pontos que realmente encontram-se sobre o corpo d'água, afinal, a série temporal será formada a partir da informação altimétrica inerente a cada um dos pontos escolhidos. Portanto, os pontos medidos fora do corpo d'água, (margens, ilhas, planície de inundação, etc.), não devem ser selecionados.

Assim, para cada uma das três estações virtuais, foram selecionados os pontos que deveriam compor a série temporal de níveis altimétricos. Essas são as séries a serem comparadas com as respectivas séries de níveis das réguas fluviométricas.

Dessa forma, cada estação virtual terá seus dados de níveis selecionados por meio dos perfis apresentados na janela 2 da Figura 6.2. Da mesma forma que na Figura 7.2, nas ordenadas são apresentados os níveis altimétricos em metros, calculados em relação ao elipsoide de referência do satélite (WGS-84). As abscissas apresentam a distância do ponto projetado perpendicularmente à direção de escoamento informada para a área analisada (linha azul que aparece no interior do polígono vermelho na janela 3 da Figura 7.2). Essa distância é calculada com as coordenadas dos pontos em graus geográficos, tendo como origem os pontos localizados sobre a linha azul.

A seguir são apresentados, separadamente, os resultados obtidos nas análises realizadas nos três locais selecionados para estudo. Nas figuras geradas sobre as imagens do *Google Earth* relativas às seções de estudo, a linha branca representa o traço do ENVISAT e o ponto em vermelho mostra a localização da estação fluviométrica (Figura 7.3, Figura 7.12 e Figura 7.19).

Sobre as imagens delimita-se a área onde serão medidos os níveis de água por meio de um polígono desenhado sobre o cruzamento do traço do satélite com a seção do rio. Essa delimitação está representada pelos polígonos vermelhos desenhados nas áreas de criação das estações virtuais. Também sobre a imagem, desenha-se o traço sobre o rio na direção de montante para jusante.

7.1 – ANÁLISE DOS DADOS NA ÁREA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA PIMENTEIRAS (15130000)

A imagem da Figura 7.3 mostra o traço do ENVISAT, em branco, cruzando o rio Guaporé, próximo à estação fluviométrica Pimenteiras, de código 15130000. Na mesma figura, a seta branca indica o sentido do fluxo do rio Guaporé, demonstrando que a estação *in situ* está localizada a montante da estação virtual. A distância entre a seção da estação fluviométrica e a seção sobrevoada pelo satélite é da ordem de 6 km (linha amarela na figura). Essa seção tem 190 m de largura, enquanto a seção transversal da estação *in situ* tem 160 m (linhas azuis na figura).

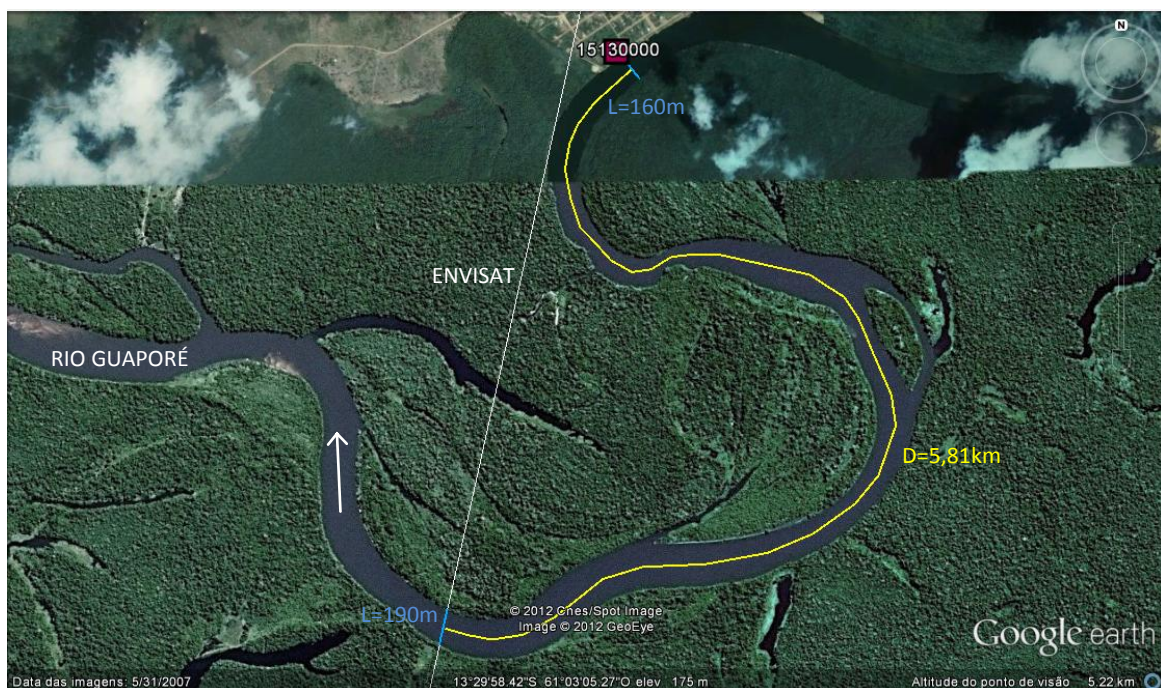


Figura 7.3 – Imagem do Rio Guaporé no local de estudo da estação 15130000 (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

Os levantamentos da seção transversal realizados *in loco* possibilitam visualizar os perfis da estação analisada. Os perfis medidos em Pimenteiras são apresentados na Figura 7.4.

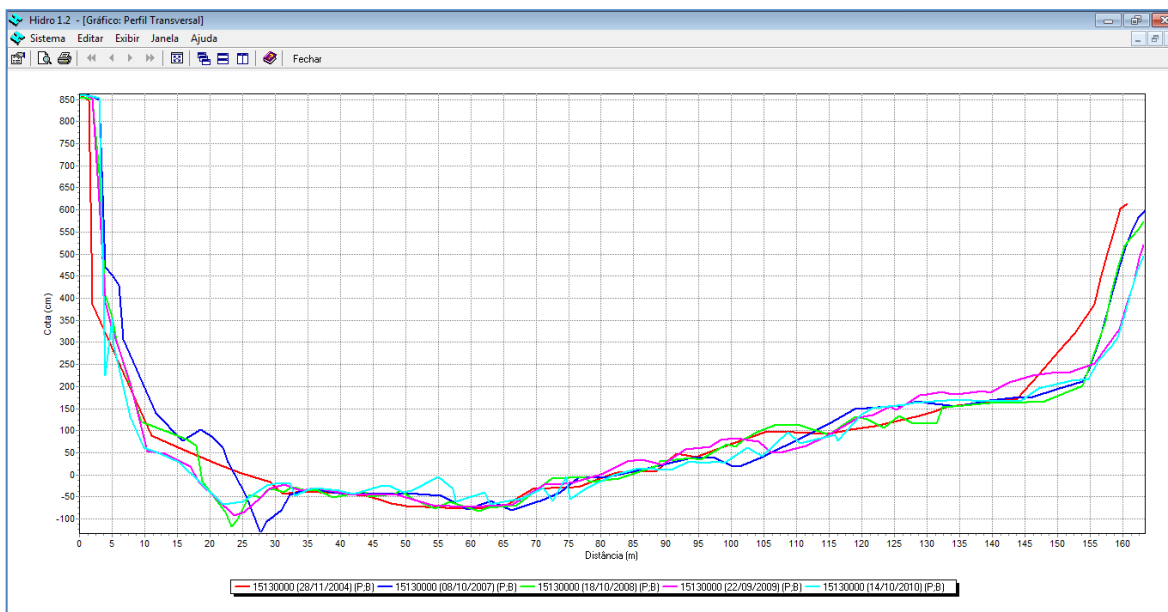


Figura 7.4 – Perfis transversais da estação fluviométrica Pimenteiras (15130000), (ANA, Hidro versão 1.2.1).

Considerando a série histórica de perfis disponível, foram desenhados apenas os perfis levantados dentro do período de análise dos dados de níveis. Assim, na Figura 7.4 estão representados os perfis da seção transversal medidos nos anos 2004, 2007, 2008, 2009 e 2010. No eixo horizontal está representada a distância entre as margens em metros, no eixo vertical estão representadas as cotas em centímetros.

A análise do perfil transversal medido *in loco* mostra que o controle da estação fluviométrica Pimenteiras possui seção encaixada e estável. A seção tem largura média de 160 metros e profundidade média de 9 metros.

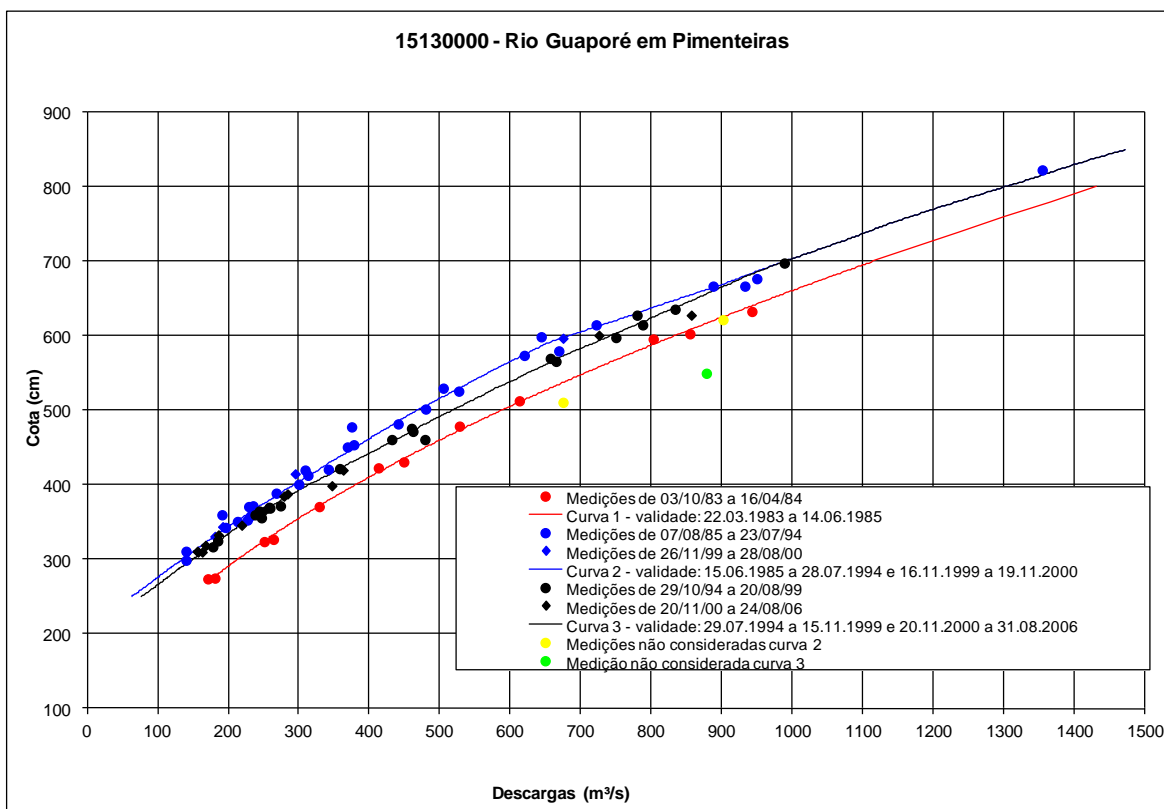


Figura 7.5 – Curva-chave da estação fluviométrica Pimenteiras (15130000), (REPO, 2012).

A Figura 7.5 apresenta a curva-chave da estação Pimenteiras, determinada pela série de cotas, perfis transversais e medições de vazão realizadas. A curva foi determinada pela REPO, entidade operadora da estação e possui três períodos de validade distintos, determinados em função das diferenças ocorridas na relação cota x vazão ao longo do tempo. Assim, observa-se que a curva a ser considerada para análises de dados mais recentes, ou seja, para o caso desse estudo, é a curva 3, apresentada em preto na Figura 7.5, que possui período de validade entre 2000 e 2006.

A série de níveis altimétricos da estação virtual EV-15130000 adquirida pelo satélite ENVISAT, referente ao traço 478 do satélite, foi extraída por meio do programa VALS. O polígono desenhado sobre a imagem da estação virtual, polígono em vermelho na Figura 7.6, tem por função limitar as margens para análise dos dados.



Figura 7.6 – Delimitação da área para geração da estação virtual EV-15130000 (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

A Figura 7.7 apresenta as janelas de seleção de dados disponibilizadas no VALS. O perfil de dados altimétricos apresentados na Figura 7.7 foi delimitado pelo polígono desenhado sobre a Figura 7.6 e é orientado de acordo com o sentido do fluxo do rio na seção. A direção da corrente, montante para jusante, é informada ao programa, de forma que o perfil altimétrico será sempre orientado na mesma direção. Assim é possível identificar cada margem representada no perfil. O objetivo da determinação do sentido do fluxo é garantir o correto posicionamento das margens para a análise dos níveis medidos pelo altímetro.

Os níveis altimétricos medidos estão apresentados na Figura 7.7 (a), que corresponde à janela 2 da Figura 7.2. Na mesma Figura 7.7 (b) também estão representados os dados em planta, correspondentes à janela 3 da Figura 7.2, onde se visualiza os pontos medidos sobre a área delimitada pelo polígono e o traço que define o sentido do fluxo. Também é possível, nessa janela, sobrepor as margens do rio desenhadas sobre a imagem do *Google Earth*. Essa ferramenta é importante no momento da escolha dos dados, pois fornece uma referência adicional de posicionamento dos pontos medidos.

Nessa etapa são selecionados, manualmente, via análise visual, os pontos medidos efetivamente sobre a água, pontos vermelhos no perfil.

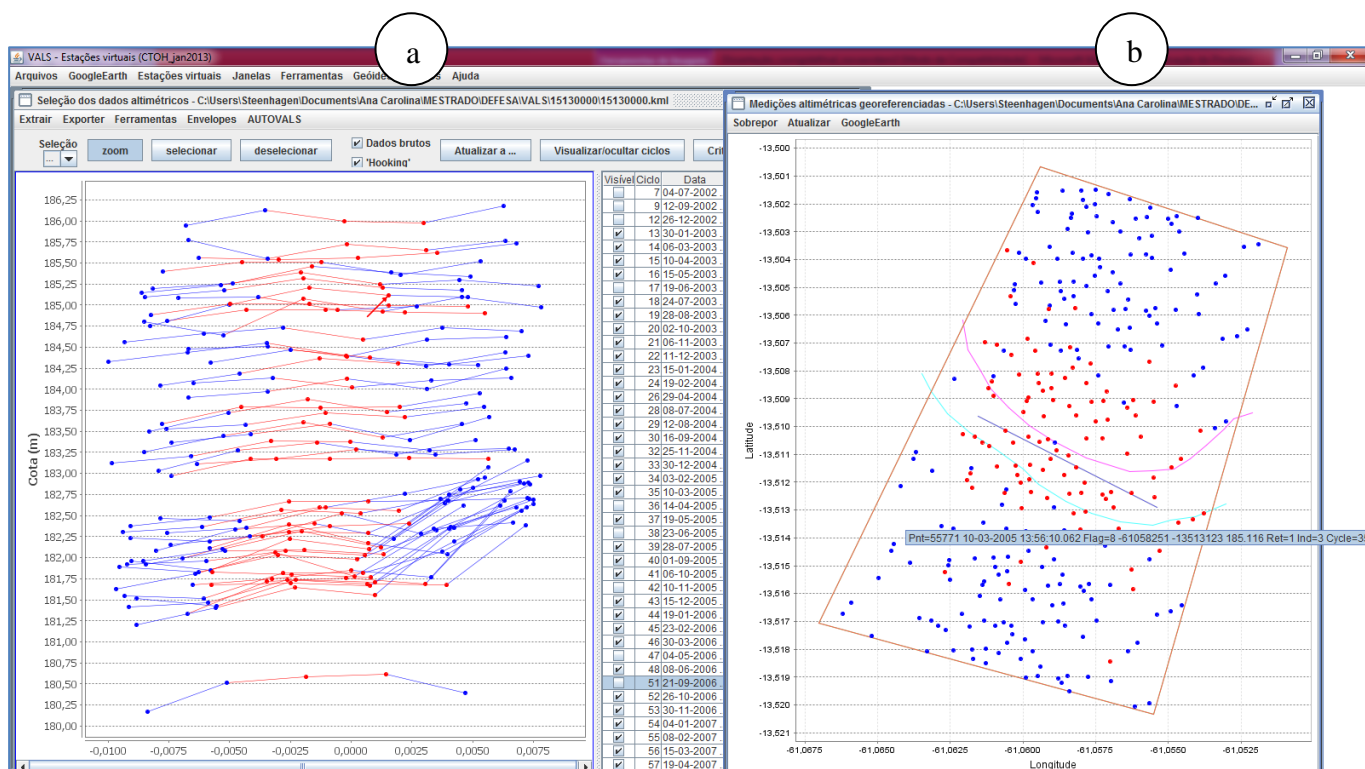


Figura 7.7 - Perfil transversal das alturas fornecidas pelo traço 478 do ENVISAT no cruzamento com o rio Guaporé – estação virtual EV-15130000 (programa VALS versão 0.6.2).

Além disso, o VALS permite a seleção simultânea dos dados considerando a sua localização em ambas as janelas. Na Figura 7.7 (a) e (b) é possível observar que ao apontar o cursor para um ponto na janela (a) o programa aponta uma seta ao ponto correspondente na janela (b) e apresenta as informações completas da medição, como data, número do ciclo e valor medido.

Como mostrado na Figura 7.7 (a), o VALS também apresenta uma tabela separada por ciclo do satélite. Por meio dessa ferramenta é possível selecionar os ciclos separadamente. Essa ferramenta também é muito importante, pois é possível selecionar os pontos medidos em cada ciclo de cada vez, ou ainda, visualizar separadamente os ciclos medidos na cheia e na estiagem do rio, ou outro tipo de seleção a depender do objetivo do estudo.

Paralelamente á seleção dos pontos válidos, o VALS também permite visualizar os pontos que estão sendo analisados diretamente sobre a imagem do *Google*

Earth. Conforme a seleção é realizada é possível atualizar a imagem do *Google* com os novos pontos selecionados ou excluídos. A Figura 7.8 mostra os pontos selecionados na Figura 7.7 sobre a imagem.

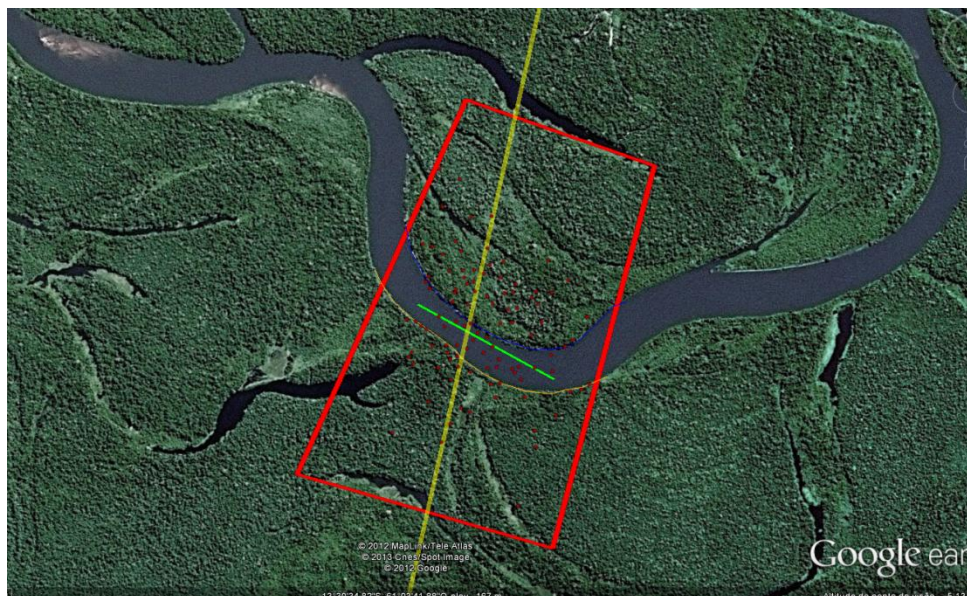


Figura 7.8 – Pontos selecionados na Figura 7.7 visualizados sobre a imagem da área de estudo (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

Na Figura 7.7, os pontos em vermelho representam os pontos selecionados, ou seja, aqueles que deram origem à estação virtual EV-15130000. Os pontos azuis representam medidas que, por análise visual, não foram tomadas sobre o curso d'água. Assim, somente as medidas adquiridas nos pontos em vermelho foram utilizadas para determinar a série temporal dessa estação.

