

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências (IGC)
Programa de Pós-graduação
Doutorado em Geografia

**Altimetria por satélite radar na medição do nível
d'água de rios de pequeno e médio porte: um
estudo de caso no Rio São Francisco**

Eric Oliveira Pereira

Belo Horizonte
2018

P436a Pereira, Eric Oliveira.
2018 Altimetria por satélite radar na medição do nível d' água de rios de pequeno e médio porte [manuscrito] : um estudo de caso no Rio São Francisco / Eric Oliveira Pereira. – 2018.
vii, 233 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Philippe Maillard.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais,
Departamento de Geografia, 2018.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 166-177.

Inclui apêndices.

1. Sensoriamento remoto – São Francisco, Rio – Teses. 2. Altitudes – Levantamento – Teses. 3. Hidrologia – São Francisco, Rio – Teses. 4. São Francisco, Rio – Nível da água – Teses. 5. Monitoramento ambiental – São Francisco, Rio – Teses. I. Maillard, Philippe. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. III. Título.

CDU: 528.8

Eric Oliveira Pereira

Tese de Doutorado apresentada ao
Programa de Pós-graduação do
Departamento de Geografia da Universidade
Federal de Minas Gerais, como requisito
parcial à obtenção do título de Doutor em
Geografia

Área de Concentração: Análise Ambiental

Orientador: Dr. Philippe Maillard

Belo Horizonte

2018

P436a 2018 Pereira, Eric Oliveira.
Altimetria por satélite radar na medição do nível d' água de rios de pequeno e médio porte [manuscrito] : um estudo de caso no Rio São Francisco / Eric Oliveira Pereira. – 2018.
vii, 233 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Philippe Maillard.
Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, 2018.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 166-177.

Inclui apêndices.

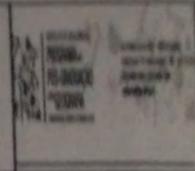
1. Sensoriamento remoto – São Francisco, Rio – Teses. 2. Altitudes – Levantamento – Teses. 3. Hidrologia – São Francisco, Rio – Teses. 4. São Francisco, Rio – Nível da água – Teses. 5. Monitoramento ambiental – São Francisco, Rio – Teses. I. Maillard, Philippe. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Geografia. III. Título.

CDU: 528.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Altimetria por satélite radar na medição do nível d'água de rios de pequeno e médio porte: um estudo de caso no Rio São Francisco

ERIC OLIVEIRA PEREIRA

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA, como requisito para obtenção do grau de Doutor em GEOGRAFIA, área de concentração ANÁLISE AMBIENTAL.

Aprovada em 23 de abril de 2018, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Philippe Maillard - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof(a). Marcos Antônio Timbo Elmiro
UFMG

Prof(a). Eber Jose de Andrade Pinto
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof(a). Lilia Maria de Oliveira
CEFET-MG

Belo Horizonte, 23 de abril de 2018.

Conteúdo

| | |
|--|------------|
| Resumo | i |
| Abstract | ii |
| Agradecimentos | iii |
| Siglas | vi |
| 1 Introdução | 1 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 6 |
| 2.1 Hidrologia | 6 |
| 2.1.1 Rede Fluviométrica <i>in situ</i> e variáveis hidrológicas: nível, vazão e curva-chave | 7 |
| 2.2 Sensoriamento Remoto e Altimetria | 11 |
| 2.2.1 Uso do sensoriamento remoto na hidrologia | 11 |
| 2.2.2 Missões Altimétricas | 12 |
| 2.2.3 Missões Altimétrica utilizadas neste trabalho | 14 |
| 2.2.4 Funcionamento do Radar | 15 |
| 2.2.5 Radar Altimétrico | 19 |
| 2.3 O estado da arte da Altimetria Radar | 27 |
| 3 Área teste e dados | 35 |
| 3.1 O Rio São Francisco | 35 |
| 3.1.1 Localização | 35 |
| 3.1.2 Características físicas da área | 36 |
| 3.2 Dados | 42 |
| 3.2.1 Dados fluviométricos <i>in situ</i> | 42 |
| 3.2.2 Dados dos satélites altimétricos radar - Envisat, Saral e Sentinel-3A | 42 |
| 3.2.3 Dados GNSS | 45 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Obtenção do nível d'água ao longo do Rio São Francisco a partir dos satélites Envisat , Saral e Sentinel-3A | 48 |
| 4.1 | Abordagem Metodológica | 48 |
| 4.1.1 | Módulo Processo Central | 52 |
| 4.1.2 | Processo de Retracking dos Dados Altimétricos Radar | 57 |
| 4.1.3 | Processo de Validação dos Dados | 59 |
| 4.2 | Avaliação dos dados das estações virtuais | 67 |
| 4.2.1 | Envisat | 69 |
| 4.2.2 | Saral | 78 |
| 4.2.3 | Sentinel-3A | 85 |
| 4.3 | Discussão comparativa entre os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A . | 95 |
| 5 | Comportamento do sinal radar dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A | 112 |
| 5.1 | Abordagem Metodológica | 113 |
| 5.1.1 | Seleção e extração das formas de onda | 113 |
| 5.1.2 | Ajuste do <i>Tracker</i> dos satélites | 118 |
| 5.2 | Análise das formas de onda | 121 |
| 5.2.1 | Análise comparativa dos dados de Pedras de Maria da Cruz . . | 121 |
| 5.2.2 | Análise comparativa dos dados de Manga | 130 |
| 5.3 | Correção do <i>Tracker</i> | 137 |
| 5.4 | Relação entre <i>footprint</i> e a forma de onda: evolução espaço-temporal do sinal radar | 138 |
| 5.5 | Tipos de formas de onda: síntese da relação entre forma de onda e distância ao centro do rio | 151 |
| 5.5.1 | Análise dos picos em função da distância para o satélite Envisat | 155 |
| 5.5.2 | Análise dos picos em função da distância para o satélite Saral . | 159 |
| 6 | Considerações Finais | 162 |
| 6.1 | Sugestões para Trabalhos Futuros | 164 |
| | Referências | 166 |
| A | Produção bibliográfica relacionada a tese | 178 |
| B | Artigo-1 | 179 |
| C | Artigo-2 | 188 |
| D | Artigo-3 | 203 |