Após finalizada a seleção dos dados o próximo passo é gerar a série temporal altimétrica. O programa realiza os cálculos das médias, medianas e correção de *hooking* (quando necessário) e apresenta a série de dados em nova janela. Nesse momento, a janela da série temporal está vinculada ao perfil transversal de dados onde a seleção foi realizada. Assim, ainda é possível identificar correções a serem feitas na seleção das medidas. A Figura 7.9 apresenta essas janelas (perfil de dados selecionados e série altimétrica gerada). Na figura é possível observar que, ao apontar um ponto da série o programa apresenta o ciclo correspondente por meio de setas apontando para cada um dos pontos do ciclo.

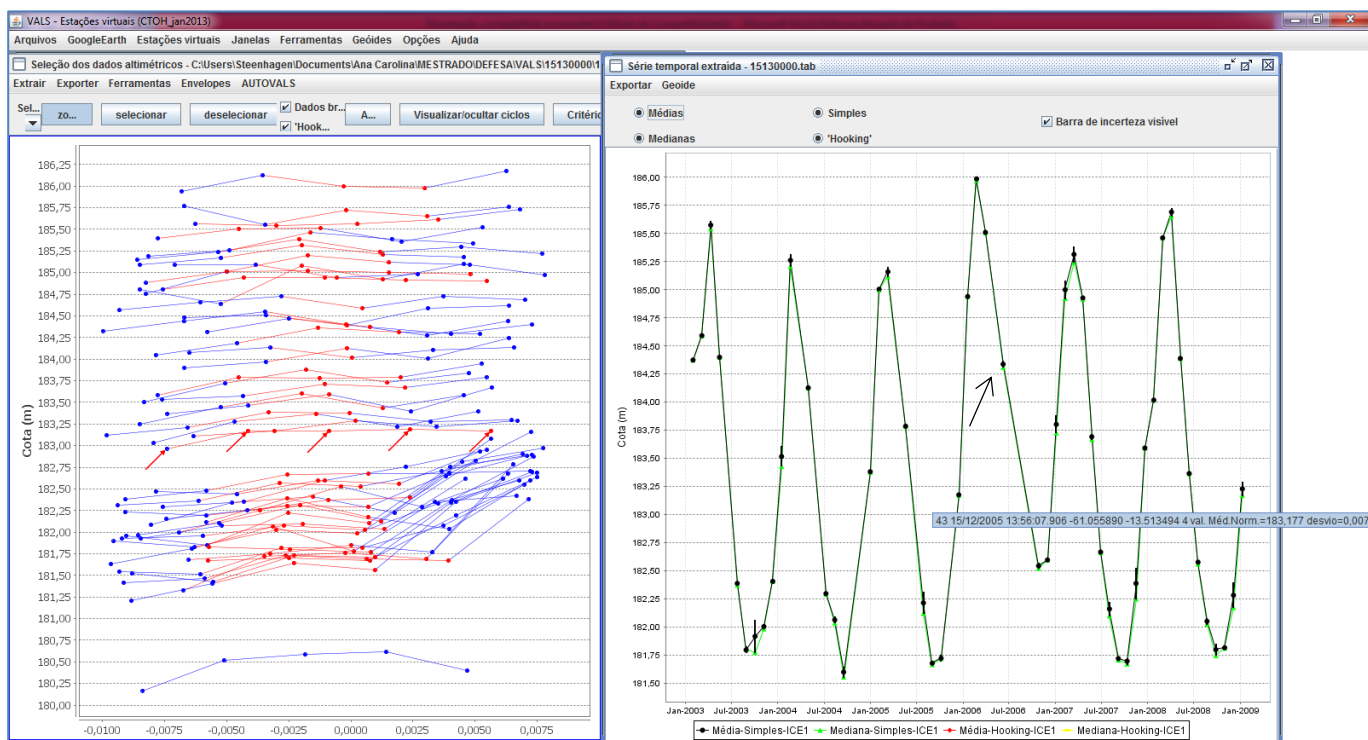


Figura 7.9 – Perfil de dados selecionados e série temporal altimétrica gerada – janelas do VALS referente à EV-15130000 (programa VALS versão 0.6.2).

Na Figura 7.9 também é possível observar que é possível visualizar a série calculada tanto pelas médias como pelas medianas, assim como a incerteza em cada ponto. Nesse caso, apesar de estar apresentada no gráfico, a correção de *hooking* não foi aplicada.

Em relação à escolha dos pontos, como mencionado anteriormente, foi realizada de forma visual, sendo que o objetivo é determinar quais as medidas apresentadas no perfil foram obtidas sobre o rio, ou seja, representam medidas de níveis de água tomadas pelo altímetro. Entretanto, o programa VALS disponibiliza ferramentas que facilitam a decisão sobre os pontos a escolher. Nesse estudo, a seleção foi realizada pela análise de cada um dos ciclos separadamente, em ordem de data de aquisição.

Uma vez realizado o estudo individual de cada ciclo medido foi realizada a análise visual do conjunto de pontos escolhidos no perfil completo de medições. Isso permitiu alterar a seleção, ou exclusão, de alguns pontos, uma vez que, observando a localização dos pontos dentro do conjunto, é possível incluir pontos não selecionados na primeira etapa que se encontram em uma região do perfil, e da planta, onde todas as demais medidas foram escolhidas como válidas. Da mesma forma, ocorreu com medidas

validadas que, pela análise conjunta, estavam em uma região onde as demais medidas foram excluídas do conjunto.

Outra ferramenta muito importante é a possibilidade de sobrepor os contornos das margens do rio na janela que apresenta os pontos em planta. Isso facilita a visualização das medidas sobre o rio. Entretanto, esse limite não pode ser tomado como determinante, pois a morfologia do rio apresenta modificações entre as secas e as estiagens. Além disso, no caso da análise da EV-15130000, pode-se observar que se trata de uma região plana, onde, provavelmente há planícies de alagamento. Logo, ainda que as medidas tenham sido adquiridas externamente às margens, também representam as alturas de nível de água no local. Portanto, devem ser consideradas.

Por outro lado, há casos nos quais, apesar da utilização das ferramentas aqui apresentadas e, mesmo considerando todos os parâmetros em conjunto, ainda há dúvida se a medida deve ser validada ou não. Nesse caso, a primeira consideração a fazer é observar a forma do ciclo por meio dos pontos medidos que o pertencem. Uma vez que o ciclo se apresente normal, em conformidade com os demais ciclos e sem pontos visualmente fora do esperado, pode-se optar por escolher apenas um ponto do ciclo, ou seja, aquele que se encontra dentro das margens do rio. Ainda que não se tenha uma medida localizada no interior das margens, pode-se optar por escolher a medida mais central realizada. Esse procedimento é útil, pois apesar de o cálculo das médias e medianas ser realizado com apenas uma medida do altímetro para esse ponto, o dado será incluído na série temporal e, conseqüentemente haverá mais uma medida a ser comparada com as medidas *in situ*. Caso todo o ciclo seja excluído, isto é, todos os pontos que dele pertencem sejam considerados medidas inválidas, essa data de passagem do satélite não poderá ser considerada e uma data de comparação entre as séries (altimétrica e fluviométrica) será perdida.

A situação apresentada no parágrafo anterior, evidentemente tende a ocorrer em rios de menor largura, como é o caso da seção transversal da EV-15130000 que possui 190 metros. Em seções mais largas o altímetro obterá mais de uma medida sobre a água.

Além da seleção visual, outra funcionalidade importante do programa VALS é a apresentação de uma tabela com os dados de cada ciclo em linhas, apresentada na Figura 7.10. O objetivo é facilitar a escolha dos pontos a serem utilizados para a definição da estação virtual, uma vez que a tabela mostra o número do ciclo, a data da medição e a incerteza associada a cada método de cálculo da altura (média, mediana e

hooking). O valor da incerteza de cada ponto é de grande importância para fundamentar a escolha visual das medidas. O programa automaticamente escolhe o método de cálculo que apresentou a menor incerteza. Entretanto, conforme o interesse do usuário, essa seleção pode ser alterada.

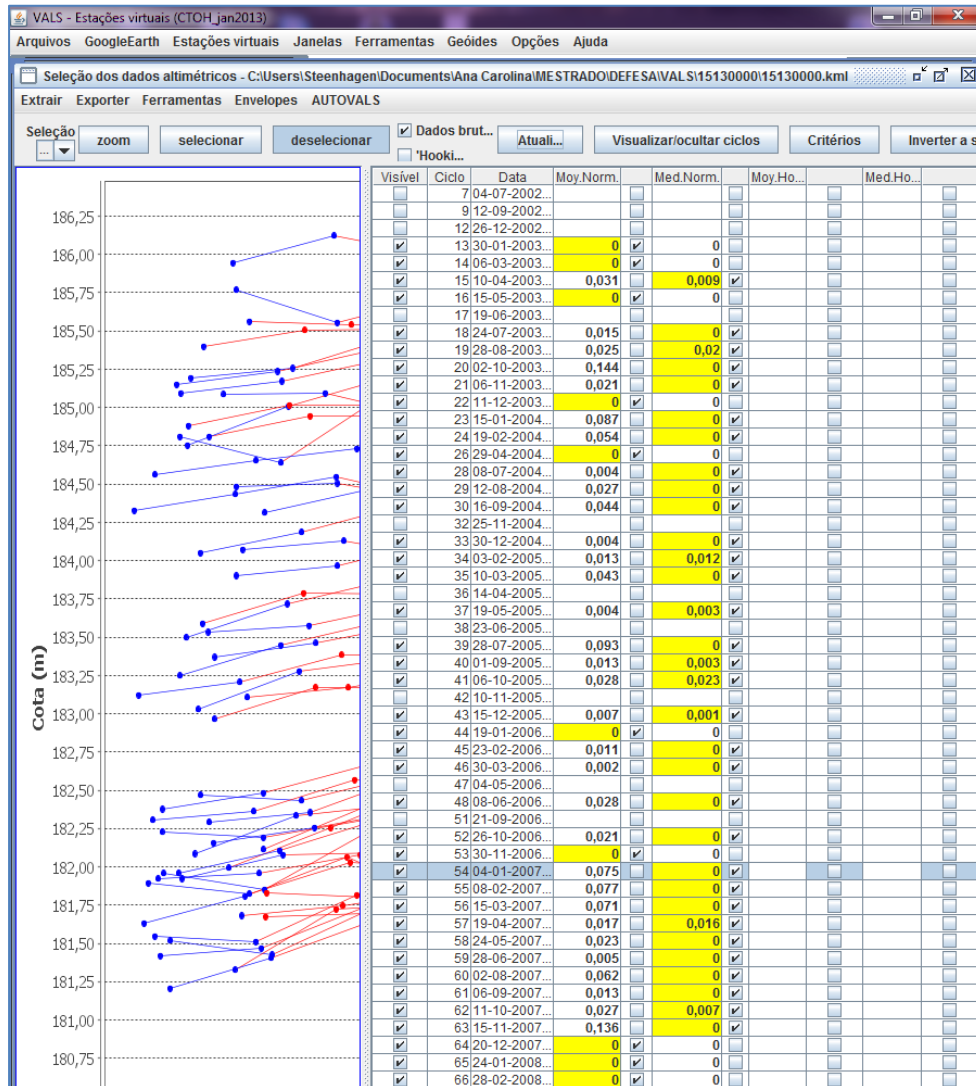


Figura 7.10 – Tabela de ciclos do programa VALS – EV-15130000 (programa VALS versão 0.6.2).

No caso da EV-15130000, mostrado pela Figura 7.10, foi mantido o método de cálculo pelas medianas, uma vez que apresentou menor incerteza que o método das médias em cada ponto.

Após realizadas todas as análises apresentadas, gera-se a série temporal definitiva de níveis de água altimétricos. Essa será a série a ser comparada com os dados da série fluviométrica de níveis. Assim, a série altimétrica definitiva é a que está representada no gráfico da Figura 7.11. Os pontos pertencentes à série correspondem aos pontos

calculados constantes na tabela da Figura 7.10. A tabela automaticamente seleciona o método que resultou em menor incerteza (células em amarelo). Porém, conforme descrito anteriormente, a série altimétrica foi gerada a partir do cálculo das medianas das medidas em cada um dos ciclos referentes à EV-15130000.

De posse da série de dados da estação fluviométrica e da estação virtual é possível comparar as medidas de níveis de água. Os pontos foram plotados no mesmo gráfico de forma a visualizar simultaneamente os níveis em cada uma das estações, fluviométrica e virtual.

Na Figura 7.11, são apresentados os resultados obtidos na análise preliminar realizada em Pimenteiras, código 15130000. Os gráficos mostram as duas séries temporais (*in situ* e altimétrica) relativas a cada uma das estações analisadas. A série dos níveis altimétricos, gerada a partir do ENVISAT são os pontos vermelhos e a série de níveis de água medida pela estação fluviométrica (estação *in situ*) estão em verde.

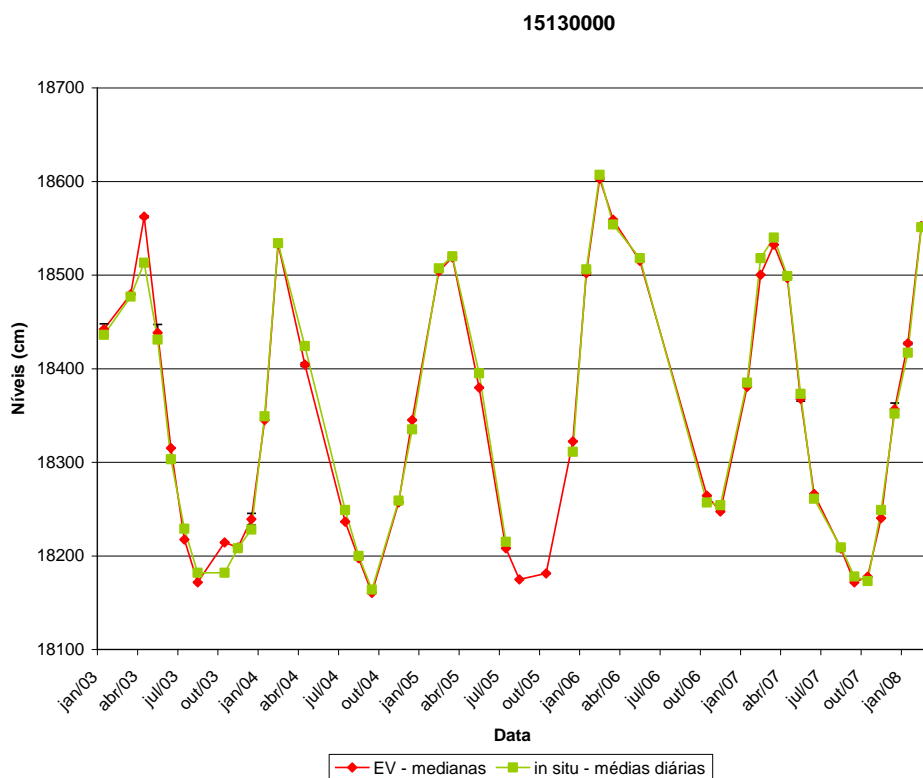


Figura 7.11 - Estação virtual EV-15130000 (traço ENVISAT 478) e estação fluviométrica 15130000 (Pimenteiras).

A Tabela 7.4 apresenta os níveis utilizados para a comparação apresentada no gráfico da Figura 7.11. A comparação entre as séries foi realizada utilizando as médias diárias dos níveis *in situ* e as medidas altimétricas calculadas pelas medianas dos pontos medidos pelo satélite em cada ciclo selecionado. Os valores de médias altimétricas também foram apresentados na tabela para demonstrar que os resultados são próximos utilizando o método das médias ou medianas. Entretanto, pela análise da incerteza calculada para cada medida é possível observar que o cálculo das alturas pelo método das medianas apresenta resultados melhores.

Tabela 7.4 – Cálculo das alturas altimétricas para comparação com os dados *in situ* – estação 15130000.

DATA	Níveis - MEDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)
29/01/2003 00:00	18442	0,07	18442	0,057	18436	6
05/03/2003 00:00	18475	0,065	18479	0	18477	2
09/04/2003 00:00	18565	0,03	18562	0,01	18513	49
14/05/2003 00:00	18439	0,111	18438	0,09	18431	7
18/06/2003 00:00	18315	0	18315	0	18303	12
23/07/2003 00:00	18217	0	18217	0	18229	-12
27/08/2003 00:00	18174	0,02	18172	0	18182	-10
01/10/2003 00:00	18214	0	18214	0	18182	32
05/11/2003 00:00	18211	0,021	18209	0	18208	1
10/12/2003 00:00	18238	0,076	18239	0,062	18228	11
14/01/2004 00:00	18354	0,086	18345	0	18349	-4
18/02/2004 00:00	18539	0,054	18533	0	18534	-1
28/04/2004 00:00	18411	0,068	18404	0,02	18424	-20
07/07/2004 00:00	18237	0,005	18237	0	18249	-12
11/08/2004 00:00	18200	0,027	18198	0	18200	-3
15/09/2004 00:00	18165	0,044	18160	0	18164	-4
24/11/2004 00:00	18259	0,014	18257	0	18259	-2
29/12/2004 00:00	18342	0,051	18345	0,004	18335	10
02/02/2005 00:00	18505	0,009	18504	0	18507	-3
09/03/2005 00:00	18523	0,044	18519	0	18520	-1
18/05/2005 00:00	18380	0,004	18380	0,003	18395	-15
27/07/2005 00:00	18217	0,094	18208	0	18215	-7
31/08/2005 00:00	18176	0,016	18175	0	-	-
05/10/2005 00:00	18183	0,02	18181	0	-	-
14/12/2005 00:00	18323	0,008	18322	0,001	18311	11
18/01/2006 00:00	18508	0,065	18502	0,021	18506	-4
22/02/2006 00:00	18609	0,066	18603	0,011	18607	-4
29/03/2006 00:00	18554	0,07	18559	0,003	18554	5
03/05/2006 00:00	18515	0	18515	0	18518	-3
25/10/2006 00:00	18266	0,022	18264	0	18257	7
29/11/2006 00:00	18259	0,121	18247	0	18254	-7
03/01/2007 00:00	18388	0,074	18381	0	18385	-5
07/02/2007 00:00	18500	0	18500	0	18518	-18
14/03/2007 00:00	18540	0,07	18532	0	18540	-8
18/04/2007 00:00	18496	0,012	18497	0	18499	-2
23/05/2007 00:00	18366	0,058	18368	0,023	18373	-5
27/06/2007 00:00	18267	0,005	18266	0	18261	5
01/08/2007 00:00	18214	0,062	18208	0	18209	-1
05/09/2007 00:00	18173	0,013	18172	0	18178	-6
10/10/2007 00:00	18180	0,023	18178	0	18173	5
14/11/2007 00:00	18254	0,136	18240	0	18249	-9
19/12/2007 00:00	18359	0,082	18357	0,066	18352	5
23/01/2008 00:00	18425	0,049	18427	0,012	18417	10
27/02/2008 00:00	18556	0,035	18552	0	18551	1
rms entre as séries (cm) =					12	

Uma vez que há curva-chave traçada para essa estação, a partir da curva válida para parte do período analisado nesse trabalho, entre 2002 e 2006, foram geradas vazões diárias a partir das cotas registradas pelo altímetro do ENVISAT. Essas vazões foram comparadas com os valores diários de vazão gerados para a estação Pimenteiras, a

partir da mesma curva-chave, porém utilizando as cotas medidas nas réguas fluviométricas. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Comparação entre vazões diárias – régua x ENVISAT.

15130000 - Vazões Diárias				
Data	Método de obtenção	Q diária (m3/s)	Q diária (m3/s)	Diferença (m3/s)
		réguas	ENVISAT	(régua - ENVISAT)
29/01/2003	Curva de descarga	664	675	-11
05/03/2003	Curva de descarga	943	766	177
09/04/2003	Curva de descarga	852	970	-118
14/05/2003	Curva de descarga	651	666	-15
18/06/2003	Curva de descarga	379	408	-29
23/07/2003	Curva de descarga	247	221	26
27/08/2003	Curva de descarga	231	154	77
01/10/2003	Curva de descarga	173	216	-43
05/11/2003	Curva de descarga	212	208	4
10/12/2003	Curva de descarga	245	258	-13
14/01/2004	Curva de descarga	470	469	1
18/02/2004	Curva de descarga	905	897	8
28/04/2004	Curva de descarga	634	592	42
07/07/2004	Curva de descarga	279	255	24
12/08/2004	Curva de descarga	199	193	6
15/09/2004	Curva de descarga	148	136	12
24/11/2004	Curva de descarga	297	292	5
29/12/2004	Curva de descarga	442	469	-27
02/02/2005	Curva de descarga	837	827	10
18/05/2005	Curva de descarga	570	540	30
27/07/2005	Curva de descarga	223	207	16
31/08/2005	Curva de descarga	164	158	6
05/10/2005	Curva de descarga	162	167	-5
14/12/2005	Curva de descarga	393	422	-29
18/01/2006	Curva de descarga	834	822	12
22/02/2006	Curva de descarga	1102	1091	11
29/03/2006	Curva de descarga	959	962	-3
03/05/2006	Curva de descarga	865	854	11
25/10/2006	Curva de descarga	294	305	-11
			rms (m3/s)	46,31

Na análise dessa estação é possível verificar que as cotas apresentadas na Figura 7.4 e Figura 7.5 não correspondem aos valores de níveis apresentados pela Figura 7.7, Figura 7.9 e Figura 7.11. Isto ocorre, pois, conforme descrito no capítulo 6, as cotas registradas pela estação fluviométrica são recalculadas para que possam ser comparadas aos níveis registrados pelo satélite na mesma referência.