| | | |
|---|---|-----|
| E | Artigo-4 | 212 |
| F | Código Python 2.7: algoritmo RANSAC | 226 |
| G | Código Python 2.7: ajuste do <i>Tracker</i> | 230 |
| H | Código Python 2.7: Retracker Customizado | 232 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Ciclo Hidrológico. | 7 |
| 2.2 | Distribuição das estações fluviométricas no Brasil. | 8 |
| 2.3 | Réguas Limnimétricas na seção de um rio. | 9 |
| 2.4 | Método de integração de verticais para estimativa de descarga líquida. | 10 |
| 2.5 | Esquemática dos equipamentos de um sistema radar. | 16 |
| 2.6 | Características Geométricas Radar. | 18 |
| 2.7 | <i>Tracker</i> do satélite altimétrico sobre a superfície. | 20 |
| 2.8 | Formas de onda. | 21 |
| 2.9 | Evolução do pulso altimétrico radar nadir de baixa resolução. | 23 |
| 2.10 | Modelo teórico de Brown e seus parâmetros. | 23 |
| 2.11 | Modelo Teórico do Centro de Gravidade (OCOG). | 24 |
| 2.12 | Modelo Teórico do limiar do Centro de Gravidade. | 25 |
| 2.13 | Modelo do Beta Parameter Retracker. | 26 |
| 2.14 | Tência <i>Doppler</i> para aumento da precisão dos dados radar. | 28 |
| 2.15 | Evolução do pulso radar. | 29 |
| 2.16 | Pulso radar altimétrico na transição entre oceano e continente. | 30 |
| 2.17 | Localização de estações virtuais na bacia amazônica criadas para os satélites Envisat e Jason-2. | 32 |
| 2.18 | Efeito <i>hooking</i> | 33 |
| 3.1 | Perfil longitudinal do Rio São Francisco e a posição de seus principais afluentes. | 36 |
| 3.2 | Localização da bacia do Rio São Francisco. | 37 |
| 3.3 | Localização das estações virtuais dos satélites Envisat e Saral no perfil longitudinal do Rio São Francisco. | 39 |
| 3.4 | Localização das estações virtuais do satélite Sentinel-3A no perfil longitudinal do Rio São Francisco. | 40 |
| 3.5 | Aparelho GPS utilizado em campo. | 46 |
| 4.1 | Espacialização dos <i>tracks</i> dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A sobre um trecho do Rio São Francisco. | 49 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.2 | Estações Virtuais dos satélites Envisat/Saral e Sentinel-3A ao longo do Rio São Francisco. | 50 |
| 4.3 | Processo de extração dos dados altimétricos. | 51 |
| 4.4 | Processo central de extração dos dados altimétricos. | 53 |
| 4.5 | Estação Virtual de Manga. | 55 |
| 4.6 | Gráfico de três momentos das iterações do RANSAC. | 56 |
| 4.7 | Fluxograma do algoritmo <i>Randon Sample Consensus</i> (RANSAC). | 57 |
| 4.8 | Formas de onda produzidas a partir da altimetria radar por satélite. | 58 |
| 4.9 | Processo de Retracking. | 59 |
| 4.10 | Processo de Validação dos dados Altimétricos. | 60 |
| 4.11 | Série Temporal Altimétrica. | 60 |
| 4.12 | Séries temporais para a estações fluviométricas <i>in situ</i> e virtual de Manga. | 61 |
| 4.13 | Nivelamento Geométrico de Estações <i>in situ</i> | 62 |
| 4.14 | Localização das estações virtuais do Envisat/Saral, Sentinel-3A e <i>in situ</i> sobrepostas a imagem Sentinel-2A. | 64 |
| 4.15 | GPS instalado em quatro pontos de medição na região de Pedras de Maria da Cruz. | 66 |
| 4.16 | Localização das estações virtuais criadas a partir dos satélite Envisat e Saral ao longo do Rio São Francisco. | 67 |
| 4.17 | Localização das estações virtuais criadas a partir do satélite Sentinel-3A ao longo do Rio São Francisco. | 68 |
| 4.18 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar nas estações de Orocó, Ibó e Santa Maria da Boa Vista. | 70 |
| 4.19 | Forma do rio nas estações virtuais e <i>in situ</i> de Manga. | 71 |
| 4.20 | Imagem Sentinel-2A nas estações virtuais de Manga e Ibó. | 72 |
| 4.21 | Estação Virutal de Pirapora - Imagem Sentinel-2A e altitude do modelo digital de elevação SRTM. | 72 |
| 4.22 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar na estação de Pirapora. | 73 |
| 4.23 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar estações de Cachoeira da Manteiga, São Romão e Pedras de Maria da Cruz. | 74 |
| 4.24 | Estação Virutal de Belém do São Francisco: Imagem Sentinel-2A em composição falsa-cor. | 75 |
| 4.25 | Imagens de satélite das estações virtuais de Iguatama e Penedo. | 76 |
| 4.26 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar das estações virtuais de Iguatama e Penedo. | 77 |
| 4.27 | Área do <i>footprint</i> do satélite Envisat sobre imagem RapidEye na estação virtual de Iguatama. | 78 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.28 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite (AS) radar da estação de Morpará. | 79 |
| 4.29 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar das estações de Cahcoeira da Manteiga e São Romão. | 79 |
| 4.30 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite (AS) radar das estações de Orocó e Belém do São Francisco. | 80 |
| 4.31 | Imagens de satélite das estações virtuais de Orocó e Belém do São Francisco. | 81 |
| 4.32 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar das estações de São Romão e Manga. | 82 |
| 4.33 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar das estações de Cachoeira da Manteiga e Manga. | 83 |
| 4.34 | Imagens de satélite das estações virtuais de Ibó e Penedo. | 83 |
| 4.35 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar das estações de Ibó, Santa Maria da Boa Vista e Penedo. | 84 |
| 4.36 | Estação Virtual de Barra: imagem Sentinel-2A e altitude do modelo digital SRTM. | 85 |
| 4.37 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar das estações de São Romão e Barra. | 86 |
| 4.38 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar da estação de Pirapora. | 87 |
| 4.39 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite (AS) radar das estações de Manga e Gameleira. | 88 |
| 4.40 | Estação Virtual de Gameleira: imagem Sentinel-2A e altitude SRTM. | 89 |
| 4.41 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite radar da estação de Pirapora. | 90 |
| 4.42 | Série temporal <i>in situ</i> e por altimetria satélite (AS) radar das estações de Orocó, Bom Jesus da Lapa e Paratinga. | 91 |
| 4.43 | Estação Virtual de Bom Jesus da Lapa: imagem Sentinel-2A e altitude SRTM. | 92 |
| 4.44 | Estação Virtual de Paratinga: imagem Sentinel-2A e altitude SRTM. | 92 |
| 4.45 | <i>Track</i> do Sentinel-3A e o desnível da margem em relação ao rio em Pedras de Maria da Cruz. | 94 |
| 4.46 | Estação virtual de Pedras de Maria da Cruz e seu perfil topográfico gerado a partir do modelo digital SRTM de 1-Arc-Sec no alinhamento e sentido do <i>track</i> nominal. | 95 |
| 4.47 | Gráfico do Erro Médio Quadrático Relativo nas estações virtuais para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A com uso do algoritmo ICE-1. | 96 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.48 | Gráfico do Erro Médio Quadrático Relativo nas estações virtuais para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A com uso do algoritmo RANSAC. | 96 |
| 4.49 | Imagem de satélite na estação virtual de Orocó e os <i>tracks</i> dos satélites Envisat/Saral e Sentinel-3A. | 99 |
| 4.50 | Estação virtual de Paratinga e seu perfil topográfico gerado a partir da imagem SRTM de 1-Arc-Sec no alinhamento e sentido do <i>track</i> nominal. | 102 |
| 4.51 | Estação virtual de Barra e seu perfil topográfico gerado a partir da imagem SRTM de 1-Arc-Sec no alinhamento e sentido do <i>track</i> nominal. | 102 |
| 4.52 | Pontos extraídos com o uso do Envisat e do Saral. | 105 |
| 4.53 | Ciclos extraídos do satélite Saral próximos a estação virtual de Manga. | 106 |
| 4.54 | Pontos extraídos para diversos ciclos dos satélites Envisat e Saral nas estações virtuais de Belém do São Francisco e Santa Maria da Boa Vista. | 107 |
| 4.55 | Estações <i>in situ</i> niveladas e as estações virtuais correspondentes. | 108 |
| 5.1 | <i>Footprint</i> dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. | 113 |
| 5.2 | Tipos de canais fluviais que ocorrem ao longo do Rio São Francisco. | 114 |
| 5.3 | Relação entre o <i>footprint</i> do satélite, a presença de água e a forma de onda. | 115 |
| 5.4 | Ciclos extraídos para o satélite Envisat. | 116 |
| 5.5 | Pontos extraídos a partir dos dados Sentinel-3A para a estação virtual de Pedras de Maria da Cruz no Rio São Francisco. | 117 |
| 5.6 | Processo de extração das formas de onda a partir dos dados dos satélites radar altimétrico. | 118 |
| 5.7 | Modelo teórico da expansão do sinal radar no modo de baixa resolução (<i>Low Resolution Mode</i> - LRM). | 119 |
| 5.8 | Ajuste do <i>Tracker</i> para as formas de onda sequenciais. | 120 |
| 5.9 | Formas de onda para os ciclos 17 (Junho-2003), 32 (Dezembro-2004), 68 (Abril-2008) e 71 (Agosto-2008) na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com uso dos dados do satélite Envisat. | 122 |
| 5.10 | Formas de onda para os ciclos nove (Janeiro-2014) e onze (Março-2014) na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com uso dos dados do satélite Saral. | 126 |
| 5.11 | Formas de onda para os ciclos 6 (Junho-2016), 8 (Maio-2016), 11 (Novembro-2016) e 16 (Abril-2017) na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com uso dos dados do satélite Sentinel-3A. | 129 |
| 5.12 | <i>Tracks</i> do satélite Envisat em Manga e Pedras de Maria da Cruz. | 131 |
| 5.13 | Formas de onda (FO) para os ciclos 57, 68, 76 e 85 na estação virtual de Manga. | 132 |