7.2 – ANÁLISE DOS DADOS NA ÁREA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA PRÍNCIPE DA BEIRA (15200000)

O local da estação Príncipe da Beira é mostrado pela imagem da Figura 7.12. O traço do ENVISAT está representado pela linha branca. A seta branca está no sentido do fluxo no rio Guaporé demonstrando que a estação *in situ* está a jusante da estação virtual. Entre a estação virtual e a estação fluviométrica (linha amarela) existe uma distância da ordem de 3 km e as seções tem larguras de 660 m e 700 m, respectivamente. A estação Príncipe da Beira, tipo F, não dispõe de dados de seção transversal. Portanto, a largura apresentada na Figura 7.12 foi medida sobre a imagem.

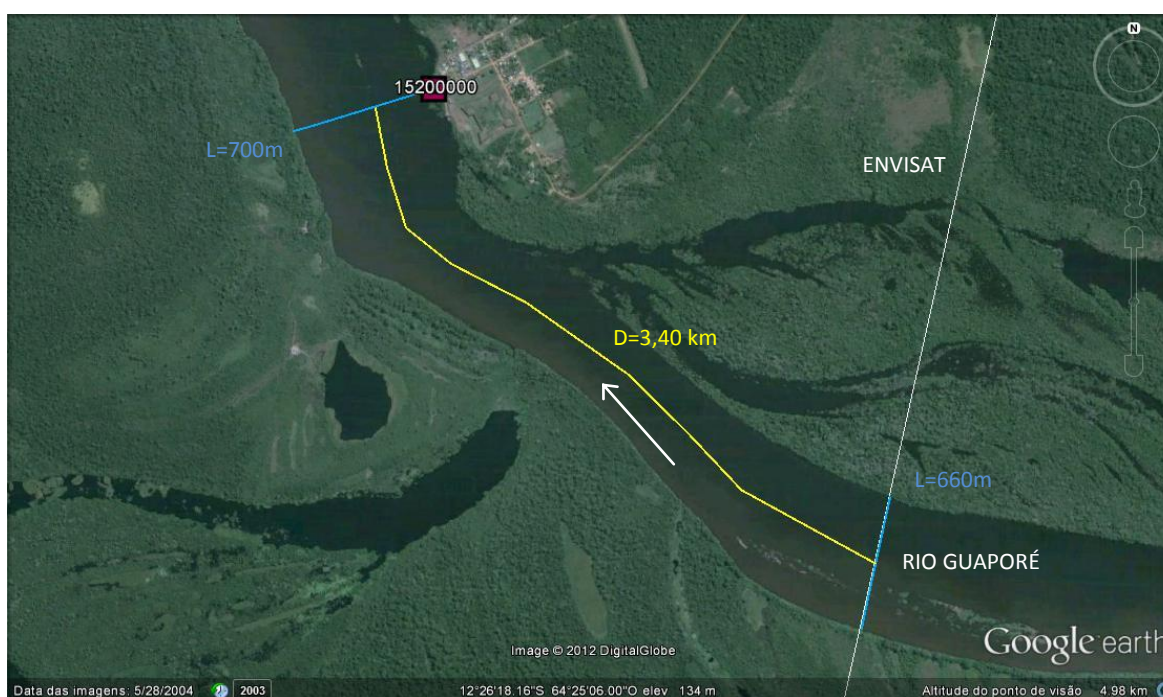


Figura 7.12 – Imagem do Rio Guaporé no local de estudo da estação 15200000 (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

A Figura 7.13 mostra a delimitação (polígono vermelho) da área de análise dos dados altimétricos adquiridos pelo ENVISAT. Assim, a série de níveis altimétricos da estação virtual EV-15200000 foi gerada a partir dos dados adquiridos pelo traço 192 do satélite.



Figura 7.13 – Delimitação da área para geração da estação virtual EV-15200000 (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

Na Figura 7.14 são apresentadas as janelas do programa VALS por meio das quais os dados são selecionados. O polígono desenhado sobre a imagem da Figura 7.13 delimita o perfil de dados altimétricos mostrado na Figura 7.14 e está orientado de acordo com o sentido do rio informado ao programa.

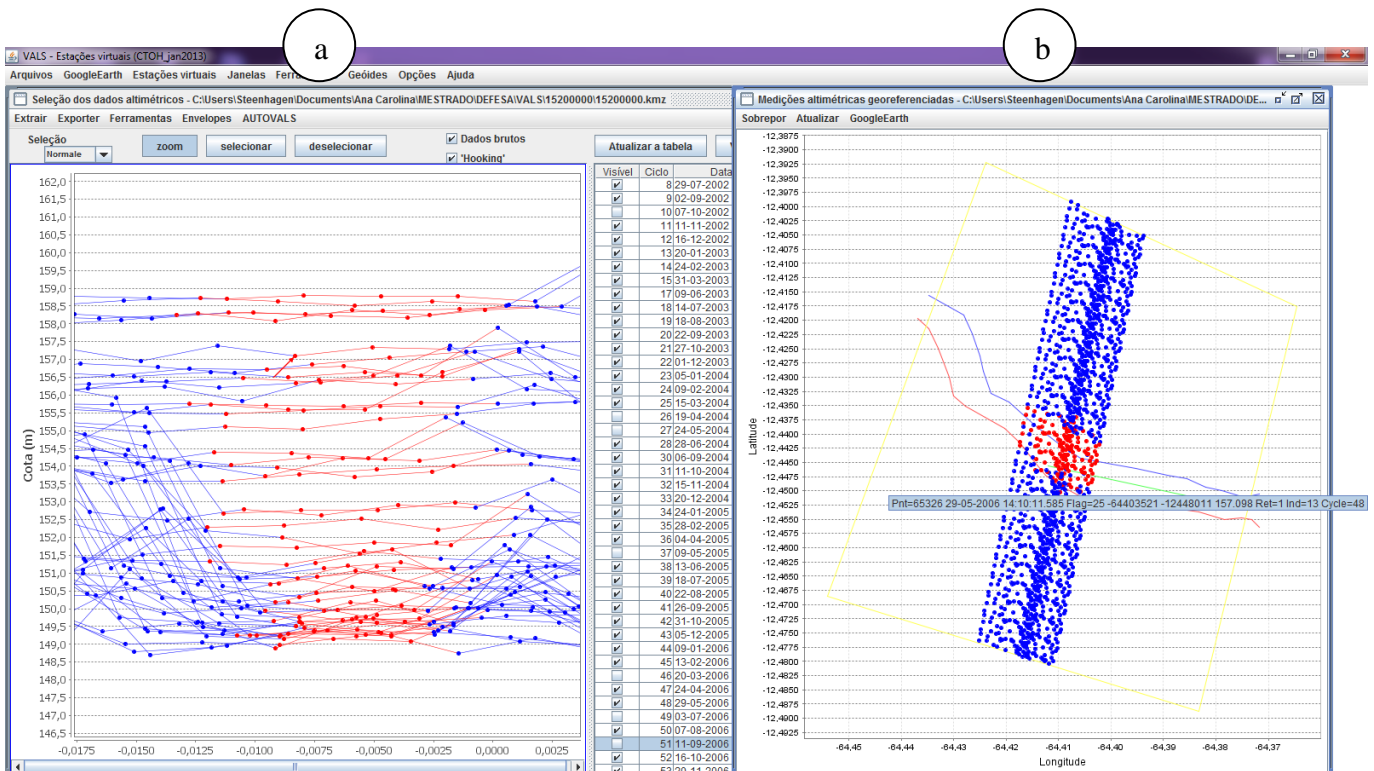


Figura 7.14 – Perfil transversal das alturas fornecidas pelo traço 192 do ENVISAT no cruzamento com o rio Guaporé – EV-15200000 (programa VALS versão 0.6.2)

Conforme mencionado anteriormente, é possível selecionar os dados simultaneamente por meio das duas janelas do programa VALS (a) e (b). A figura mostra que, ao apontar o cursor na janela (b) obtenho os dados da medição (data, número do ciclo e valor medido) e o programa indica o ponto correspondente na janela (a).

A Figura 7.14 também apresenta a tabela por ciclo disponibilizada pelo VALS que possibilita a escolha das medidas separadamente por ciclo do satélite. A Figura 7.15 apresenta as medidas selecionadas na Figura 7.14 sobre a imagem da área de estudo no *Google Earth*.

O perfil altimétrico da Figura 7.14 foi gerado pelos dados medidos pelo satélite no interior da área delimitada da Figura 7.13. As margens esquerda e direita do perfil estão orientadas de acordo com a o sentido de fluxo do rio Guaporé para possibilitar a análise dos dados altimétricos tendo como base a imagem do local.

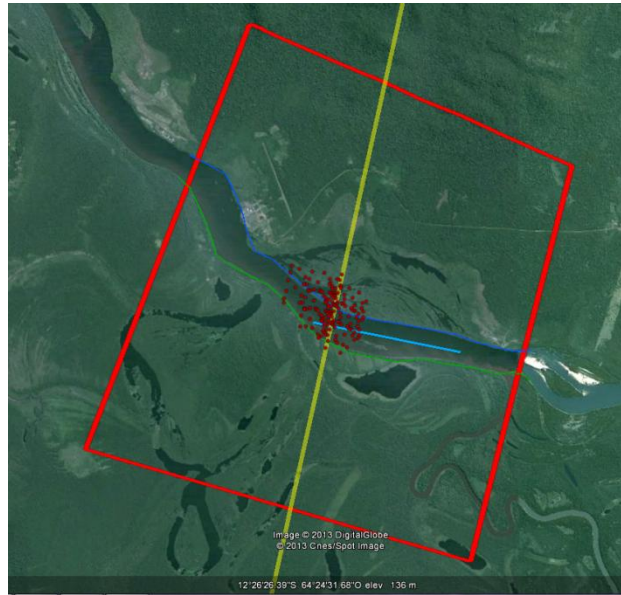


Figura 7.15 – Pontos selecionados na Figura 7.14 visualizados sobre a imagem da área de estudo (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

A seleção da Figura 7.14 (pontos vermelhos) foi feita manualmente conforme descrito. O objetivo da seleção é informar ao programa as medidas representantes de níveis de água excluindo os dados supostamente adquiridos sobre o terreno (pontos azuis).

De posse das medidas válidas é possível gerar a série temporal altimétrica que é apresentada em uma nova janela. Os cálculos das médias, medianas e correção de *hooking* (caso necessário) são realizados pelo programa. Nessa etapa, a janela da série temporal é vinculada ao perfil transversal de dados altimétricos selecionados, como apresentado na Figura 7.16. Ao apontar um dos pontos da série, o ciclo correspondente é identificado por setas. Dessa forma, é possível identificar correções adicionais a serem realizadas na seleção das medidas.

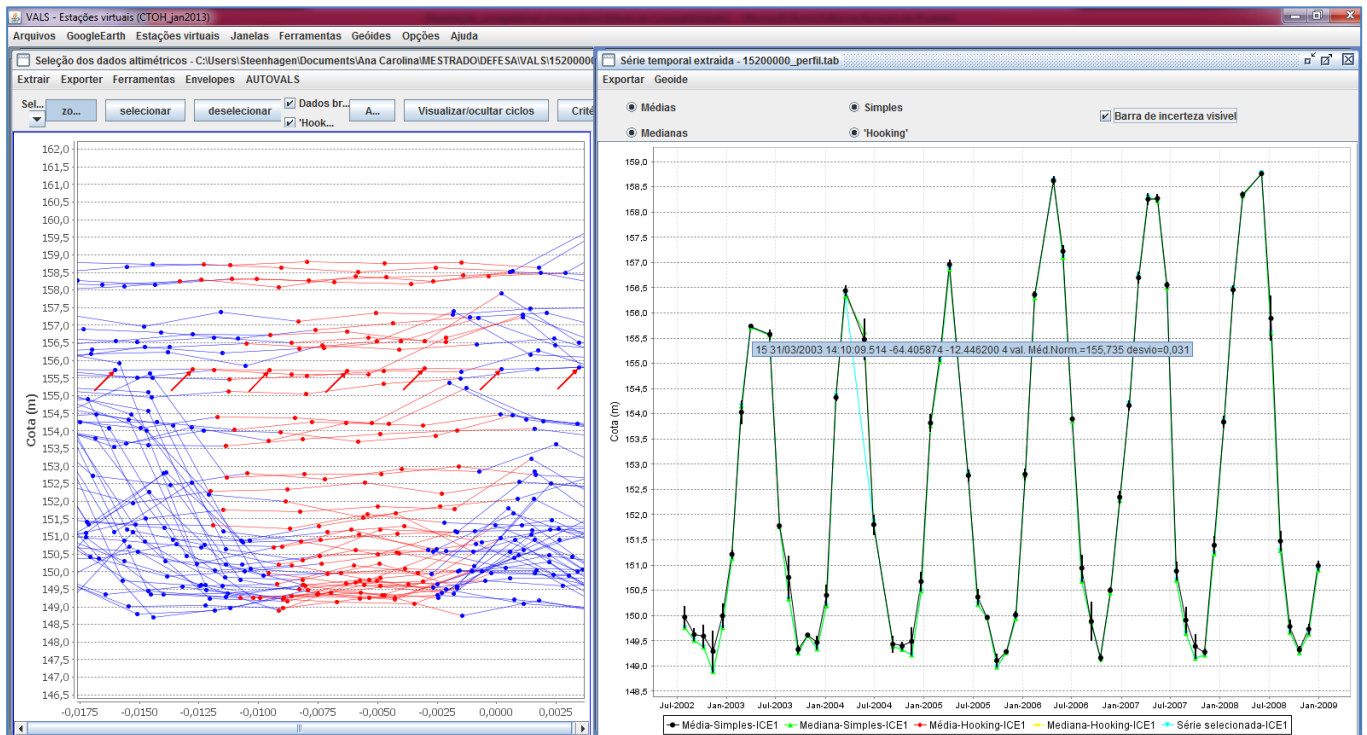


Figura 7.16 – Perfil de dados selecionados e série temporal altimétrica gerada – janelas do VALS referente á EV-15200000 (programa VALS versão 0.6.2)

Na Figura 7.16 a série temporal é formada pelo cálculo por ambos os métodos, médias e medianas. A barra de incerteza em cada ponto também pode ser observada. A correção de *hooking* não foi aplicada.

Sobre a escolha dos pontos, a rotina seguida foi idêntica à descrita para a estação virtual 15130000. A Figura 7.17 apresenta a tabela de dados de cada ciclo referente à seleção das medidas sobre a água e geração da série temporal da EV-15200000.

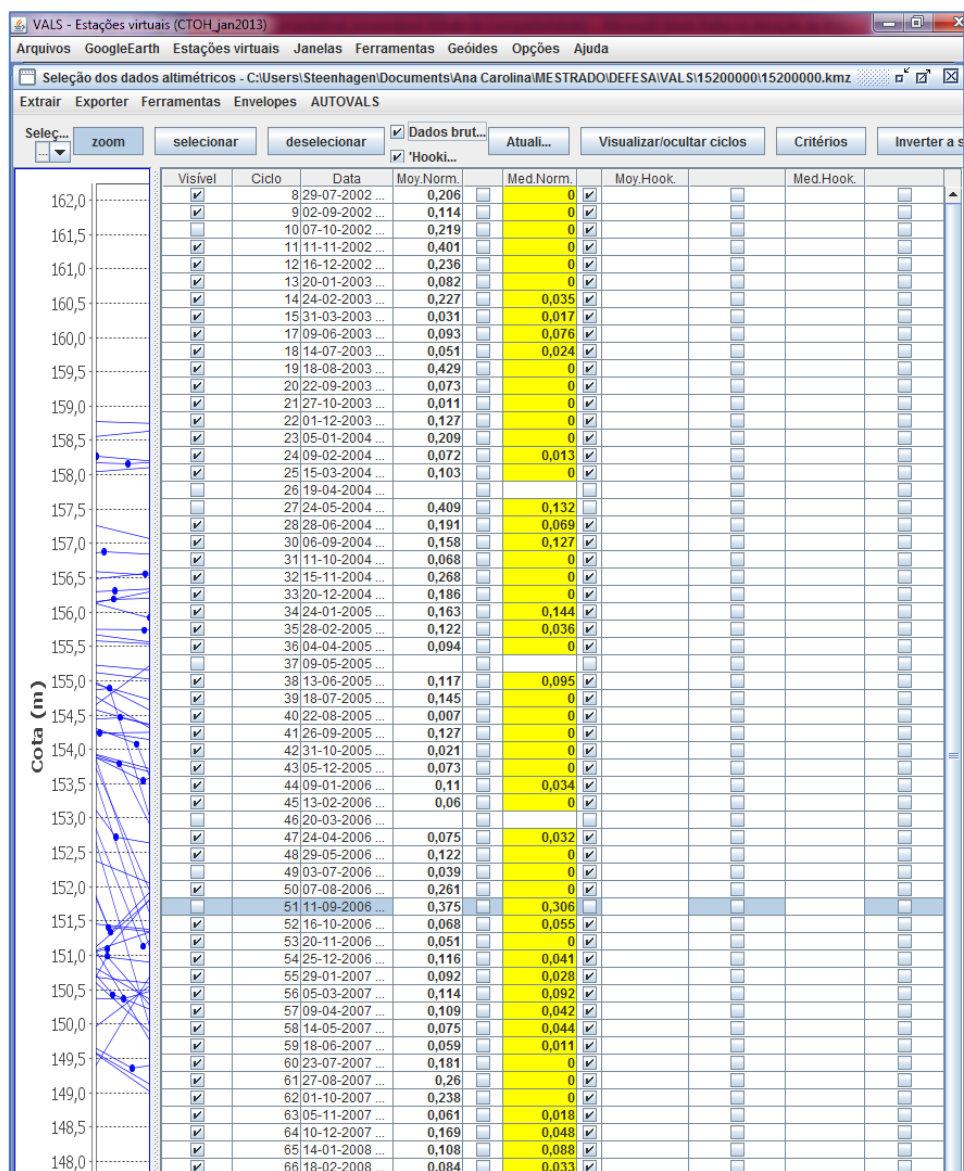


Figura 7.17 – Tabela de ciclos do programa VALS – EV-15200000 (programa VALS versão 0.6.2).

Conforme mostrado pela Figura 7.17 o método de cálculo pelas medianas foi utilizado, pois apresentou menor incerteza que o método das médias em cada ponto.

Uma vez finalizadas as análises, gera-se a série temporal definitiva de níveis altimétricos de água. Essa série será comparada com os dados da série de níveis *in situ*. Os pontos da série correspondem aos pontos calculados na tabela da Figura 7.17.

Assim, a partir das séries altimétrica e fluviométrica as medidas de níveis de água podem ser comparadas. A Figura 7.18 mostra as duas séries de níveis de água, uma extraída por meio do ENVISAT (pontos vermelhos) e outra proveniente da estação de réguas em Príncipe da Beira, código 15200000 (pontos verdes).