| | | |
|------|--|-----|
| 5.14 | Formas de onda para os ciclos 6 (Outubro-2013), 7 (Novembro-2013), 8 (Dezembro-2013) e 33 (Maio-2016) na estação virtual de Manga com uso dos dados do satélite Saral. | 134 |
| 5.15 | Formas de onda para os ciclos 6 (Junho-2016), 11 (Novembro-2016), 13 (Janeiro-2017) e 16 (Abril-2017) na estação virtual de Manga com uso dos dados do satélite Sentinel-3A. | 136 |
| 5.16 | Formas de onda dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. | 137 |
| 5.17 | Pontos dos quais foram extraídas as formas de onda na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. | 139 |
| 5.18 | Evolução espaço-temporal na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz para o satélite Envisat. | 141 |
| 5.19 | Evolução espaço-temporal na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz para o satélite Saral. | 142 |
| 5.20 | Evolução espaço-temporal na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz para o satélite Sentinel-3A. | 144 |
| 5.21 | Pontos dos quais foram extraídas as formas de onda na estação virtual de Manga para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. | 145 |
| 5.22 | Evolução espaço-temporal na estação virtual de Manga com o satélite Envisat. | 147 |
| 5.23 | Evolução espaço-temporal na estação virtual de Manga com o satélite Saral. | 148 |
| 5.24 | Evolução espaço-temporal na estação virtual de Manga com o satélite Sentinel-3A. | 150 |
| 5.25 | Pontos extraídos e suas formas de onda de acordo com a distância em relação ao centro do rio. | 151 |
| 5.26 | Gabarito para classificação das formas de onda do Envisat em função do número de picos. | 153 |
| 5.27 | Gabarito para classificação das formas de onda do Saral em função do número de picos. | 154 |
| 5.28 | Gráfico com o percentual de FOs de acordo com a distância e o número de picos para o satélite Envisat. | 158 |
| 5.29 | Gráfico com o percentual de FOs de acordo com a distância e o número de picos para o satélite Envisat. | 161 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Missões altimétricas por satélite radar. | 13 |
| 2.2 | Características do satélite Envisat. | 16 |
| 2.3 | Principais bandas utilizadas nos sistemas radar. | 16 |
| 3.1 | Características físicas próximas às Estações Virtuais no Rio São Francisco. | 40 |
| 3.2 | Clima segundo a classificação de Köppen. | 41 |
| 3.3 | Precipitação média anual 1961-2014 em mm/ano. | 41 |
| 3.4 | Características de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. . | 42 |
| 3.5 | Referências de nível global obtidas com o nivelamento das réguas lim- nimétricas com a utilização de GPS geodésico. | 43 |
| 3.6 | Arquivos netCDF - Saral. | 44 |
| 3.7 | Parâmetros do satélite Envisat. | 45 |
| 4.1 | Fragmento do conjunto de dados extraídos para a estação virtual de Manga. | 54 |
| 4.2 | Dados do marco geodésico de Pedras de Maria da Cruz. | 65 |
| 4.3 | Dados gerados a partir da realização de campo e pós-processamento dos dados de GPS geodésico. | 67 |
| 4.4 | Resultados obtidos com os dados dos satélites Envisat e Saral. | 68 |
| 4.5 | Resultados obtidos com os dados do Sentinel-3A. | 69 |
| 4.6 | Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite, com o uso do Sentinel-3A, e as medições <i>in situ</i> da estação de Pedras de Maria da Cruz. | 93 |
| 4.7 | Erro Médio Quadrático (EMQR) e o número de medições (N) realizadas com cada um dos satélites nas estações virtuais criadas. Resultados para ICE-1 e RANSAC. | 97 |
| 4.8 | Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite, com o uso do Sentinel-3A, e as medições <i>in situ</i> na estação de Orocó. | 99 |
| 4.9 | Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite (AS) e as medições <i>in situ</i> da estação de Paratinga, com uso do Sentinel-3A. . | 101 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.10 | Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite (AS), com o uso do Sentinel-3A, e as medições <i>in situ</i> da estação de Barra. | 101 |
| 4.11 | Diferença entre o Erro Médio Quadrático (EMQR) calculado para os três satélites nas estações virtuais criadas. | 103 |
| 4.12 | Erro Médio Quadrático Absoluto e Relativo (EMQA e EMQR) calculados para três estações virtuais ao longo do Rio São Francisco. | 109 |
| 4.13 | Diferença entre o Erro Médio Quadrático (EMQR) calculado com o ICE-1 e com o RANSAC a partir dos dados dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. | 111 |
| | | |
| 5.1 | Diferença entre o nível <i>in situ</i> e o obtido por altimetria radar na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com o uso do satélite Envisat. | 124 |
| 5.2 | Diferença entre o nível <i>in situ</i> e o obtido por altimetria radar na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com o uso do satélite Saral para cada um dos ciclos disponíveis. | 127 |
| 5.3 | Diferença entre o nível <i>in situ</i> e o obtido por altimetria radar na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com o uso do satélite Sentinel-3A. | 130 |
| 5.4 | Estações virtuais selecionadas para categorização do número de picos para cada faixa de distância e os respectivos ciclos amostrados. | 152 |
| 5.5 | Fragmento de um dos ciclos extraídos para a estação virtual de Pedras de Maria da Cruz, classificados em função do número de picos na faixa de um quilômetro em relação ao centro do rio. | 155 |
| 5.6 | Envisat | 156 |
| 5.7 | Síntese das amostras dos dados gerados para as quatro estações do Envisat. | 157 |
| 5.8 | Saral | 159 |
| 5.9 | Síntese das amostras dos dados gerados para as quatro estações do Saral. | 160 |