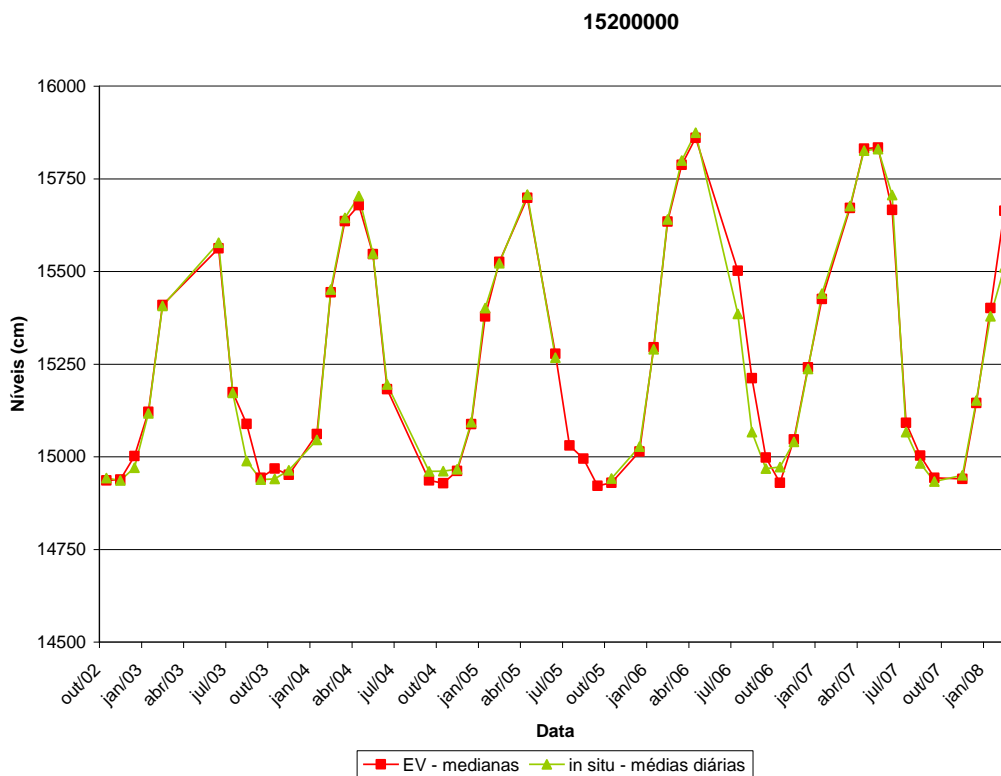


Figura 7.18 - Estação virtual EV-15200000 (traço ENVISAT 192) e estação fluviométrica 15200000 (Príncipe da Beira).

Os níveis constantes no gráfico da Figura 7.18 estão apresentados na Tabela 7.6. Os pontos da série fluviométrica representam a média diária das duas leituras realizadas, as 7 e 17 horas. Os pontos da série altimétrica foram calculados pela mediana dos pontos adquiridos em cada ciclo do satélite, entretanto os valores de cálculo dos pontos pelas médias também constam na tabela para demonstrar a similaridade de resultados.

Tabela 7.6 – Cálculo das alturas altimétricas para comparação com os dados *in situ* – estação 15200000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)
05/09/2002 00:00	14936	0,092	14927	0	14942	-16
10/10/2002 00:00	14938	0,402	14898	0	14936	-38
14/11/2002 00:00	15002	0,235	14978	0	14970	8
19/12/2002 00:00	15121	0,162	15124	0,131	15117	6
23/01/2003 00:00	15409	0,198	15420	0,045	15407	13
08/05/2003 00:00	15562	0,09	15561	0,079	15577	-17
12/06/2003 00:00	15174	0,051	15173	0,024	15172	1
17/07/2003 00:00	15088	0,39	15112	0,035	14988	124
21/08/2003 00:00	14943	0,073	14936	0	14938	-2
25/09/2003 00:00	14968	0,01	14967	0	14940	27
30/10/2003 00:00	14951	0,111	14941	0,021	14963	-22
04/12/2003 00:00	15061	0,22	15073	0,043	15045	27
08/01/2004 00:00	15443	0,12	15439	0,109	15451	-12
12/02/2004 00:00	15636	0,151	15638	0,124	15644	-6
18/03/2004 00:00	15679	0,287	15667	0,04	15703	-36
22/04/2004 00:00	15547	0,378	15524	0,235	15548	-25
27/05/2004 00:00	15182	0,192	15189	0,068	15195	-7
05/08/2004 00:00	14936	0,069	14929	0	14960	-31
09/09/2004 00:00	14928	0,253	14903	0	14961	-58
14/10/2004 00:00	14962	0,23	14972	0,058	14966	5
18/11/2004 00:00	15088	0,27	15090	0,22	15093	-3
23/12/2004 00:00	15378	0,138	15365	0,063	15401	-36
27/01/2005 00:00	15526	0,174	15513	0,096	15522	-9
03/03/2005 00:00	15698	0,188	15694	0,102	15707	-13
12/05/2005 00:00	15278	0,117	15280	0,095	15267	13
16/06/2005 00:00	15030	0,207	15028	0,169		-
21/07/2005 00:00	14995	0,039	14997	0,004		-
25/08/2005 00:00	14922	0,127	14909	0		-
29/09/2005 00:00	14930	0,179	14940	0,021	14941	-1
03/11/2005 00:00	15014	0,059	15012	0,055	15027	-16
08/12/2005 00:00	15295	0,095	15289	0,002	15290	-2
12/01/2006 00:00	15634	0,201	15641	0,089	15640	0
16/02/2006 00:00	15788	0,179	15786	0,145	15799	-14
23/03/2006 00:00	15860	0,076	15863	0,064	15874	-11
01/06/2006 00:00	15502	0,882	15450	0,456	15385	65
06/07/2006 00:00	15212	2,45	15070	0,327	15066	4
10/08/2006 00:00	14998	0,375	14997	0,306	14968	29
14/09/2006 00:00	14930	0,068	14928	0,054	14972	-44
19/10/2006 00:00	15047	0,165	15053	0,051	15040	13
23/11/2006 00:00	15241	0,116	15235	0,041	15237	-2
28/12/2006 00:00	15426	0,089	15432	0,02	15440	-8
01/02/2007 00:00	15671	0,145	15663	0,106	15676	-13
08/03/2007 00:00	15831	0,167	15834	0,142	15826	8
12/04/2007 00:00	15834	0,11	15829	0,068	15830	-1
17/05/2007 00:00	15666	0,059	15661	0,058	15706	-45
21/06/2007 00:00	15091	0,187	15075	0,031	15066	9
26/07/2007 00:00	15003	0,213	15005	0,174	14982	23
30/08/2007 00:00	14943	0,239	14919	0	14933	-14
04/10/2007 00:00	14940	0,061	14934	0,017	14950	-16
08/11/2007 00:00	15145	0,147	15138	0,057	15152	-14
13/12/2007 00:00	15401	0,119	15399	0,104	15379	19
17/01/2008 00:00	15663	0,308	15648	0,075	15511	136
					rms entre as séries (cm) =	35

7.3 – ANÁLISE DOS DADOS NA ÁREA DA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA PROSPERIDADE (15490000)

A Figura 7.19 traz a imagem das estações fluviométrica e virtual de código 15490000. Nessa seção a estação fluviométrica possui largura da ordem de 900 m (linha azul). A linha branca representa a passagem do ENVISAT sobre o rio Madeira que tem sua direção de fluxo indicado pela seta desenhada sobre a imagem.



Figura 7.19 – Imagem do Rio Madeira no local de estudo da estação 15490000 (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

Observa-se na Figura 7.19 que o traço 192 do ENVISAT cruza o rio Madeira próximo à localização da estação de régua. A distância entre a seção fluviométrica e a passagem do satélite sobre rio, medida no centro da seção virtual, é da ordem de 3,4 km.

Nesse local, o traço do ENVISAT não pode ser considerado paralelo à seção da estação fluviométrica. O satélite cruza o rio em diagonal ao sentido da corrente. Entretanto, uma vez que se trata da análise dos níveis de água, a geração da série altimétrica da estação virtual pode ser realizada independentemente da direção de passagem do satélite sobre o rio.

Para delimitar a área considerada na aquisição dos dados altimétricos de níveis de água, foi desenhado o polígono (em vermelho) da Figura 7.20. A série de níveis

altimétricos relativos à estação virtual EV-15490000 é oriunda das medidas efetuadas pelo ENVISAT em seu traço 192.

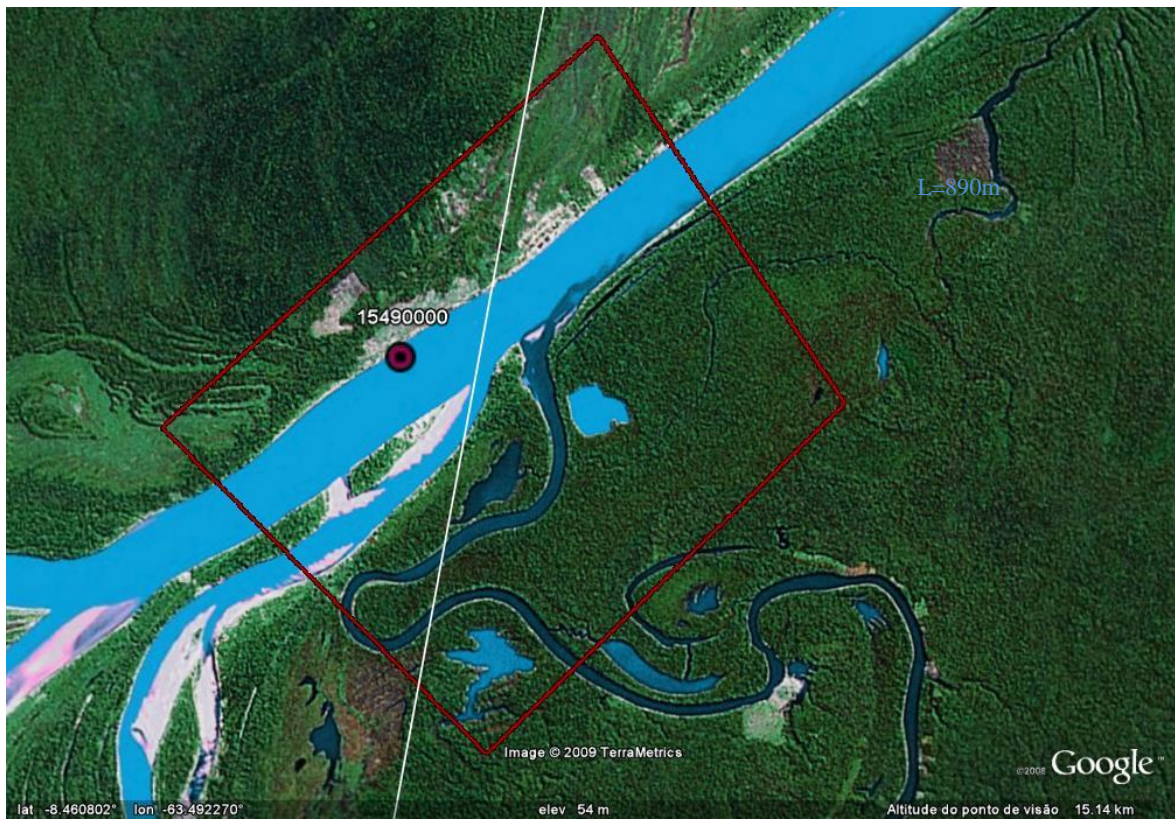


Figura 7.20 – Delimitação da área para geração da estação virtual EV-15490000 (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

Após a delimitação da área de interesse para aquisição dos dados do satélite os níveis altimétricos medidos no interior desses limites são apresentados pelo programa VALS conforme mostrado na Figura 7.21.

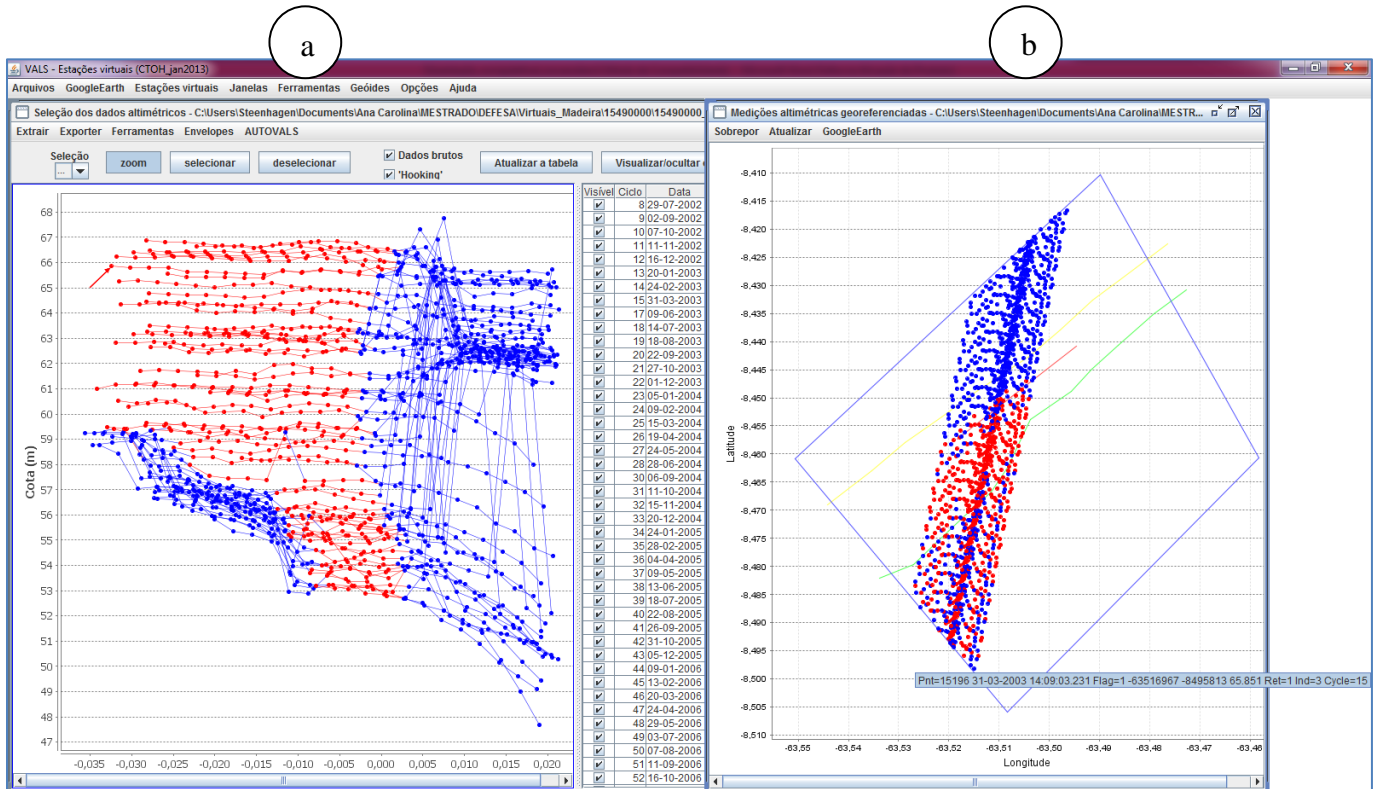


Figura 7.21 – Perfil transversal das alturas fornecidas pelo traço 192 do ENVISAT no cruzamento com o rio Madeira – EV-15490000 (programa VALS versão 0.6.2).

Por meio das janelas apresentadas na Figura 7.21 é possível realizar a seleção considerando simultaneamente a posição das medidas altimétricas no perfil transversal (a) e em planta (b). Ao aproximar o cursor de um ponto na planta, em (b), o mesmo ponto é identificado no perfil, na janela (a). Além de possibilitar o estudo simultâneo da posição das medidas, ainda são apresentadas, na tela, informações relevantes como data, número do ciclo e valor de altura medida.

A tabela dividida em ciclos do satélite também é disponibilizada e representa uma ferramenta importante na escolha dos pontos, que podem ser visualizados ciclo a ciclo. A Figura 7.22 mostra as mesmas medidas do satélite selecionadas na Figura 7.21 sobre a imagem do *Google Earth* na área analisada.



Figura 7.22 – Pontos selecionados na Figura 7.21 visualizados sobre a imagem da área de estudo (desenhado pelo autor sobre imagem do *Google Earth*, data da imagem 31/5/2007).

A Figura 7.21 apresenta o perfil de medidas altimétricas realizadas pelo satélite no local previsto para gerar a EV-15490000. Da mesma forma que nas estações anteriores, os pontos selecionados como representantes de níveis de água aparecem em vermelho. As medidas nos pontos azuis, não selecionados, foram excluídas da série temporal dessa estação.

De posse da seleção realizada, Figura 7.21, são extraídos os níveis altimétricos da estação virtual. Logo, a série temporal altimétrica será gerada pela pelos cálculos das médias, medianas e, caso necessário, aplicação da correção de *hooking*, em cada ciclo do satélite. Assim, as diversas medidas de cada ciclo serão transformadas em uma única medida de altura que dependerá dos pontos selecionados como válidos. A Figura 7.23 mostra as janelas (perfil e série temporal altimétrica). Da mesma forma que nos casos das estações anteriores, as janelas funcionam de forma simultânea. Ao apontar uma medida da série temporal, o ciclo de origem é indicado pelo programa VALS.

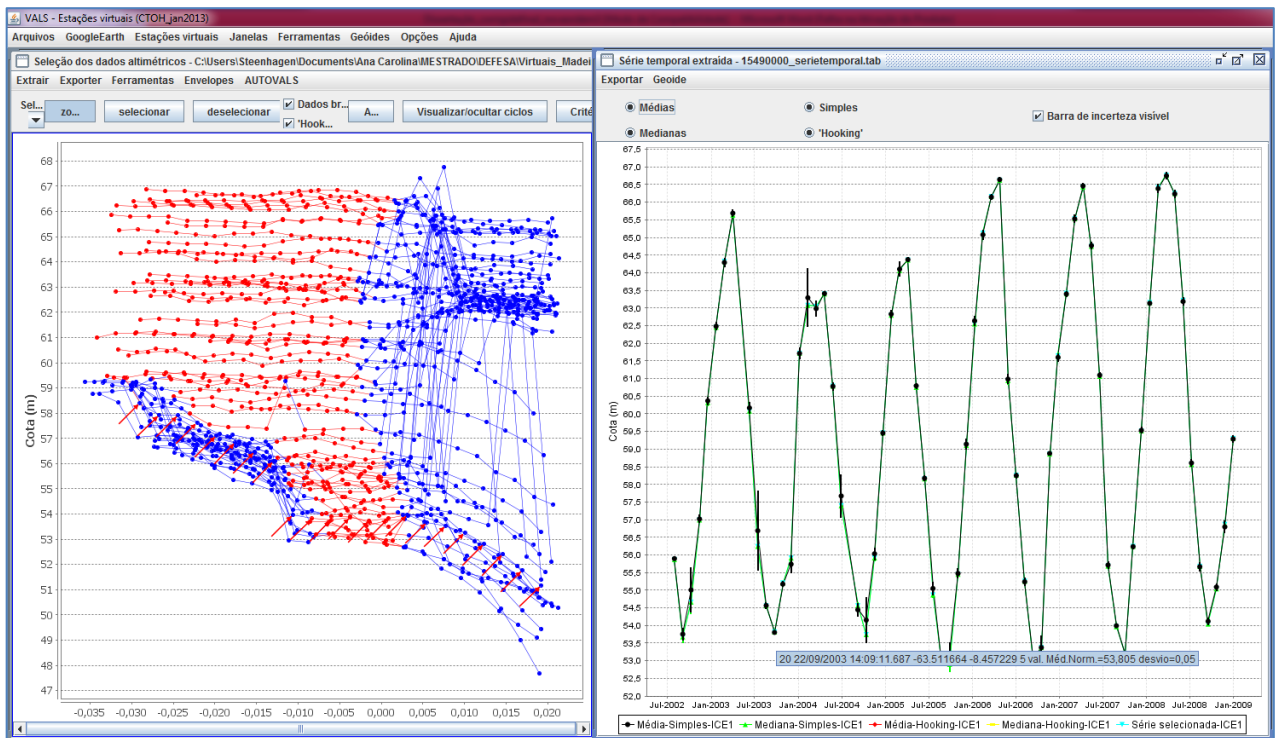


Figura 7.23 – Perfil de dados selecionados e série temporal altimétrica gerada – janelas do VALS referente à EV-15490000 (programa VALS versão 0.6.2).

A série temporal da Figura 7.23 é apresentada pelo cálculo dos pontos utilizando os métodos disponíveis (médias, medianas e correção de *hooking*, quando for o caso). Nessa estação não houve a identificação do efeito de *hooking* e, portanto, a correção não foi aplicada.

A seleção dos pontos na EV-15490000 foi realizada utilizando as mesmas ferramentas utilizadas nas estações anteriores para as análises aplicadas às medidas altimétricas. A Figura 7.24 apresenta a tabela de cálculo das medidas altimétricas. A série temporal da EV-15490000 foi calculada pelo método das medianas, que, conforme mostra a tabela da Figura 7.24 apresentou melhores resultados em relação aos valores de incerteza em cada ponto.