Resumo

Apesar da altimetria radar ser utilizada principalmente no estudo da topografia dos oceanos e no monitoramento das calotas polares, a grande quantidade de dados disponíveis favorece seu uso nas pesquisas hidrológicas continentais. A altimetria por satélite radar pode contribuir na minimização dos problemas enfrentados no monitoramento dos recursos hídricos, com a geração de dados semelhantes aos da rede hidrológica convencional complementando a rede fluviométrica existente, porém são necessárias técnicas de processamento dos dados para a obtenção de resultados precisos. Por isso, o desenvolvimento de métodos que minimizem esses erros é de suma importância. Neste trabalho foi utilizado um *retracker* para a obtenção do nível d'água com o uso dos dados dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A, além disso foi utilizado um algoritmo de minimização de erros para os dados dos três sensores radar. Foi desenvolvido um método de extração e correção dos dados que pudesse ser aplicado de forma sistemática ao longo do Rio São Francisco (RSF). Os dados foram gerados nos pontos de cruzamento entre os *tracks* dos satélites e o rio, que deram origem as estações virtuais de monitoramento (EV). Os dados gerados por altimetria radar foram comparados com os dados *in situ*, a partir dos quais foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ) e aplicada a Regressão Linear (RL). Na segunda etapa do trabalho foi feita a análise das formas de onda (FO), o que permitiu melhor entender a evolução espaço-temporal do sinal radar. Após a aplicação do algoritmo de suavização de erros os resultados foram melhores que aqueles obtidos na aplicação do *retracker* mais comumente utilizado em 77% das EVs do Saral e 61% das do SENTINEL-3A. Com o Envisat o algoritmo ICE-1 foi mais eficiente que o RANSAC, devido à alta consistência dos dados deste satélite. Foi possível verificar que a precisão das medidas ao longo do RSF a partir do método desenvolvido é condizente com o esperado para estes três sensores e resultou em dados consistentes para a medição do nível d'água, principalmente com o uso do Envisat. Além disso, a análise da evolução espaço-temporal da FO permitiu confirmar a qualidade dos dados para o Envisat, Saral e Sentinel-3A, sendo o primeiro aquele que apresentou os melhores padrões de FO.