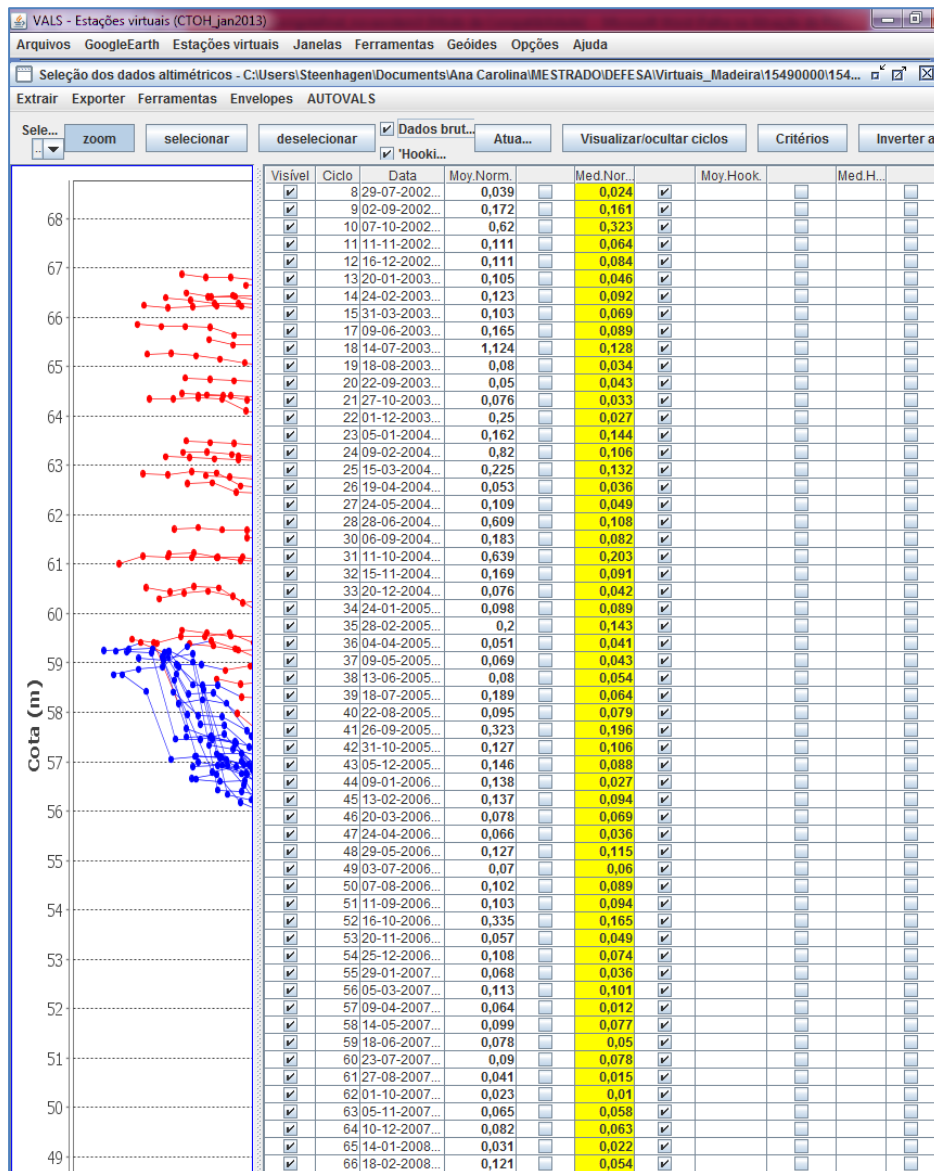


Figura 7.24 – Tabela de ciclos do programa VALS – EV-15490000.

Uma vez que as análises das medidas válidas foram finalizadas é possível gerar a série temporal de dados altimétricos que será comparada com os dados *in situ*.

Os níveis altimétricos calculados pela tabela da Figura 7.24 (pontos vermelhos) juntamente com a série de níveis registrados pela estação fluviométrica Prosperidade, código 15490000 (pontos verdes) foram comparados e plotados no gráfico da Figura 7.25.

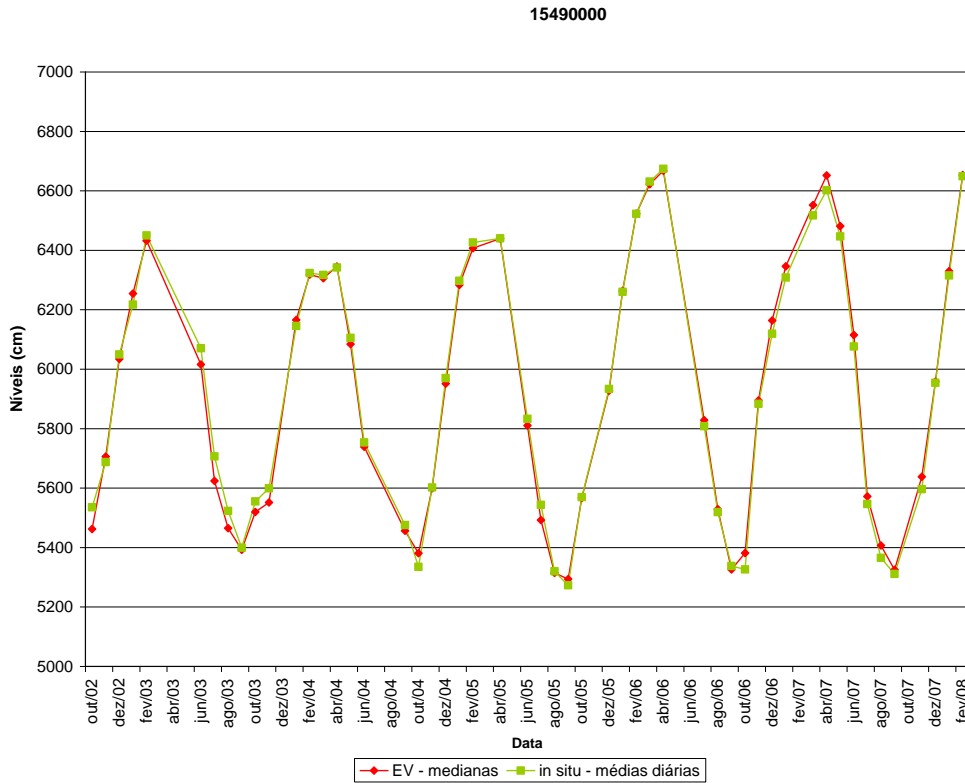


Figura 7.25 - Estação virtual EV-15490000 (traço ENVISAT 192) e estação fluviométrica 15490000 (Prosperidade).

A Tabela 7.7 contém os dados de ambas as séries (*in situ* e altimétrica) utilizados no gráfico da Figura 7.25. Os níveis *in situ* representam a média diária registrada na estação fluviométrica. Já as medidas altimétricas foram calculadas pela mediana dos pontos medidos em cada ciclo de passagem do satélite. O método das medianas foi escolhido por ter apresentado melhores resultados em relação à incerteza, entretanto os pontos calculados pela média também foram apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Cálculo das alturas altimétricas para comparação com os dados *in situ* – estação 15490000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)
06/10/2002 00:00	5490	0,637	5462	0,220	5535	-73
10/11/2002 00:00	5703	0,130	5706	0,109	5687	19
15/12/2002 00:00	6039	0,111	6034	0,084	6049	-15
19/01/2003 00:00	6256	0,103	6254	0,047	6217	37
23/02/2003 00:00	6435	0,121	6432	0,098	6450	-18
08/06/2003 00:00	6024	0,165	6015	0,089	6070	-55
13/07/2003 00:00	5622	0,146	5624	0,121	5706	-82
17/08/2003 00:00	5468	0,088	5465	0,072	5523	-58
21/09/2003 00:00	5394	0,085	5392	0,071	5399	-7
26/10/2003 00:00	5524	0,087	5520	0,079	5555	-35
30/11/2003 00:00	5569	0,345	5551	0,318	5599	-48
04/01/2004 00:00	6175	0,159	6165	0,089	6145	20
08/02/2004 00:00	6309	0,154	6318	0,106	6323	-5
14/03/2004 00:00	6293	0,273	6306	0,132	6317	-11
18/04/2004 00:00	6374	0,905	6345	0,061	6342	3
23/05/2004 00:00	6085	0,113	6084	0,060	6105	-21
27/06/2004 00:00	5735	0,099	5739	0,042	5753	-14
05/09/2004 00:00	5445	0,171	5456	0,074	5475	-19
10/10/2004 00:00	5376	0,118	5381	0,035	5335	46
14/11/2004 00:00	5609	0,158	5599	0,097	5602	-3
19/12/2004 00:00	5950	0,096	5951	0,041	5970	-19
23/01/2005 00:00	6286	0,125	6283	0,105	6297	-14
27/02/2005 00:00	6403	0,265	6407	0,159	6426	-19
03/04/2005 00:00	6438	0,080	6439	0,046	6440	-1
12/06/2005 00:00	5812	0,106	5810	0,076	5833	-23
17/07/2005 00:00	5499	0,091	5492	0,024	5543	-51
21/08/2005 00:00	5319	0,131	5315	0,079	5320	-5
25/09/2005 00:00	5296	0,018	5294	0,000	5273	21
30/10/2005 00:00	5564	0,081	5567	0,028	5569	-2
04/12/2005 00:00	5928	0,149	5927	0,086	5933	-6
08/01/2006 00:00	6271	0,136	6264	0,030	6260	3
12/02/2006 00:00	6514	0,212	6523	0,094	6522	1
19/03/2006 00:00	6621	0,078	6622	0,069	6631	-9
23/04/2006 00:00	6668	0,084	6668	0,036	6674	-6
02/07/2006 00:00	5791	0,506	5828	0,096	5808	20
06/08/2006 00:00	5529	0,102	5529	0,084	5519	9
10/09/2006 00:00	5323	0,104	5326	0,061	5338	-12
15/10/2006 00:00	5352	0,432	5382	0,005	5326	55
19/11/2006 00:00	5894	0,072	5895	0,056	5883	12
24/12/2006 00:00	6161	0,121	6164	0,107	6119	44
28/01/2007 00:00	6343	0,095	6346	0,052	6308	38
04/03/2007 00:00	6560	0,110	6552	0,054	6517	35
08/04/2007 00:00	6653	0,071	6652	0,012	6602	49
13/05/2007 00:00	6482	0,095	6481	0,078	6446	35
17/06/2007 00:00	6116	0,099	6115	0,059	6076	39
22/07/2007 00:00	5581	0,095	5572	0,038	5546	25
26/08/2007 00:00	5408	0,048	5407	0,043	5365	42
30/09/2007 00:00	5323	0,059	5325	0,024	5311	14
04/11/2007 00:00	5631	0,127	5638	0,059	5596	42
09/12/2007 00:00	5956	0,131	5958	0,070	5954	4
13/01/2008 00:00	6328	0,035	6329	0,020	6315	14
17/02/2008 00:00	6648	0,153	6653	0,064	6649	4
				rms entre as séries (cm) =		32

8 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos com as comparações realizadas entre as séries temporais *in situ* e altimétricas, um fator importante a considerar é que a eficiência do altímetro para a captação das variações de comportamento dos corpos d'água está estreitamente ligada à qualidade no momento da escolha dos pontos que realmente representam superfícies de água. Nesse trabalho, isso, supostamente, pôde ser realizado a partir das ferramentas de análise visual oferecidas pelo programa VALS (Figura 7.7, Figura 7.14 e Figura 7.21). Além das ferramentas de análise visual, o conhecimento dos locais estudados acrescenta grande confiabilidade na escolha dos pontos medidos pelo satélite. Conhecer o local possibilita uma visão ampla do perfil apresentado pelos dados do satélite, uma vez que é possível ligar a geometria do perfil transversal visualizado no VALS com o desenho real da seção.

No contexto desse trabalho, a qualidade na escolha dos pontos medidos sobre a água, ou seja, os pontos válidos para a determinação da série temporal de níveis altimétricos, pode ser considerada de fundamental importância. Essa escolha de pontos foi realizada com o auxílio do programa VALS. Mais especificamente, o programa oferece diferentes ferramentas que facilitam as análises das medidas altimétricas considerando, simultaneamente, diversos parâmetros, como a localização das medidas em planta e perfil, erros associados às medidas, visualização da série temporal e visualização das medidas sobre a imagem da área. Esta última com a utilização do *Google Earth*.

Assim, para o objetivo dessa pesquisa, as ferramentas disponibilizadas pelo programa VALS para a escolha das medidas válidas do satélite ENVISAT devem ser utilizadas conforme descrito a seguir.

- 1) Visualização simultânea das medidas em planta e no perfil transversal:
 - a. Análise conjunta dos dados localizados dentro do polígono que limita a área de estudo e dos dados no perfil transversal;
 - b. Análise conjunta dos dados referenciados pela sobreposição das margens do rio dentro do polígono e dos dados no perfil transversal;
 - c. Atualização das seleções realizadas (medidas validadas) em ambas as janelas (planta + perfil);

- d. Visualização das informações dos pontos nas janelas (data de medição, número do ciclo do satélite, valor medido pelo altímetro);
 - e. Apresentação da tabela dos ciclos individualmente:
 - i. Permite a seleção dos pontos separadamente, por ciclo;
 - ii. Permite visualizar a incerteza resultante dos pontos escolhidos em cada ciclo por cada método (médias e medianas).
 - f. Visualização dos pontos selecionados sobre a imagem do *Google Earth*;
 - g. Identificação e aplicação da correção de *hooking*, caso necessário.
- 2) Visualização simultânea das medidas no perfil transversal e da série temporal altimétrica:
- a. Análise conjunta dos pontos da série e do ciclo que deu origem a cada um dos pontos;
 - b. Visualização das informações dos pontos formadores da série (data da medida, número do ciclo, valor altimétrico medido);
 - c. Visualização das séries separadamente:
 - i. Série formada pela média dos pontos selecionados;
 - ii. Série formada pela mediana dos pontos selecionados.
 - d. Visualização das barras de incerteza em cada ponto da série temporal altimétrica.

A escolha do valor da mediana como representante dos níveis de água nas estações virtuais foi estabelecida a partir das incertezas calculadas para cada ciclo do satélite. Cada um dos ciclos é constituído por diversas medidas altimétricas. No processo de seleção das medidas válidas, e, posteriormente na geração da série temporal, essas medidas são transformadas em um único valor de altura de água. Esse processo de determinação dessa altura de água pode ser realizado pelo cálculo das médias ou das medianas.

O valor, seja pelo cálculo da média, ou da mediana, dos valores de medidas pertencentes a cada um dos ciclos selecionados, é o valor que dará origem à série temporal altimétrica. Além da consideração das incertezas calculadas para as estações virtuais determinadas nesse estudo, Frappart *et al.* (2006a) também recomendam o cálculo das alturas pela mediana das medidas altimétricas pertencentes a cada um dos ciclos.

Ainda assim, foram realizados testes comparando os níveis das réguas com as alturas altimétricas fornecidas pelas médias dos pontos individuais. Os resultados, nos três casos, foram similares aos resultados obtidos com o uso das medianas, conforme pode ser observado pela Tabela 7.4, Tabela 7.6 e Tabela 7.7. As séries temporais geradas, tanto pelas medianas, como pelas médias dos pontos individuais do altímetro, acompanharam as séries temporais *in situ*.

As curvas apresentadas na Figura 7.11, Figura 7.18 e Figura 7.25 mostram as séries temporais registradas pelas estações *in situ* (pontos verdes) e pelas estações virtuais (pontos vermelhos). As séries temporais de registros das estações fluviométricas convencionais são formadas pela média diária das duas leituras realizadas diariamente pelos observadores, às 7 horas e às 17 horas. Por outro lado, as séries temporais altimétricas representam a mediana dos níveis medidos pelo satélite nos pontos do interior do polígono selecionado. Assim, em cada ciclo do satélite, tem-se um valor de nível. Esse tratamento realizado nos dados possibilita obter as informações adquiridas pelo altímetro em cada ciclo, com data, latitude e longitude, e altura do nível de água.

Em relação aos parâmetros numéricos de comparação, a Tabela 8.1 apresenta os valores de rms (raiz da média dos quadrados) e erros percentuais obtidos para cada comparação realizada entre os dados de níveis de água *in situ* e altimétricos. Conforme exposto anteriormente, o valor rms representa o desvio padrão das diferenças entre os níveis altimétricos (médias ou medianas) e os níveis *in situ*. O erro percentual é calculado considerando a medição *in situ* como correta, logo, representa o erro da medição altimétrica em relação à medição *in situ* correspondente.

Tabela 8.1 – Parâmetros numéricos de comparação entre as séries *in situ* e altimétrica.

Código das estações que geraram as séries <i>in situ</i> e altimétricas	Número de ciclos considerados ⁽¹⁾	Amplitude aproximada de variação dos níveis (cm)	rms (cm)	Erro (%)
15130000	44 (42)	600	12	2,27
15200000	52 (49)	1250	35	6,33
15490000	52	1600	32	5,40

Observação: (1) os valores entre parênteses na coluna "Número de ciclos considerados" significam o número de efetivo de ciclos utilizados para o cálculo do rms. Por exemplo, 44 ciclos foram selecionados na estação virtual 15130000, porém, devido a falha na série de níveis *in situ*, 2 ciclos foram desconsiderados. (2) Média dos erros percentuais em cada ponto das 3 séries comparadas.

A partir da Tabela 8.1 é possível observar que a estação 15130000 foi a que teve o menor rms calculado. Isso pode estar ligado ao fato dessa estação possuir uma menor amplitude de variação entre os períodos de águas baixas e altas (~ 6 m). Pode-se ver pelo eixo vertical dos gráficos apresentados na Figura 7.11, Figura 7.18 e Figura 7.25, onde os níveis estão representados em centímetros, que as estações 15200000 e 15490000 possuem uma amplitude de variação bem maior (~15 m).

A Tabela 8.1 também apresenta os erros médios percentuais calculados para cada par de séries (*in situ* e altimétrica) comparado. Observa-se que, assim como o resultado de rms, o menor erro médio foi encontrado para a estação 15130000, igual a 2,67%. Nas três comparações entre níveis de água realizadas, os maiores erros foram 10% na estação 15130000, 29% na estação 15490000 e 16% na estação 15490000. Essas três ocorrências de erros maiores ocorrem em períodos de seca nas estações analisadas (Tabela 8.2, Tabela 8.3 e Tabela 8.4).

Tabela 8.2 – Erros percentuais relativos à comparação entre as séries altimétrica e fluviométrica (Estação 15130000).

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis in situ - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
29/01/2003 00:00	18442	0,07	18442	0,057	18436	6	1,08
05/03/2003 00:00	18475	0,065	18479	0	18477	2	0,38
09/04/2003 00:00	18565	0,03	18562	0,01	18513	49	7,66
14/05/2003 00:00	18439	0,111	18438	0,09	18431	7	1,28
18/06/2003 00:00	18315	0	18315	0	18303	12	2,77
23/07/2003 00:00	18217	0	18217	0	18229	-12	-3,23
27/08/2003 00:00	18174	0,02	18172	0	18182	-10	-3,29
01/10/2003 00:00	18214	0	18214	0	18182	32	10,33
05/11/2003 00:00	18211	0,021	18209	0	18208	1	0,30
10/12/2003 00:00	18238	0,076	18239	0,062	18228	11	3,10
14/01/2004 00:00	18354	0,086	18345	0	18349	-4	-0,81
18/02/2004 00:00	18539	0,054	18533	0	18534	-1	-0,11
28/04/2004 00:00	18411	0,068	18404	0,02	18424	-20	-3,55
07/07/2004 00:00	18237	0,005	18237	0	18249	-12	-3,27
11/08/2004 00:00	18200	0,027	18198	0	18200	-3	-0,76
15/09/2004 00:00	18165	0,044	18160	0	18164	-4	-1,26
24/11/2004 00:00	18259	0,014	18257	0	18259	-2	-0,46
29/12/2004 00:00	18342	0,051	18345	0,004	18335	10	2,15
02/02/2005 00:00	18505	0,009	18504	0	18507	-3	-0,49
09/03/2005 00:00	18523	0,044	18519	0	18520	-1	-0,17
18/05/2005 00:00	18380	0,004	18380	0,003	18395	-15	-2,93
27/07/2005 00:00	18217	0,094	18208	0	18215	-7	-2,00
31/08/2005 00:00	18176	0,016	18175	0	-	-	-
05/10/2005 00:00	18183	0,02	18181	0	-	-	-
14/12/2005 00:00	18323	0,008	18322	0,001	18311	11	2,56
18/01/2006 00:00	18508	0,065	18502	0,021	18506	-4	-0,64
22/02/2006 00:00	18609	0,066	18603	0,011	18607	-4	-0,57
29/03/2006 00:00	18554	0,07	18559	0,003	18554	5	0,74
03/05/2006 00:00	18515	0	18515	0	18518	-3	-0,46
25/10/2006 00:00	18266	0,022	18264	0	18257	7	1,86
29/11/2006 00:00	18259	0,121	18247	0	18254	-7	-1,74
03/01/2007 00:00	18388	0,074	18381	0	18385	-5	-0,87
07/02/2007 00:00	18500	0	18500	0	18518	-18	-2,73
14/03/2007 00:00	18540	0,07	18532	0	18540	-8	-1,13
18/04/2007 00:00	18496	0,012	18497	0	18499	-2	-0,38
23/05/2007 00:00	18366	0,058	18368	0,023	18373	-5	-1,07
27/06/2007 00:00	18267	0,005	18266	0	18261	5	1,28
01/08/2007 00:00	18214	0,062	18208	0	18209	-1	-0,35
05/09/2007 00:00	18173	0,013	18172	0	18178	-6	-2,01
10/10/2007 00:00	18180	0,023	18178	0	18173	5	1,52
14/11/2007 00:00	18254	0,136	18240	0	18249	-9	-2,29
19/12/2007 00:00	18359	0,082	18357	0,066	18352	5	0,97
23/01/2008 00:00	18425	0,049	18427	0,012	18417	10	1,81
27/02/2008 00:00	18556	0,035	18552	0	18551	1	0,19

Tabela 8.3 – Erros percentuais relativos à comparação entre as séries altimétrica e fluviométrica (Estação 15200000).