Palavras-chave: Altimetria por satélite, Monitoramento do nível de água, processamento de dados altimétricos

Abstract

Although radar altimetry is used primarily to study ocean topography and monitoring of the ice caps, the amount of data available favours its use in continental hydrology studies. Satellite altimetry radar can contribute to minimize problems faced in monitoring water resources, being able to generate data similar to those of conventional hydrologic monitoring networks complementing the already existing fluviometric network; however data processing techniques are necessary to get precise results. Due to this, the development of methods that minimize errors is of utmost importance. In this study a *retracker* was used to attain water levels from data of the Envisat, Sarala ns Sentinel-3A, besides that an error minimizing algorithm was also used in the three satellites' data. A systematic method of data extraction and correction was developed to be used along the São Francisco River (RSF). The data were generated at the crossing points between the satellite *tracks* and the river, that originated the virtual monitoring stations (EV). The derived altimetry data were compared to the *in situ* data, from which the Mean Square Error (EMQ) was calculated and a linear regression (RL) applied. In the second part of this study an analysis of the waveforms (FO) was made allowing to better understand the space-time evolution of the radar signal. After applying the error minimizing algorithm in 77% of Saral's EVs and 61% of Sentinel-3A's the results were better than the ones from applying the most commonly used *retracker*. With Envisat this last approach was more affective than the one with the use of RANSAC due to the high consistency of this satellite's data. It was possible to verify that the precision of the measurements along the RSF generated from the developed method is befitting with the expected for this three sensors and resulted in data consistent for water level measurements, especially with the use of Envisat. In addition, the space-time evolution analysis of the FO allowed to confirm the quality of the data for Envisat, Saral and Sentinel-3A, the first one being the one with the best FO patterns.

Key-words: Satellite Altimetry, Water Level Monitoring, Altimetry Data Processing

Agradecimentos

Os primeiros a agradecer são meus pais, Gilberto e Conceição, e a minha irmã, Ianna, sem o apoio deles, em todos os sentidos que essa palavra possa ter, seria mais difícil chegar até aqui. Agradeço também a minha companheira Marina Beirão, que participou e contribuiu com a minha pessoa, me deu força, conselhos e exemplos que foram fundamentais pra mim.

Agradeço aos meus amigos, Thiaguinho, sempre presente. A Luiza Gontijo, essa não tem como agradecer, o que ela aguentou nesses quatro anos não foi brincadeira. Ao Michel agradeço pela insistência ao me chamar para andar de bicicleta, isso foi fundamental para aliviar a mente. O Fred também foi muito bom nesses momentos de lazer, apesar da gente conversar da vida acadêmica mesmo em cima da bicicleta.

O pessoal do laboratório, por ali passaram vários colegas e amigos, agradeço a eles pelos momentos que passamos juntos: Luiza, Lilia, Evelyn, Marília, Paulo, entre outros que foram mais breves, obrigado.

Agradeço também a Hében, que me deu força na lombar, nos intercostais, nas escapulas, curou *triggers*, e manteve esse corpo fisicamente funcionando. Os colegas lá do pilates também foram muito importantes: Evelyn, Bárbara Roza, Bárbara Branca, Vinícius, Débora Nariz, Maurício, Simone, Lucineia, Denise, Marina Beirão (de novo), e vários outros.

No Instituto de Geociências agradeço aos professores Bernardo Gontijo, meu orientador de monografia, Úrsula Ruchkys, orientadora do mestrado, estes fizeram e ainda fazem parte da minha vida acadêmica.

Do Instituto Prístino, agradeço ao Flávio e a Luciana, pessoas incríveis que compreenderam o momento e não deixaram de confiar no meu trabalho. Além disso, agradeço aos colegas e amigos que fiz durante este tempo no Prístino: Yasmin, Iara, Rejane, Isabel, Rogério e Jeanine.

Agradeço também ao meu Orientador Philippe, seus ensinamentos, dedicação e disponibilidade foram fundamentais para que eu conseguisse realizar esse trabalho. Nesses quatro anos aprendi muito com ele e fui levado a pensar não só as questões diretas da pesquisa realizada, mas sobre o meio acadêmico como um todo.

Agradeço, por fim, ao Instituto de Geociências da UFMG e todos aqueles que con-

tribuem para que este Instituto seja cada vez melhor: professores, secretárias, porteiros, faxineiras, cantineiras, jardineiros, enfim, todos aqueles que fazem este lugar funcionar.

Agradeço a CAPES, pelos três meses de bolsa concedidos, que foram importantes para que eu tivesse tempo exclusivo para trabalhar em minha tese.

“O homem chega, já desfaz a natureza
Tira gente, põe represa, diz que tudo vai mudar
O São Francisco lá pra cima da Bahia
Diz que dia menos dia vai subir bem devagar
E passo a passo vai cumprindo a profecia do beato que dizia que o Sertão
ia alagar
O sertão vai virar mar, dá no coração
O medo que algum dia o mar também vire sertão
Adeus Remanso, Casa Nova, Sento-Sé
Adeus Pilão Arcado vem o rio te engolir
Debaixo d’água lá se vai a vida inteira
Por cima da cachoeira o gaiola vai subir
Vai ter barragem no salto do Sobradinho
E o povo vai-se embora com medo de se afogar
Remanso, Casa Nova, Sento-Sé
Pilão Arcado, Sobradinho
Adeus, Adeus
”