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
05/09/2002 00:00	14936	0,092	14927	0	14942	-16	-4,05
10/10/2002 00:00	14938	0,402	14898	0	14936	-38	-10,09
14/11/2002 00:00	15002	0,235	14978	0	14970	8	1,98
19/12/2002 00:00	15121	0,162	15124	0,131	15117	6	1,16
23/01/2003 00:00	15409	0,198	15420	0,045	15407	13	1,51
08/05/2003 00:00	15562	0,09	15561	0,079	15577	-17	-1,62
12/06/2003 00:00	15174	0,051	15173	0,024	15172	1	0,12
17/07/2003 00:00	15088	0,39	15112	0,035	14988	124	28,85
21/08/2003 00:00	14943	0,073	14936	0	14938	-2	-0,62
25/09/2003 00:00	14968	0,01	14967	0	14940	27	7,06
30/10/2003 00:00	14951	0,111	14941	0,021	14963	-22	-5,39
04/12/2003 00:00	15061	0,22	15073	0,043	15045	27	5,62
08/01/2004 00:00	15443	0,12	15439	0,109	15451	-12	-1,33
12/02/2004 00:00	15636	0,151	15638	0,124	15644	-6	-0,58
18/03/2004 00:00	15679	0,287	15667	0,04	15703	-36	-3,17
22/04/2004 00:00	15547	0,378	15524	0,235	15548	-25	-2,49
27/05/2004 00:00	15182	0,192	15189	0,068	15195	-7	-1,04
05/08/2004 00:00	14936	0,069	14929	0	14960	-31	-7,75
09/09/2004 00:00	14928	0,253	14903	0	14961	-58	-14,45
14/10/2004 00:00	14962	0,23	14972	0,058	14966	5	1,34
18/11/2004 00:00	15088	0,27	15090	0,22	15093	-3	-0,59
23/12/2004 00:00	15378	0,138	15365	0,063	15401	-36	-4,24
27/01/2005 00:00	15526	0,174	15513	0,096	15522	-9	-0,95
03/03/2005 00:00	15698	0,188	15694	0,102	15707	-13	-1,14
12/05/2005 00:00	15278	0,117	15280	0,095	15267	13	1,81
16/06/2005 00:00	15030	0,207	15028	0,169	-	-	-
21/07/2005 00:00	14995	0,039	14997	0,004	-	-	-
25/08/2005 00:00	14922	0,127	14909	0	-	-	-
29/09/2005 00:00	14930	0,179	14940	0,021	14941	-1	-0,25
03/11/2005 00:00	15014	0,059	15012	0,055	15027	-16	-3,31
08/12/2005 00:00	15295	0,095	15289	0,002	15290	-2	-0,22
12/01/2006 00:00	15634	0,201	15641	0,089	15640	0	0,03
16/02/2006 00:00	15788	0,179	15786	0,145	15799	-14	-1,10
23/03/2006 00:00	15860	0,076	15863	0,064	15874	-11	-0,85
01/06/2006 00:00	15502	0,882	15450	0,456	15385	65	7,83
06/07/2006 00:00	15212	2,45	15070	0,327	15066	4	0,72
10/08/2006 00:00	14998	0,375	14997	0,306	14968	29	6,99
14/09/2006 00:00	14930	0,068	14928	0,054	14972	-44	-10,61
19/10/2006 00:00	15047	0,165	15053	0,051	15040	13	2,65
23/11/2006 00:00	15241	0,116	15235	0,041	15237	-2	-0,26
28/12/2006 00:00	15426	0,089	15432	0,02	15440	-8	-0,89
01/02/2007 00:00	15671	0,145	15663	0,106	15676	-13	-1,14
08/03/2007 00:00	15831	0,167	15834	0,142	15826	8	0,60
12/04/2007 00:00	15834	0,11	15829	0,068	15830	-1	-0,11
17/05/2007 00:00	15666	0,059	15661	0,058	15706	-45	-3,91
21/06/2007 00:00	15091	0,187	15075	0,031	15066	9	1,76
26/07/2007 00:00	15003	0,213	15005	0,174	14982	23	5,41
30/08/2007 00:00	14943	0,239	14919	0	14933	-14	-3,69
04/10/2007 00:00	14940	0,061	14934	0,017	14950	-16	-4,14
08/11/2007 00:00	15145	0,147	15138	0,057	15152	-14	-2,40
13/12/2007 00:00	15401	0,119	15399	0,104	15379	19	2,36
17/01/2008 00:00	15663	0,308	15648	0,075	15511	136	14,32

Tabela 8.4 – Erros percentuais relativos à comparação entre as séries altimétrica e fluviométrica (Estação 15490000).

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
06/10/2002 00:00	5490	0,637	5462	0,220	5535	-73	-13,39
10/11/2002 00:00	5703	0,130	5706	0,109	5687	19	2,65
15/12/2002 00:00	6039	0,111	6034	0,084	6049	-15	-1,40
19/01/2003 00:00	6256	0,103	6254	0,047	6217	37	3,03
23/02/2003 00:00	6435	0,121	6432	0,098	6450	-18	-1,22
08/06/2003 00:00	6024	0,165	6015	0,089	6070	-55	-5,05
13/07/2003 00:00	5622	0,146	5624	0,121	5706	-82	-11,42
17/08/2003 00:00	5468	0,088	5465	0,072	5523	-58	-10,89
21/09/2003 00:00	5394	0,085	5392	0,071	5399	-7	-1,65
26/10/2003 00:00	5524	0,087	5520	0,079	5555	-35	-6,24
30/11/2003 00:00	5569	0,345	5551	0,318	5599	-48	-7,82
04/01/2004 00:00	6175	0,159	6165	0,089	6145	20	1,74
08/02/2004 00:00	6309	0,154	6318	0,106	6323	-5	-0,39
14/03/2004 00:00	6293	0,273	6306	0,132	6317	-11	-0,86
18/04/2004 00:00	6374	0,905	6345	0,061	6342	3	0,22
23/05/2004 00:00	6085	0,113	6084	0,060	6105	-21	-1,88
27/06/2004 00:00	5735	0,099	5739	0,042	5753	-14	-1,84
05/09/2004 00:00	5445	0,171	5456	0,074	5475	-19	-3,94
10/10/2004 00:00	5376	0,118	5381	0,035	5335	46	13,12
14/11/2004 00:00	5609	0,158	5599	0,097	5602	-3	-0,47
19/12/2004 00:00	5950	0,096	5951	0,041	5970	-19	-1,91
23/01/2005 00:00	6286	0,125	6283	0,105	6297	-14	-1,06
27/02/2005 00:00	6403	0,265	6407	0,159	6426	-19	-1,34
03/04/2005 00:00	6438	0,080	6439	0,046	6440	-1	-0,05
12/06/2005 00:00	5812	0,106	5810	0,076	5833	-23	-2,72
17/07/2005 00:00	5499	0,091	5492	0,024	5543	-51	-9,17
21/08/2005 00:00	5319	0,131	5315	0,079	5320	-5	-1,59
25/09/2005 00:00	5296	0,018	5294	0,000	5273	21	7,24
30/10/2005 00:00	5564	0,081	5567	0,028	5569	-2	-0,42
04/12/2005 00:00	5928	0,149	5927	0,086	5933	-6	-0,61
08/01/2006 00:00	6271	0,136	6264	0,030	6260	3	0,27
12/02/2006 00:00	6514	0,212	6523	0,094	6522	1	0,04
19/03/2006 00:00	6621	0,078	6622	0,069	6631	-9	-0,53
23/04/2006 00:00	6668	0,084	6668	0,036	6674	-6	-0,38
02/07/2006 00:00	5791	0,506	5828	0,096	5808	20	2,43
06/08/2006 00:00	5529	0,102	5529	0,084	5519	9	1,78
10/09/2006 00:00	5323	0,104	5326	0,061	5338	-12	-3,39
15/10/2006 00:00	5352	0,432	5382	0,005	5326	55	16,40
19/11/2006 00:00	5894	0,072	5895	0,056	5883	12	1,32
24/12/2006 00:00	6161	0,121	6164	0,107	6119	44	3,93
28/01/2007 00:00	6343	0,095	6346	0,052	6308	38	2,85
04/03/2007 00:00	6560	0,110	6552	0,054	6517	35	2,28
08/04/2007 00:00	6653	0,071	6652	0,012	6602	49	3,06
13/05/2007 00:00	6482	0,095	6481	0,078	6446	35	2,42
17/06/2007 00:00	6116	0,099	6115	0,059	6076	39	3,58
22/07/2007 00:00	5581	0,095	5572	0,038	5546	25	4,56
26/08/2007 00:00	5408	0,048	5407	0,043	5365	42	11,15
30/09/2007 00:00	5323	0,059	5325	0,024	5311	14	4,41
04/11/2007 00:00	5631	0,127	5638	0,059	5596	42	6,85
09/12/2007 00:00	5956	0,131	5958	0,070	5954	4	0,37
13/01/2008 00:00	6328	0,035	6329	0,020	6315	14	1,08
17/02/2008 00:00	6648	0,153	6653	0,064	6649	4	0,23

Em relação à variação dos níveis dos rios, vale apresentar algumas considerações sobre os corpos d'água que apresentam regimes de secas e cheias com grandes amplitudes. Para níveis de água baixos, a seção torna-se mais estreita. Dessa forma, haverá um menor número de respostas do eco originadas diretamente sobre a superfície da água. Isso pode ocasionar uma perda dessa informação em meio aos dados recebidos pelos ecos provenientes de outras superfícies adjacentes ao curso do rio. Assim,

o resultado obtido através da mediana seria superestimado. Isso pode ser observado muito sutilmente no gráfico da estação 15200000.

Por outro lado, seções com grandes variações de níveis sofrem mudanças consideráveis nas margens após a passagem da cheia e durante o período de estiagem do rio, quando os taludes ficam desprotegidos e sujeitos à erosão. Esse fato causa, muitas vezes, o deslocamento e até o desmoronamento da seção de réguas. Nessas situações, bastante comuns na Amazônia, os registros são feitos pelo observador carregando erros, muitas vezes difíceis de serem recuperados, uma vez que o intervalo normal de manutenção das estações fluviométricas estudadas é de cerca de três meses. Assim, nessas situações, os registros de níveis *in situ* poderiam ser a fonte do erro. Essa situação é bastante usual na estação fluviométrica 15490000, Prosperidade, localizada na calha do rio Madeira, a jusante de Porto Velho (Figura 7.21).

Assim, nos perfis altimétricos visualizados pelo VALS, nos quais são selecionados os pontos medidos sobre a água (Figura 7.7, Figura 7.14 e Figura 7.21) é possível observar o comportamento da seção durante os ciclos de cheias e secas do rio. Da mesma forma, é possível analisar o comportamento das margens da seção e, ainda, a localização e abrangência das planícies de inundação por meio dos perfis originados pelas medidas realizadas pelo altímetro.

Dessa forma, considerando que o maior erro encontrado nas três análises realizadas foi de 6%, conclui-se que o altímetro mediu os níveis de água nos locais analisados com qualidade satisfatória. Essa conclusão pode ser embasada pela metodologia utilizada pela CPRM na operação da rede hidrometeorológica nacional. Citando o exemplo das medições de descarga líquida realizadas, o parâmetro utilizado para qualificar, inicialmente, uma medição realizada em campo, é a obtenção de um erro máximo de 10% entre o valor de vazão encontrado na medição e o valor determinado pela curva-chave da mesma estação. Evidentemente, esse erro é um indicador inicial da medição e um erro maior que 10% não determina a exclusão da medição sem que antes sejam realizadas outras análises referentes ao valor de vazão encontrado.

Além da análise relativa ao desempenho geral do altímetro nas três estações analisadas, também foram investigados os resultados obtidos na aquisição dos níveis nas épocas e cheia e estiagem dos rios. A Tabela 8.5 apresenta os valores encontrados de rms e erro percentual relativos às secas e cheias, separadamente.

Tabela 8.5 – Resultado das comparações realizadas entre as séries *in situ* e altimétricas para períodos de cheia e estiagem dos rios.

Código da estação	Amplitude aproximada de variação dos níveis (cm)	RESULTADO OBTIDO PARA AS CHEIAS		RESULTADO OBTIDO PARA AS SECAS	
		rms (cm)	Erro (%)	rms (cm)	Erro (%)
15130000	600	14	2,23	11	3,11
15200000	1250	40	4,2	32	7,54
15490000	1600	26	2,12	35	7,32

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8.5 observa-se que o rms apresentou melhores resultados nas épocas de estiagem em duas das três estações estudadas, 15130000 e 15200000. Na estação 15490000, o mesmo resultado foi melhor na cheia. Já o erro percentual obtido foi menor nos períodos de níveis altos em todas as estações. O erro foi maior nas estiagens principalmente nas estações 15200000 e 15490000. Entretanto, em todas as comparações realizadas o erro ficou abaixo dos 10%.

Os períodos foram divididos entre secas e cheias considerando o nível médio histórico da cada uma das estações *in situ*. Foram considerados como níveis mínimos, todos aqueles registrados abaixo da média e, como níveis máximos, todos os registrados acima da média, incluindo ela própria. Optou-se por utilizar esse método de divisão considerando o número reduzido de medições comparadas, limitado pelo período de revisita do satélite que é de 35 dias. Caso as medições próximas a media fossem excluídas, a amostra seria muito pequena e o resultado do rms e do erro percentual seria pouco significativo.

Também é importante observar que, nos períodos de estiagem, os barrancos evidenciados pelo rebaixamento das águas podem ser visualizados, no perfil transversal, pela diferença dos valores fornecidos pelo satélite. Já nos períodos de cheia, as planícies inundadas são visualizadas nos perfis pelo aumento da extensão da lâmina d'água sobre as margens. Essa análise ratifica o fato de que o conhecimento da seção transversal em épocas extremas (cheias e secas) é de grande importância na fase de seleção dos dados que serão utilizados para a criação da estação virtual e, conseqüentemente, na comparação com os registros fornecidos pela estação fluviométrica.

As vazões diárias da estação 15130000 foram geradas durante as análises realizadas nesse trabalho e estão sendo apresentadas aqui com o objetivo de demonstrar outra aplicação dos dados altimétricos do ENVISAT. Esses valores de descarga, apresentados na Tabela 7.5 foram gerados a partir da curva-chave (Figura 7.5) traçada para o perfil da seção da estação de réguas (Figura 7.4) considerando os níveis fornecidos pelo

altímetro do ENVISAT medidos sobre a seção da estação virtual (Figura 7.7). Ou seja, as vazões da estação virtual foram calculadas em função da seção referente à estação fluviométrica, que está distante cerca de 6 km a montante.

A Tabela 8.6 apresenta os valores de erro relativos à comparação entre os dados de vazões altimétricas e fluviométricas. Nessa tabela se observa que o erro médio é de 10% sendo que o maior erro entre as vazões medidas individualmente é de 33%. A tabela foi ordenada em ordem crescente de vazões medidas pela estação fluviométrica para facilitar a análise dos erros encontrados.

Tabela 8.6 – Erros percentuais relativos à comparação entre vazões altimétricos e fluviométricas.

15130000 - Vazões Diárias					
Data	Método de obtenção	Q diária (m3/s)	Q diária (m3/s)	Diferença (m3/s)	Erro
		régua	ENVISAT	(régua - ENVISAT)	(%)
15/09/2004	Curva de descarga	148	136	12	-8,11
05/10/2005	Curva de descarga	162	167	-5	3,09
31/08/2005	Curva de descarga	164	158	6	-3,66
01/10/2003	Curva de descarga	173	216	-43	24,86
12/08/2004	Curva de descarga	199	193	6	-3,02
05/11/2003	Curva de descarga	212	208	4	-1,89
27/07/2005	Curva de descarga	223	207	16	-7,17
27/08/2003	Curva de descarga	231	154	77	-33,33
10/12/2003	Curva de descarga	245	258	-13	5,31
23/07/2003	Curva de descarga	247	221	26	-10,53
07/07/2004	Curva de descarga	279	255	24	-8,60
25/10/2006	Curva de descarga	294	305	-11	3,74
24/11/2004	Curva de descarga	297	292	5	-1,68
18/06/2003	Curva de descarga	379	408	-29	7,65
14/12/2005	Curva de descarga	393	422	-29	7,38
29/12/2004	Curva de descarga	442	469	-27	6,11
14/01/2004	Curva de descarga	470	469	1	-0,21
18/05/2005	Curva de descarga	570	540	30	-5,26
28/04/2004	Curva de descarga	634	592	42	-6,62
14/05/2003	Curva de descarga	651	666	-15	2,30
29/01/2003	Curva de descarga	664	675	-11	1,66
18/01/2006	Curva de descarga	834	822	12	-1,44
02/02/2005	Curva de descarga	837	827	10	-1,19
09/04/2003	Curva de descarga	852	970	-118	13,85
03/05/2006	Curva de descarga	865	854	11	-1,27
18/02/2004	Curva de descarga	905	897	8	-0,88
05/03/2003	Curva de descarga	943	766	177	-18,77
29/03/2006	Curva de descarga	959	962	-3	0,31
22/02/2006	Curva de descarga	1102	1091	11	-1,00
			rms (m3/s)	46,31	10,07

Observa-se, pela Tabela 8.6, que os maiores erros são de 24,86% e de 33,33% entre o resultado da estação fluviométrica e da estação altimétrica. Esses valores são considerados altos, uma vez que ultrapassam 20%. Em relação ao sinal do desvio em relação às vazões medidas pelo altímetro, não se observa tendência. O erro de 24,86% foi medido à maior e o erro de 33,33% foi medido à menor. Por outro lado, analisando em função de magnitude das vazões, ambos os erros estão em medidas de vazões menores. Nesse caso, poderia se atribuir o grande desvio observado ao estreitamento da seção em cotas baixas.

Entretanto, ao buscar os erros maiores que 10%, ou seja, cinco ocorrências (24,86%, 33,33%, 10,53%, 13,85%, 18,77%), é interessante observar que todos ocorreram nas medidas realizadas no ano de 2003. Isso pode representar erros nas medições do altímetro durante esse período. Após essa conclusão, foram analisados os erros de medidas de cotas encontrados na estação Pimenteiras e, também nas demais estações. Essa análise levou ao seguinte resultado em relação aos erros de medidas de cotas entre o início do período de medições (2002) até o final do ano de 2003:

- Estação 15130000: há 1 medida maior que 10% em um total de 1 medida. Logo, o maior erro de medida ocorreu em 2003 (= 10,33%);
- Estação 15200000: há 2 medidas maiores que 10% em um total de 4 medidas. O maior erro ocorreu em 2003 (= 28,85%);
- Estação 15490000: há 3 medidas maiores que 10% em um total de 6 medidas.

Assim, é possível dizer que, considerando as medidas *in situ* corretas, até o final de 2003, o altímetro a bordo do ENVISAT realizou medidas com maiores erros do que nos anos seguintes. Caso a comparação entre as medidas de vazão fosse realizada apenas no período de 2004 em diante, o rms cairia para 17,11 m³/s e o erro percentual seria de 4,50%. Isso pode justificar os desvios altos encontrados nas vazões comparadas durante o mesmo período.

A divisão das séries entre cotas altas e baixas também é interessante para comparar e analisar os resultados obtidos. A Tabela 8.7 apresenta os níveis característicos das estações analisadas, ou seja, níveis médios, máximos e mínimos. Os níveis das réguas estão apresentados na mesma referência das réguas para possibilitar a comparação entre os valores.

Tabela 8.7 – Níveis característicos das estações analisadas.