Siglas

- ANA: Agência Nacional de Águas
- AS: Altimetria por Satélite Radar
- BDG: Banco de Dados Geodésicos
- CEMIG: Companhia Energética de Minas Gerais
- CNES: Centre National d'Études Spatiales
- CODA: *Constant Data Availability*
- COG: *Center of Gravity*
- CPRM: Serviço Geológico do Brasil
- CTOH: Centro de Estudos Topográficos dos Oceanos e da Hidrosfera
- EI: Estações *in situ*
- ERS:
- ESA: Agência Espacial Europeia
- EV: Estações Virtuais
- EVM: Estações Virtuais de Monitoramento
- FDGDR: *Fast Delivery Geophysical Data Record*
- FO: Forma de onda
- Ftp: *File Transfer Protocol*
- GBAS: *Ground Based Augmentation System*
- GDR: *Geophysical Data Record*
- GLONAS: *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya*

- GNSS: *Global Navigation Satellite System*
- GPS: *Global Positioning System*
- IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IEF-MG: Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais
- IGDR: *Interim Geophysical Data Record*
- INMET: Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ITR: Improved Threshold Retracker
- KML: Keyhole Markup Language
- MMA: Ministério do Meio Ambiente
- MDE: Modelo Digital de Elevação
- NASA: National Aeronautics and Space Administration
- NAVSTAR: Navigation System Using Timing and Ranging
- netCDF: *Unidata's Network Common Data Form*
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
- OCOG: *Offset Center of Gravity*
- PISTACH: *Prototype Innovant de Système de Traitement pour les Applications Côtières et l'Hydrologie*
- RADAR: *Radio Detection and Ranging*
- RBMC: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
- RAR: Radar de Abertura Real
- RLS: Regressão Linear Simples
- RNG: Referência de Nível Global
- RNL: Referência de Nível Local

- RSF: Rio São Francisco
- SAR: *Synthetic Aperture Radar*
- SBAS: *Satellite Based Augmentation System*
- SGDR: *Waveform Geophysical Data Record*

Capítulo 1

Introdução

A água é o recurso natural que apresenta os mais variados, legítimos e correntes usos (Benetti e Bidone, 1993). Esse recurso possui usos múltiplos, dos quais destacam-se o agropecuário, o industrial, o hidroenergético e o abastecimento público (Gleick e Ajami, 2014). Apesar de sua extrema importância, a água tem sido utilizada de forma displicente, o que vai contra a sua capacidade de renovação natural (Postel *et al.*, 2014). Assim, para garantir o atendimento em qualidade e quantidade é necessário que a água seja utilizada de maneira racional, de modo a evitar seu desperdício e sua degradação. Conhecer a quantidade e a qualidade da água disponível ao longo do tempo é essencial para a garantia de oferta desse recurso.

A obtenção de dados quantitativos sobre a água é feita por meio do monitoramento hidrológico, a partir de pontos de medição instalados ao longo dos cursos d'água. O conjunto desses pontos (estações) forma uma rede hidrológica, que contribui com a gestão dos recursos hídricos (Tucci, 2001). O monitoramento *in situ* dos corpos d'água é feito por diversos órgãos e empresas, como estas informações são muito importantes, nem sempre estão disponíveis de maneira gratuita para a comunidade científica (Biancamaria *et al.*, 2017). A rede hidrológica brasileira, gerida pela Agência Nacional de Águas (ANA), tem seus dados disponibilizados gratuitamente, apesar de ser muito extensa, com aproximadamente 7.000 estações, a sua distribuição ao longo do território se dá de forma desigual, com uma alta concentração na porção leste e baixa densidade nas outras regiões do país (ANA, 2016). Além disso, o número de estações de monitoramento *in situ* tem diminuído, tanto no Brasil como no mundo (Tourian *et al.*, 2013; Sneeuw *et al.*, 2014; Pavelsky *et al.*, 2014; Tourian *et al.*, 2017).

A redução do número de estações se deve à depredação, a dificuldade de coleta dos dados *in situ* e ao custo inerente a operação destas, o que compromete a eficácia do monitoramento feito através da rede hidrológica (Maillard *et al.*, 2015; Calmant *et al.*, 2008). Nesse contexto, a altimetria por satélite radar (AS), mesmo que não substitua as medições *in situ*, é uma importante fonte de informação. Os dados gerados por AS

são semelhantes aqueles obtidos de forma convencional e são uma alternativa que pode contribuir na minimização dos problemas enfrentados no monitoramento dos recursos hídricos. Dentre as várias vantagens desta tecnologia, destacam-se a obtenção dos dados de forma gratuita por parte do usuário, a ampliação das áreas de monitoramento, a realização de medidas absolutas de nível, a obtenção de dados transfronteiriços e a globalização dos estudos hidrológicos, que podem fazer uso de uma base comum para realizar as medidas de nível dos cursos d'água.