Código da estação	Amplitude aproximada de variação dos níveis (cm)	rms (cm)	Erro (%)	Nível <i>in situ</i> médio histórico (cm)	Nível <i>in situ</i> máximo histórico (cm)	Nível altimétrico máximo medido (cm)	Nível <i>in situ</i> mínimo histórico (cm)	Nível altimétrico mínimo medido (cm)
15130000	600	12	2,27	18352	18692	18603	18138	18160
15200000	1250	35	6,33	15347	15988	15863	14923	14919
15490000	1600	32	5,40	6034	6777	6668	5229	5294

A partir dos dados da Tabela 8.7 as séries de dados de cada uma das estações analisadas foram divididas em duas: séries de níveis máximos e series de níveis mínimos. As séries foram divididas a partir do valor da média histórica da estação *in situ*. Entre a Tabela 8.8 e a Tabela 8.13 são apresentados os resultados da comparação separada em níveis máximos e mínimos para cada uma das estações.

Tabela 8.8 – Comparação entre níveis máximos *in situ* e altimétricos para a estação 15130000.

DATA	Níveis - MEDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
19/12/2007	18217	0,082	18357	0,066	18352	5	0,97
23/05/2007	18176	0,058	18368	0,023	18373	-5	-1,07
03/01/2007	18183	0,074	18381	0	18385	-5	-0,87
18/05/2005	18323	0,004	18380	0,003	18395	-15	-2,93
23/01/2008	18508	0,049	18427	0,012	18417	10	1,81
28/04/2004	18609	0,068	18404	0,02	18424	-20	-3,55
14/05/2003	18554	0,111	18438	0,09	18431	7	1,28
29/01/2003	18515	0,07	18442	0,057	18436	6	1,08
05/03/2003	18266	0,065	18479	0	18477	2	0,38
18/04/2007	18259	0,012	18497	0	18499	-2	-0,38
18/01/2006	18388	0,065	18502	0,021	18506	-4	-0,64
02/02/2005	18500	0,009	18504	0	18507	-3	-0,49
09/04/2003	18540	0,03	18562	0,01	18513	49	7,65
03/05/2006	18496	0	18515	0	18518	-3	-0,46
07/02/2007	18366	0	18500	0	18518	-18	-2,73
09/03/2005	18267	0,044	18519	0	18520	-1	-0,17
18/02/2004	18214	0,054	18533	0	18534	-1	-0,11
14/03/2007	18173	0,07	18532	0	18540	-8	-1,13
27/02/2008	18180	0,035	18552	0	18551	1	0,19
29/03/2006	18254	0,07	18559	0,003	18554	5	0,74
22/02/2006	18359	0,066	18603	0,011	18607	-4	-0,57
					rms (cm) =		14
					Erro médio (%) =		2,23

Tabela 8.9 – Comparação entre níveis mínimos *in situ* e altimétricos para a estação 15130000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
15/09/2004	18442	0,044	18160	0	18164	-4	-1,26
10/10/2007	18475	0,023	18178	0	18173	5	1,52
05/09/2007	18565	0,013	18172	0	18178	-6	-2,01
27/08/2003	18439	0,02	18172	0	18182	-10	-3,30
01/10/2003	18315	0	18214	0	18182	32	10,35
11/08/2004	18217	0,027	18198	0	18200	-3	-0,76
05/11/2003	18174	0,021	18209	0	18208	1	0,30
01/08/2007	18214	0,062	18208	0	18209	-1	-0,35
27/07/2005	18211	0,094	18208	0	18215	-7	-2,00
10/12/2003	18238	0,076	18239	0,062	18228	11	3,10
23/07/2003	18354	0	18217	0	18229	-12	-3,23
07/07/2004	18539	0,005	18237	0	18249	-12	-3,27
14/11/2007	18411	0,136	18240	0	18249	-9	-2,29
29/11/2006	18237	0,121	18247	0	18254	-7	-1,74
25/10/2006	18200	0,022	18264	0	18257	7	1,86
24/11/2004	18165	0,014	18257	0	18259	-2	-0,46
27/06/2007	18259	0,005	18266	0	18261	5	1,28
18/06/2003	18342	0	18315	0	18303	12	2,77
14/12/2005	18505	0,008	18322	0,001	18311	11	2,56
29/12/2004	18523	0,051	18345	0,004	18335	10	2,15
14/01/2004	18380	0,086	18345	0	18349	-4	-0,81
					rms (cm) =		11
					Erro médio (%) =		3,11

Tabela 8.10 – Comparação entre níveis máximos *in situ* e altimétricos para a estação 15200000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
13/12/2007	15014	0,119	15399	0,104	15379	20	2,38
01/06/2006	15295	0,882	15450	0,456	15385	65	7,85
23/12/2004	15634	0,138	15365	0,063	15401	-36	-4,22
23/01/2003	15788	0,198	15420	0,045	15407	13	1,54
28/12/2006	15860	0,089	15432	0,02	15440	-8	-0,87
08/01/2004	15502	0,12	15439	0,109	15451	-12	-1,30
17/01/2008	15212	0,308	15648	0,075	15511	137	14,34
27/01/2005	14998	0,174	15513	0,096	15522	-9	-0,93
22/04/2004	14930	0,378	15524	0,235	15548	-24	-2,47
08/05/2003	15047	0,09	15561	0,079	15577	-16	-1,60
12/01/2006	15241	0,201	15641	0,089	15640	1	0,05
12/02/2004	15426	0,151	15638	0,124	15644	-6	-0,57
01/02/2007	15671	0,145	15663	0,106	15676	-13	-1,12
18/03/2004	15831	0,287	15667	0,04	15703	-36	-3,15
17/05/2007	15834	0,059	15661	0,058	15706	-45	-3,90
03/03/2005	15666	0,188	15694	0,102	15707	-13	-1,12
16/02/2006	15091	0,179	15786	0,145	15799	-13	-1,08
08/03/2007	15003	0,167	15834	0,142	15826	8	0,62
12/04/2007	14943	0,11	15829	0,068	15830	-1	-0,09
23/03/2006	14940	0,076	15863	0,064	15874	-11	-0,84
					rms (cm) =		40
					Erro médio (%) =		4,20

Tabela 8.11 – Comparação entre níveis mínimos *in situ* e altimétricos para a estação 15200000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
30/08/2007	14936	0,239	14919	0	14933	-14	-3,73
10/10/2002	14938	0,402	14898	0	14936	-38	-10,13
21/08/2003	15002	0,073	14936	0	14938	-2	-0,65
25/09/2003	15121	0,01	14967	0	14940	27	7,02
29/09/2005	15409	0,179	14940	0,021	14941	-1	-0,28
05/09/2002	15562	0,092	14927	0	14942	-16	-4,08
04/10/2007	15174	0,061	14934	0,017	14950	-16	-4,18
05/08/2004	15088	0,069	14929	0	14960	-31	-7,78
09/09/2004	14943	0,253	14903	0	14961	-58	-14,49
30/10/2003	14968	0,111	14941	0,021	14963	-22	-5,43
14/10/2004	14951	0,23	14972	0,058	14966	5	1,30
10/08/2006	15061	0,375	14997	0,306	14968	29	6,96
14/11/2002	15443	0,235	14978	0	14970	8	1,95
14/09/2006	15636	0,068	14928	0,054	14972	-44	-10,65
26/07/2007	15679	0,213	15005	0,174	14982	23	5,38
17/07/2003	15547	0,39	15112	0,035	14988	124	28,82
03/11/2005	15182	0,059	15012	0,055	15027	-16	-3,34
19/10/2006	14936	0,165	15053	0,051	15040	13	2,62
04/12/2003	14928	0,22	15073	0,043	15045	27	5,59
06/07/2006	14962	2,45	15070	0,327	15066	4	0,69
21/06/2007	15088	0,187	15075	0,031	15066	9	1,74
18/11/2004	15378	0,27	15090	0,22	15093	-3	-0,61
19/12/2002	15526	0,162	15124	0,131	15117	6	1,13
08/11/2007	15698	0,147	15138	0,057	15152	-14	-2,42
12/06/2003	15278	0,051	15173	0,024	15172	1	0,10
27/05/2004	15030	0,192	15189	0,068	15195	-7	-1,06
23/11/2006	14995	0,116	15235	0,041	15237	-2	-0,28
12/05/2005	14922	0,117	15280	0,095	15267	13	1,79
08/12/2005	14930	0,095	15289	0,002	15290	-2	-0,24
					rms (cm) =		32
					Erro médio (%) =		7,54

Tabela 8.12 – Comparação entre níveis máximos *in situ* e altimétricos para a estação 15490000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
15/12/2002	5564	0,111	6034	0,084	6055	-21	-1,99
08/06/2003	5928	0,165	6015	0,089	6076	-61	-5,63
17/06/2007	6271	0,099	6115	0,059	6082	33	3,01
23/05/2004	6514	0,113	6084	0,060	6111	-27	-2,43
24/12/2006	6621	0,121	6164	0,107	6125	38	3,38
04/01/2004	6668	0,159	6165	0,089	6151	14	1,20
19/01/2003	5791	0,103	6254	0,047	6223	31	2,52
08/01/2006	5529	0,136	6264	0,030	6266	-3	-0,22
23/01/2005	5323	0,125	6283	0,105	6303	-20	-1,53
28/01/2007	5352	0,095	6346	0,052	6314	31	2,38
13/01/2008	5894	0,035	6329	0,020	6321	8	0,61
14/03/2004	6161	0,273	6306	0,132	6323	-18	-1,33
08/02/2004	6343	0,154	6318	0,106	6329	-11	-0,85
18/04/2004	6560	0,905	6345	0,061	6348	-3	-0,24
27/02/2005	6653	0,265	6407	0,159	6432	-25	-1,77
03/04/2005	6482	0,080	6439	0,046	6446	-7	-0,47
13/05/2007	6116	0,095	6481	0,078	6452	29	2,00
23/02/2003	5581	0,121	6432	0,098	6456	-24	-1,64
04/03/2007	5408	0,110	6552	0,054	6523	29	1,87
12/02/2006	5323	0,212	6523	0,094	6528	-6	-0,36
08/04/2007	5631	0,071	6652	0,012	6608	43	2,68
19/03/2006	5956	0,078	6622	0,069	6637	-15	-0,91
17/02/2008	6328	0,153	6653	0,064	6655	-2	-0,14
23/04/2006	6648	0,084	6668	0,036	6680	-13	-0,75
					rms (cm) =		26
					Erro médio (%) =		2,12

Tabela 8.13 – Comparação entre níveis mínimos *in situ* e altimétricos para a estação 15490000.

DATA	Níveis - MÉDIA (cm)	INCERTEZA	Níveis - MEDIANA (cm)	INCERTEZA	Níveis <i>in situ</i> - MÉDIAS (cm)	rms (mediana satélite x média <i>in situ</i>)	ERRO %
25/09/2005	5490	0,018	5294	0,000	5268	26	9,11
30/09/2007	5703	0,059	5325	0,024	5306	20	6,06
21/08/2005	6039	0,131	5315	0,079	5315	0	0,02
15/10/2006	6256	0,432	5382	0,005	5321	61	17,98
10/10/2004	6435	0,118	5381	0,035	5330	51	14,66
10/09/2006	6024	0,104	5326	0,061	5333	-7	-1,87
26/08/2007	5622	0,048	5407	0,043	5360	47	12,56
21/09/2003	5468	0,085	5392	0,071	5394	-1	-0,35
05/09/2004	5394	0,171	5456	0,074	5470	-14	-2,84
06/08/2006	5524	0,102	5529	0,084	5514	15	2,78
17/08/2003	5569	0,088	5465	0,072	5518	-53	-9,89
06/10/2002	6175	0,637	5462	0,220	5530	-68	-12,42
17/07/2005	6309	0,091	5492	0,024	5538	-46	-8,20
22/07/2007	6293	0,095	5572	0,038	5541	31	5,51
26/10/2003	6374	0,087	5520	0,079	5550	-30	-5,30
30/10/2005	6085	0,081	5567	0,028	5564	3	0,49
04/11/2007	5735	0,127	5638	0,059	5591	47	7,72
30/11/2003	5445	0,345	5551	0,318	5594	-42	-6,95
14/11/2004	5376	0,158	5599	0,097	5597	2	0,40
10/11/2002	5609	0,130	5706	0,109	5682	24	3,41
13/07/2003	5950	0,146	5624	0,121	5701	-77	-10,67
27/06/2004	6286	0,099	5739	0,042	5748	-9	-1,14
02/07/2006	6403	0,506	5828	0,096	5803	25	3,08
12/06/2005	6438	0,106	5810	0,076	5828	-18	-2,09
19/11/2006	5812	0,072	5895	0,056	5878	17	1,92
04/12/2005	5499	0,149	5927	0,086	5928	0	-0,05
09/12/2007	5319	0,131	5958	0,070	5949	9	0,92
19/12/2004	5296	0,096	5951	0,041	5965	-13	-1,37
					rms (cm) =		35
					Erro médio (%) =		7,32

Além das questões apresentadas, ainda vale mencionar a existência de movimentos verticais oriundos, principalmente, da carga hidrológica sazonal que afeta a região amazônica. Esses movimentos são observados por meio de estações permanentes GPS (*global positioning system*). Moreira (2010) realizou medições de carga hidrológica para referenciamento altimétrico de estações hidrológicas na bacia amazônica. As variações verticais, nos locais medidos, foram da ordem de 5 centímetros para mais ou para menos. Esse resultado mostrou que a carga hídrica gerada pela variação de nível de água em rios de grande porte, como os da região amazônica, afeta de maneira significativa (em torno de 10 centímetros) o resultado final quando se avalia séries de níveis obtidos por altimetria espacial.

Para o caso desse estudo, a variação no nível do terreno, ou seja, na estação de réguas, causada pela carga hidrológica, pode ser fator relevante, uma vez que as diferenças entre os registros da estação fluviométrica e os registros do altímetro estariam subdimensionados na cheia. Já no período de seca essas diferenças representariam a realidade.

9 - CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo principal avaliar as medidas realizadas pelo altímetro RA-2, a bordo do satélite ENVISAT, como uma fonte complementar e alternativa de aquisição de dados hidrológicos. Foram analisadas medidas de níveis de água adquiridas sobre águas continentais na sub-bacia do rio Madeira, pertencente à bacia Amazônica.

O objetivo foi alcançado uma vez que os resultados mostraram que as medidas adquiridas pelo altímetro resultaram em séries temporais de níveis altimétricos de água similares às séries temporais resultantes dos registros *in situ*. Partindo do princípio que a série de dados *in situ* reproduziu com fidelidade a variação dos níveis, pode-se assumir que os dados altimétricos do altímetro a bordo do ENVISAT fornecem dados úteis de níveis de águas continentais.

Assim, o objetivo específico dessa pesquisa foi analisar as medidas altimétricas tendo como base os dados registrados pelas estações fluviométricas convencionais. A partir da definição de estações virtuais foram construídas as séries altimétricas a partir dos dados adquiridos em seções de rios próximas às estações convencionais existentes na bacia. Dessa forma, foi possível comparar os resultados obtidos pela medidas do altímetro com as medidas obtidas pelas réguas fluviométricas e, conseqüentemente, avaliar a qualidade dos dados altimétricos.

O altímetro adquire um conjunto de medidas ao longo do traço do satélite. Desse conjunto, extrai-se um sub-conjunto de medidas referente à estação virtual. Entre os dados pertencentes à estação virtual, é preciso selecionar as medidas que representam níveis de água, uma vez que o satélite sobrevoa diferentes tipos de cobertura ao sobrevoar a seção de um rio. Essa seleção de dados é realizada com a utilização do programa VALS.

Após as análises e escolha das medidas adquiridas sobre a água realizadas no estudo, concluiu-se que o VALS disponibiliza ferramentas importantes de apoio à decisão relativa às medidas representativas de níveis de água. Por meio dessas ferramentas foi possível considerar simultaneamente diferentes parâmetros como: localização dos pontos medidos em planta e perfil, erros associados às medidas, visualização da série temporal e visualização das medidas sobre a imagem da área. A partir da utilização dessas

ferramentas foi possível gerar séries temporais de níveis de água nas seções das estações virtuais estudadas.

A partir da comparação entre as séries temporais *in situ* e altimétricas foram calculados dois parâmetros numéricos para avaliação da qualidade das medidas altimétricas. O rms (*root mean square* ou raiz da média dos quadrados) e o erro percentual (desvio da medição altimétrica em relação à medição *in situ* correspondente).

Considerando esses parâmetros, o melhor resultado foi obtido na estação Pimenteiras, código 15130000. Nessa estação também se observa a menor amplitude de variação de níveis entre os regimes de seca e cheia do rio Guaporé. Por outro lado, a estação Príncipe da Beira, apresentou o pior resultado para a mesma comparação e, possui uma amplitude de níveis bem maior.

Esse resultado sugere que nas seções em que ocorrem grandes variações de níveis haverá uma queda na qualidade de aquisição de dados pelo altímetro nas estiagens. Concluiu-se que o estreitamento da seção, e consequente aumento de ruídos dentro da janela de aquisição de dados, diminui a eficiência do altímetro uma vez que haverá uma extensão menor de água sob o instrumento.

Já nos períodos de cheia, essas seções sofrem pela erosão das margens. Nesse período, são os registros *in situ* que perdem a qualidade, uma vez que as régua tendem a ser deslocadas ou removidas pela passagem da cheia.

Assim, concluiu-se que, na área de estudo dessa pesquisa, as estações com grande variação de níveis possuem os maiores desvios de níveis entre os dados *in situ* e altimétricos.

Também foram realizadas análises separadas da qualidade dos dados adquiridos pelo altímetro nas águas altas e baixas. Após essa investigação, concluiu-se que, considerando o erro percentual, o altímetro apresenta melhor qualidade nas águas altas. Isso pode ser atribuído a um maior número de medidas sobre a água, consequência da elevação do nível do rio atingindo a parte mais larga da seção, ou, ainda, a ocorrência de zonas de inundação. Por outro lado, ainda que o resultado tenha se mostrado pior nas águas baixas, ainda está abaixo dos 10% em todas as estações.

Considerando o rms, a conclusão não é tão evidente, já que houve boa qualidade em ambas as situações, cheias e estiagens. Assim, conclui-se que o altímetro registrou dados com qualidade em épocas de níveis altos e baixos das águas nas estações pesquisadas.

Outro fator relevante nos resultados dessa pesquisa é a existência de movimentos verticais causados pela carga hidrológica sazonal observada na Amazônia. Essa variação tem consequência na comparação entre os níveis *in situ* e altimétricos. Uma vez que as réguas se movimentam com o terreno, concluiu-se que, durante a cheia, tais movimentos verticais causam o subdimensionamento das diferenças existentes entre os níveis *in situ* e altimétricos.

Com isso, o trabalho ressaltou a importância do conhecimento prévio das características da seção na aquisição de medidas altimétricas de níveis de água continentais. O tipo de seção e o comportamento da seção nos regimes de secas e cheias do rio é o diferencial necessário à confiabilidade nas análises. Essa confiabilidade mostrou-se necessária para a validação de resultados bons e ruins do altímetro.

Em relação comparação realizada entre vazões altimétricas e fluviométricas da estação Pimenteiras, o resultado apresentou um grande desvio entre os valores de descarga. Pela análise dos dados originados pelo altímetro foi possível concluir que os erros mais significativos, em relação às vazões da estação *in situ*, foram em descargas geradas pelas medidas efetuadas no ano de 2003. A partir dessa análise, concluiu-se que, na estação Pimenteiras, os dados altimétricos não resultaram em vazões confiáveis durante esse período. Essa ocorrência foi verificada por meio de análises de dados no mesmo período obtidos nas demais estações estudadas. Além disso, retirando-se da análise os dados medidos em 2003, os desvios entre as vazões ficaram abaixo da metade do valor obtido considerando o período inteiro de dados.

A pesquisa apresentada também contribuiu para confirmar a importância dos dados altimétricos, disponíveis e confiáveis, às diversas áreas da hidrologia. A observação das duplas de séries temporais (*in situ* e altimétricas), nos três casos, possibilita dizer que os dados obtidos através da altimetria por satélite podem auxiliar, de forma bastante prática, o preenchimento de falhas da série histórica de dados. Essa conclusão é importante, pois aborda o problema a partir de outra referência, ou seja, a estimação de

níveis de água nas réguas fluviométricas a partir dos dados altimétricos. Nesse caso, a base de dados é altimétrica.

Da mesma forma, os dados altimétricos também podem ser úteis aos trabalhos de consistência de dados fluviométricos. Na consistência de algumas bacias não há grande disponibilidade de dados de estações de apoio, por exemplo. Nesse caso, dados altimétricos poderiam ser utilizados nas análises e no tratamento de erros nos estudos de cotogramas de diversas estações num mesmo rio. Problemas de vazões negativas também poderiam ser analisados por meio de dados adicionais de cotas e, conseqüentemente, vazões, no caso de haver algum traço de satélite próximo à estação analisada, o que possibilitaria a criação de uma estação virtual de apoio.

Concluiu-se também que, em estudos de regionalização de vazões, os dados adicionais adquiridos pelos altímetros também representam uma fonte alternativa de informações interessante. Quanto maior o número de estações fluviométricas, melhor será a análise regional das vazões. Entretanto, no caso de estudos de regionalização de vazões será necessário determinar vazões na seção da estação virtual. Em casos de estudos onde se verifica que os dados adicionais do altímetro poderiam representar um grande ganho de informações, devido à escassez de pontos de monitoramento ou localização estratégica da estação virtual, seria possível realizar uma medição de descarga líquida na estação virtual.

Essas medições podem ser usadas para validar a equação regional na região de interesse. Com a realização dessa medição de vazão nas estações virtuais mais importantes para um estudo de regionalização seria possível, com a área de drenagem e a precipitação, estimar a vazão usando a equação regional determinada para a estação fluviométrica. Isso poderia validar ou não a equação regional de vazão determinada no estudo. Citando o exemplo de estudos de regionalização de vazão mínima ($Q_{95\%}$), caso exista um dado de vazão medida durante o período de seca, seria possível verificar se a equação regional de $Q_{95\%}$ está estimando com eficiência a vazão medida *in situ* em uma estação durante a estiagem.

Assim, esse trabalho contribuiu para afirmar que os dados altimétricos podem promover o aumento dos pontos monitorados em 10 vezes em relação o número atual de pontos. Além disso, o uso de estações virtuais contribui para a identificação e determinação de locais onde há maior necessidade de investimento no monitoramento convencional.

Dessa forma, conclui-se que os dados medidos pelo satélite são úteis tanto em locais onde existem dados, pois complementam, verificam e fornecem confiabilidade aos dados disponíveis; como em locais onde não se dispõe de dados, uma vez que representam a única fonte de informação hidrológica local. E, finalmente, concluiu-se que o altímetro a bordo do satélite ENVISAT se apresentou eficiente como ferramenta no registro de níveis nos rios estudados.

Portanto, a partir das conclusões apresentadas nesse trabalho, recomenda-se:

- Realizar, em locais de interesse, instalações de estações fluviométricas nas mesmas seções de estações virtuais. Esses dados seriam interessantes na medida em que representariam a aquisição contínua de informações naquela estação virtual. Além disso, seriam uma fonte de dados para diferentes estudos em altimetria por satélite em águas continentais;

- Investir no processo de nivelamento das réguas fluviométricas a partir de receptores GPS. Esse tipo de projeto contribui para uma proposta inicial de uma metodologia de nivelamento para a rede hidrometeorológica nacional administrada pela Agência Nacional de Águas, onde, em princípio, as estações fluviométricas encontram-se sob referência altimétrica arbitrária;

- Que os dados adquiridos via satélite continuem sendo objeto de estudo para aplicações no campo da hidrologia. Assim como nesse trabalho foram empregados dados altimétricos de superfícies fluviais obtidos pelo ENVISAT com periodicidade de 35 dias, outros satélites podem ser estudados. Os dados, de livre acesso e sem custos para o usuário final podem incentivar pesquisas em outras áreas e novas abordagens nos campos de recursos hídricos e meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental – AHIMOC. “Serviços de monitoramento Ambiental da Hidrovia do Rio Madeira para Cumprimento das Condições Específicas da Renovação de Instalação nr. 062/99-IBAMA”. Disponível em http://www.ahimoc.com.br/download/Monitoramento_Ambiental_2003_Hidrovia_do_Madeira.pdf. Acesso em 21 nov. 2008.
- Alsdorf, D. E., Melack, J. M., Dunne, T. et al. (2000). “Interferometric radar measurements of water level changes on the Amazon floodplain”. *Nature*, 404, 174-177.
- Alsdorf, D. E., Birkett, C. M., Dunne, T., Melack, J. M., Hess, L. (2001a). “Water level changes in a large Amazon lake measured with spaceborne radar interferometry and altimetry”. *Geophysical Research Letters*, 28 (14), 2671-2674.
- Alsdorf, D. E., Smith, L. C., Melack, J. M. (2001b). “Amazon floodplain water level changes measured with interferometric SIR-C radar”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (2), 423-431.
- Alsdorf, D. E., Lettenmaier, D. P. (2003). “Tracking fresh water from space”. *Science*. 301, (5639), 1491-1494.
- ANA. Hidro 1.2.1 – “Sistema de informações hidrológicas”. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=6010#hidro108>. Acesso em 13/05/2008.
- ANA. HidroWeb – “Sistema de Informações Hidrológicas”. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb.asp?TocItem=4100>. Acesso em 13/01/2013.
- AVISO (2008). “Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques”. Disponível em: http://www.jason.oceanobs.com/html/alti/principe_fr.html. Acesso em: 03/05/2008.
- Bamber, J. L. (1994). “Ice sheet altimeter processing scheme”. *International Journal of Remote Sensing*, 15 (4) 925-938.

- Birkett, C. M. (1995a). "The global remote sensing of lakes, wetlands and rivers for hydrological and climate research". *IEEE Trans.* 1979-1981.
- Birkett, C. M. (1995b). "The contribution of Topex/Poseidon to the global monitoring of climatically sensitive lakes". *Journal of Geophysical Research*, 100 (C12), 25179 – 25204.
- Birkett, C. M. (1998). "Contribution of the Topex NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands". *Water Resources Research*, v. 34, n.5, p. 1223–1239.
- Birkett, C. M., Mertes, L. A. K., Dunne, T., Costa, M. H., Jasinski, M. J. (2002). "Surface water dynamics in the Amazon basin: Application of satellite radar altimetry". *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20), 8059-8080.
- Bosch, W. (2002). "Multi mission satellite altimetry continuing". *IAG CSTG Bulletin*, 17, 60-63.
- Brown, G. S. (1977). "The average impulse response of a rough surface and its applications". *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 25 (1), 67-74.
- Callede, J., Guyot, J.L., Ronchail, J., Molinier, M., Oliveira, E. (2002). "The River Amazon at Óbidos (Brazil): Statistical studies of the discharges and water balance". *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*. 47 (2), 321-333.
- Calmant, S. (2009). "Esquema da geometria do efeito *hooking*." Figura fornecida em novembro de 2009.
- Calmant, S. (2012). "Satellite Altimetry for Rivers". Encontro do Projeto Dinâmica Fluvial do Sistema Solimões-Amazonas. Rio de Janeiro, Brasil. 36p.
- Calmant, S. e Seyler, F. (2006). "Continental surface waters from satellite altimetry". *Comptes Rendus Geosciences*, 338, 1113-1122.
- Calmant, S., Seyler, F., Cretaux, J. F. (2008). "Monitoring continental surface waters by satellite altimetry". *Survey in Geophysics*. 29 (4-5), 1573-0956.

- Cartwright, D. E.; Tayler, R. J. (1971). "New computations of the tide-generating potential". *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 23, 45-74.
- Cartwright, D. E.; Edden, A. C. (1973). "Corrected tables of tidal harmonics". *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 33, 253-264.
- Carvalho, D. F., Batista da Silva, L. D. Escoamento Superficial. In: Carvalho, D. F., Batista da Silva, L. D. *Hidrologia*. 2006. 95-115. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>>. Acesso em 23/12/2012.
- Cazenave, A., Bonnefond, P., DoMinh, K. (1997). "Caspian sea level from Topex/Poseidon altimetry: level now falling". *Geophys. Res. Lett.* 24, 881-884.
- Cazenave, A., Massonnet, D. (2004). "*La Terre vue de l'espace*". Belin-Pour la Science, Collection Bibliothèque Scientifique, Paris, FR, 128p.
- Costa, M. H., Foley, J. A. (1999). "Trends in the hydrological cycle of the Amazon basin". *J. Geophys. Res.* 104, 14189-14198.
- Creteaux, J. F. e Birkett, C. (2006). "Lake studies from satellite radar altimetry". *Comptes Rendus. Geosciences*, 338 (14-15), 1098-1112.
- Cudlip W., Ridley J. K., Rapley C. G. (1992). "The use of satellite radar altimetry for monitoring wetlands". In: *Remote Sensing and Global Change* (Proceedings of the 16th Annual Conference of Remote Sensing Society, London, UK), 207-216.
- Dow J. M., Martinez Fadrique F.M., Zandbergen R. (1999). "High precision altimetry from the ENVISAT mission." *Adv. Space Res.*, 23 (4), 757-762.
- ESA Earthnet Online. Disponível em <http://envisat.esa.int/handbooks/ra2-mwr/CNTR1-1-2.htm>. Acesso em 19 dez. 2012.
- ESA Earthnet Online. Disponível em https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/satellite#_56_INSTANCE_uBh2_matmp. Acesso em 13 jan. 2013.

- ESA Earthnet Online. Disponível em <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat/instruments>. Acesso em 13 jan. 2013.
- European Space Agency. Disponível em <http://earth.esa.int/riverandlake/description.htm>. Acesso em 10 mar. 2012.
- Farias Junior, J. E. F., Botelho, R. G. M. “Análise comparativa do tempo de concentração: um estudo de caso na bacia do rio Cônego, município de Nova Friburgo/RJ.” In: XIX Simpósio BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011, Maceió. Anais do XIX Simpósio BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2011.
- Frappart, F., Seyler, F., Martinez, J. M., Leon, J. G., Cazenave, A. (2005). “Floodplain water storage in the Negro river basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels”. *Remote Sens. Environ.*, 99 (4), 387-399.
- Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., Cazenave, A. (2006a). “Preliminary results of ENVISAT RA-2 derived water levels validation over the Amazon basin”. *Remote Sensing of Environment*, 100, 252–264.
- Frappart, F., Ramillien, G., Biancamaria, S., *et al.* (2006b). “Evolution of high-latitude snow mass derived from the GRACE gravimetry mission (2002-2004)”. *Geophysical Research Letters*, 33 (2), L02501.
- Fu, L. L., Cazenave, A. (2001). *Satellite Altimetry and Earth Science, A Handbook of Techniques and Applications*. Academic Press., London, UK, 464p.
- Gardini, B., Graf, G., Ratier, G. (1995). “The instruments on ENVISAT”. *Acta Astronautica*, 37, 301-311.
- GRGS. Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale. Disponível em: <http://grgs.obs-azur.fr/index.html>. Acesso em: 03/04/2009.
- Guijarro, J., Auriol, A., Costes, M., Jayles, C., Vincent, P. (2000). “MWR and NORIS – Supporting Envisat’s Radar Altimetry Mission”. *ESA Bulletin*, 104, 41-46.

- Guyot, J. L.; Molinier, M.; de Oliveira, E.; Guimaraes, V.; Chaves, A. (1993). "Hydrologie du Bassin de l'Amazone. In: Olivry, J. C. e Boulegue, J. (eds.). *Grands bassins fluviaux péri-atlantiques: Congo, Niger, Amazone*. Orstom, Paris, França, 335-344.
- Guzkowska, M. A. J., Rapley, J. K., Cudlip, Birkett, C. M., Scott, R. F. (1990). "Developments in inland water and land altimetry". *Eur. Agency Conf. Rep.*
- Ibiapina, A. V.; Fernandes, D.; de Carvalho D. C.; de Oliveira, E.; da Silva, M. C. A. M.; Guimarães, V. S. (1999). "Evolução da Hidrometria no Brasil". In: Freitas, M. A. V. (org.) *O Estado das Águas no Brasil – 1999 - Perspectivas de Gestão e Informação de Recursos Hídricos*. ANNEL-SRH/MMA-OMM, Brasília, Brasil, 121-137.
- Koblinsky, C. J., Clarke, R. T., Brenner, A. C., Frey, H. (1993). "Measurement of River Level Variations with Satellite Altimetry". *Water Resources Research*, 29 (6), 1839-1848.
- Laboratoire d'Etudes en Oceanographie et Geodésie Spatiale. (<http://www.legos.obsmp.fr/soa/hydrologie/hydroweb/>).
- Laxon, S. (1994). "Sea ice altimeter processing scheme at the EODC". *International Journal of Remote Sensing*, 15 (4), 915-924.
- Lefavour, G., Alsdorf, D. (2005). "Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shutter radar topography mission digital elevation model". *Geophysical Research Letters*, 32, L17404.
- Lefebvre, M., Stewart, R. (2006). "History of Altimetry, 1960-1992." Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. European Space Agency. Venice, Italy.
- Legrésy, B., Rémy, F. (1997). "Surface characteristics of the Antarctic ice sheet and altimetric observations". *Journal of Glaciology*, 43 (144), 197-206.
- Leon, J. G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M. P., Cauhopé, M., Frappart, F., Filizola, N., Fraizy, P. (2006). "Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro river based on satellite altimeter data and model discharges". *J. Hydrol.*, 328 (3-4), 481-496.

- Leon, J. G., Bonnet, M. P., Cauhopé, M., Calmant, S. and Seyler, F. (2005). “Distributed water flow estimates of the upper Negro river using a Muskingum-Cunge routing model constrained by satellite altimetry”. Unpublished.
- Maheu, C., Cazenave, A., Mechoso, C. R. (2003). “Water level fluctuations in the Plata basin (South America) from Topex/Poseidon satellite altimetry”. *Geophysical Research Letters*, 30 (3), 1143-1146.
- Marengo, J., Tomasella, J., Uvo, C.R. (1998). “Trends in stream flow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil and Northwestern Peru”. *J. Geophys. Res.* 103, 1175-1783.
- Mendes, C. L. T., Soares-Gomes, A. (2007). *Circulação nos Oceanos, Correntes Oceânicas e Massas d’Água*. Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil, 26p.
- Menke, W. (1991). “Applications of the POCS inversion method to interpolating topography and other geophysical fields”. *Geophys. Res. Lett.*, 18 (3), 435-438.
- Mercier, F. (2001). *Altimétrie spatiale sur les eaux continentales: apport des missions Topex/Poseidon et ERS1&2 à l’étude des lacs, mers intérieures et bassins fluviaux*. Thèse Université Toulouse III-Paul Sabatier. France. 190p.
- Mercier, F. e Zanife, O. Z. (2006). “Improvement of the Topex/Poseidon altimetric data processing for hydrological purposes”. (CASH project). Proceedings of the Symposium on 15 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice, Italy.
- Ministério dos Transportes. *Hidrovias da Amazônia Ocidental – Desafios da Intermodalidade*. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/portal/pdf/Palestras/PalestraAHIMOC.pdf>>. Acesso em 23/12/2012.
- Molinier M., Guyot J. L., Cochonneau G., Guimaraes V. (1999). “La variabilité hydrologique du bassin amazonien et la circulation atmosphérique océanique. Hydrological and geochemical processes in large scale river basins”. Manaus, Brasil.
- Monteiro, A. E. G. C. (2009). “Serviço Geológico do Brasil”. Encontro do Projeto FOAM (*From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring*). Manaus, Brasil. 15p.

- Moreira, D. M. (2010). *Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, 157 p.
- Morris, C.S., Gill, S.K. (1994a). "Evaluation of the Topex/Poseidon altimeter system over the Great Lakes". *J. Geophys. Res.* 99, 24527-24539.
- Morris, C.S., Gill S.K. (1994b) "Variation of Great Lakes waters from Geosat altimetry". *Water Resour. Res.* 30, 1009-1017.
- Nuth, V., Pulliam, J., Wilson, C. (2002). "Migration of radar altimeter waveform data". *Geophysical Research Letters*, 29 (10), 10129-10133.
- Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A. (2001). "Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon Basin". *C. R. Acad. Sci. Series IIA Earth and Planetary Science*, 333 (10), 663-643.
- Perrot, M. (2009). "Le Danube. Discussion: Peut-on utiliser les données d'altimétrie satellitaire pour mesurer la hauteur d'eau du Danube?". Encontro do Projeto FOAM (From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring). Manaus, Brasil. 42p.
- Ramillien, G., Frappart, F., Güntner, A., Ngo-Duc, T., Cazenave, A., Laval, K. (2006) "Time variations of the regional evapotranspiration rate from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite gravimetry". *Water Resources Research*, 42 (10), W10403.
- Rao, V. B., Cavalcanti, I. F. A., Hada, K. (1996) "Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America". *J. Geophys. Res.*, 101, 26539-26551.
- Rapley, C. G., Guzkowska, M. A. J., Cudlip, W., Mason, I. M. (1987). "An exploratory study of inland altimetry using Seasat data". *ESA Contract Rep.*, Eur. Space Agency.
- Richey, J.E., Nobre, C., Deser, C. (1989). "Amazon River discharge and climate variability". *Science*, 246, 101-102.

- Roux, E., Santos da Silva, J., Vieira Getirana, A. C., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Martinez, J.-M. and Seyler, F. (2010). "Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry – comparative study. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1), 104-120.
- Sandwell, D. T.; Smith, W. H. F. (2005). "Retracking ERS-1 altimeter waveforms for optimal gravity field recovery". *Geophys. J. Int.*, 163, 79-89.
- Santos da Silva, J. (2007). *Balanço Hídrico Decenal da Bacia do Rio Negro (Bacia Amazônica) Baseado em Dados de Satélites*. Plano de Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, RJ, 157 p.
- Santos da Silva, J., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O. C., Cochonneau, G. and Mansur, W. J. (2010). "Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions". *Remote Sensing of Environment*, 114 (10), 2160-2181.
- Santos da Silva, J., Rotunno Filho, O. C., Roux, E., Seyler, F., Calmant, S. (2009). "Níveis de água nas zonas úmidas da bacia Amazônica estimadas por satélites altimétricos". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH*, submetido.
- Schmidt, R., Schwintzer, P., Flechtner, F., Reigber, C., Güntner, A., Döll, P., Ramillien, G., Cazenave, A., Petrovic, S., Jochmann, H., Wunsch, J. (2006). "GRACE observation of changes in continental water storage". *Global and Planetary Change*. 50, 112-126.
- Seyler, F., Calmant, S., Santos da Silva, J., Filizola, N., Roux, E., Cochonneau, G., Vauchel, P., Bonnet, M. P. (2008) "Monitoring water level in large trans-boundary ungauged basin with altimetry: the example of ENVISAT over Amazon Basin". *Journal of Applied Remote Sensing – SPIE*. 7150, p. 715017.
- Tapley, B. D., Born, G. H., Parke, M. E. (1982). "The Seasat altimeter data and its accuracy assessment". *J. Geophys. Res.*, 87, 3179-3188.

- Tarantola, A. e Valette, B. (1992). “Generalized nonlinear problems solved using the Least Squares Criterion”. *Rev. Geophys. Space Physics*, 20 (2), 219-232.
- Trenberth, K. E., Olson, J. G. (1988). “An evaluation and intercomparison of global analyses from the National Meteorological Center and the European Center for Medium Range Weather Forecasts”. *Bull. Am. Meteor. Soc*, 69, 1047-1057.
- Tucci, C. E. M. “Escoamento Superficial”. In: Tucci, C. E. M (org.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3.^a ed. 2004. ABRH/UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 391-441.
- Wahr, J. (1985). “Deformation of the Earth induced by polar motion”. *J. Geophys. Res.*, 90 (B11), 9363-9368.
- Wehr, T., Attema, E. (2001). “Geophysical validation of ENVISAT data products”. *Advances in Space Research*, 28 (1), 83-91.
- Wingham, D. J.; Rapley, C. G.; Griffiths, H. (1986). “New techniques in satellite altimeter tracking systems”. *Proceedings of IGARSS’86 Symposium, Zürich*. Ref. ESA SP 254, 1339-1344.
- WMO. “Guide to hydrological practices – data acquisition and processing, analysis, forecasting and other applications.” 5.^a ed. 1984. *World Meteorological Organization*, n.º 168, p. 259-288.
- Zelli, C. (1999). “ENVISAT RA-2 advanced radar altimeter: Instrument design and pre-launch performance assessment review”. *Acta Astronautica*, 44, 323-333.
- Zhang, M. (2009). “Satellite radar altimetry for inland hydrologic studies”. *Geodetic Science and Surveying*, report no. 491.

CITAÇÕES EM “*apud*”

- Remy, F.; Brossier, C.; Minster, J. F. (1990). “Intensity of a radar altimeter over continental ice sheets. A potential measurement of surface roughness and katabatic wind intensity”. *Journal of Glaciology*, 36, 133-142.

Remy, F.; Schaeffer, P.; Legresy, B. (1999). "Ice flow physical processes derived from ERS-1 high resolution map of the Antarctica and the Greenland ice sheets". *International Journal of Geophysics*, 139, 645-649.

Zwally, H. J.; Brenner, A. C.; Major, J. A.; Bindscadler, R. A.; Marsh, J. (1989). "Growth of Greenland ice sheet: Measurement". *Science*, 246, 1587-1589.