A AS foi abordada pela primeira vez durante a realização do “Simpósio de Williams-town”, organizado pela “National Aeronautics and Space Administration” (NASA), em 1969, e teve como foco os estudos em geofísica (gravimetria) e física oceânica (Kaula, 1970). Os primeiros estudos realizados tiveram como resultados modelos geodésicos e topográficos dos oceanos (Smith e Sandwell, 1997). Desde então a altimetria por radar a bordo de satélites é amplamente utilizada no monitoramento da topografia oceânica e nos estudos da dinâmica tropical dos oceanos, da variação do nível dos mares, de estudos de fenômenos naturais globais, como *El Niño* e *La Niña* e na construção de séries históricas de nível d'água (Fu e Le Traon, 2006; Bergé-Nguyen *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2015). A maior parte dos estudos estão diretamente relacionados aos oceanos, onde as aplicações da altimetria radar são mais comuns e apresentam melhores resultados. O uso da AS, porém, vai além do oceano e hoje existem aplicações em regiões costeiras e um número crescente de trabalhos aplicados a áreas continentais. Isso porque a capacidade de medição do nível das águas de grandes rios através da AS foi demonstrada, e começou a ser utilizada para complementar dados *in situ* ou substituir os dados perdidos, especialmente em bacias hidrográficas localizadas em áreas remotas (Biancamaria *et al.*, 2017).

O uso da altimetria por satélite radar para o monitoramento do nível de águas continentais teve início na década de 1990, com o lançamento do satélite TOPEX/Poseidon que gerou dados adequados para a realização dos primeiros estudos em rios e lagos (Birkett, 1995a; Ponchaut e Cazenave, 1998). Apesar de não ser o objeto principal da AS as pesquisas em hidrologia têm se valido da grande quantidade de dados gerados ao longo de todo o planeta e de sua rápida disponibilização, o que a torna uma importante ferramenta para a medição do nível de rios e lagos (Calmant e Seyler, 2006). Assim, diversas pesquisas passaram a utilizar os dados gerados pela altimetria radar para auxiliar na construção e calibração de modelos hidrológicos (Paiva *et al.*, 2013; Paris *et al.*, 2016; Garambois *et al.*, 2017), na construção de séries temporais a partir do nível d'água (Roux *et al.*, 2010; Ričko *et al.*, 2012; Schwatke *et al.*, 2015) e na estimativa de vazões e construção de curvas-chave (Kouraev *et al.*, 2004; Leon *et al.*, 2006; Papa *et al.*, 2012).

No Brasil, os estudos com o uso da altimetria radar foram realizados predominantemente

mente na bacia amazônica, devido a facilidade de adaptação das técnicas da altimetria oceânica para esta região (Berry *et al.*, 2005). O primeiro estudo na área foi realizado por Koblinsky *et al.* (1993), que propuseram a criação de quatro estações virtuais de monitoramento na bacia Amazônica, a partir disso outros estudos foram realizados (Frappart *et al.*, 2006; Getirana *et al.*, 2009; da Silva *et al.*, 2010; Getirana e Peters-Lidard, 2013). Devido a uma série de problemas, que podem restringir a aplicação da AS no monitoramento do nível de rios de pequeno e médio porte, estudos em outras regiões do Brasil são ainda raros (Maillard *et al.*, 2015). Rios de pequeno porte são aqueles que tem largura entre 40-200 m, enquanto os de médio porte variam entre 200 m e 800 m (Biancamaria *et al.*, 2017).

Enquadra-se nesse contexto o Rio São Francisco (RSF), que possui largura inferior a um quilômetro em quase toda a sua extensão e pode ser assim considerado, predominantemente, como um rio de médio porte. O RSF nasce na Serra da Canastra, região sul de Minas Gerais, e flui no sentido Sul-Norte pela Bahia e Pernambuco, onde muda sua direção para Sudeste, e deságua no Oceano Atlântico após percorrer aproximadamente 2.700 Km (Maneta *et al.*, 2009). Grande parte desse rio está na região sob domínio do clima semi-árido, onde um dos maiores problemas enfrentados é a disponibilidade de água, agravada pelo crescimento das áreas irrigadas, da quantidade de barragens e reservatórios e do aumento da demanda de consumo, situação que pode causar alterações no seu regime fluviométrico (Rodriguez, 2004; Pereira *et al.*, 2009; Galvêncio e de Moura, 2010).

Um grande projeto envolve o RSF e é conhecido, popularmente, como “Transposição do Rio São Francisco”. Este tem por objetivo garantir o fornecimento de água para 12 milhões de habitantes do nordeste setentrional (PIRSF, 2015). Segundo estudos realizados pela ANA para o “Plano Decenal da Bacia Hidrográfica do São Francisco”, a disponibilidade de água para as necessidades hídricas da bacia do RSF e do semi-árido setentrional estariam garantidas, mesmo que a taxa de retirada de água triplicasse em 20 anos (CBHSF, 2004). Contudo, essa intervenção pode alterar o regime fluviométrico do RSF com consequentes reduções de nível e vazão a jusante dos pontos de interceptação do rio, o que deve ser monitorado após o início da operação através das estações de medição.

O monitoramento qualitativo e quantitativo do RSF é fundamental para o desenvolvimento do país e em especial do sertão nordestino. A rede hidrológica desse rio conta com cerca de 51 estações com leitura de nível, sendo essa a principal forma de quantificar suas águas. Diante da extensão do RSF a quantidade de estações é considerada pequena. Uma alternativa para complementar as medições *in situ* é o uso dos dados gerados pela AS. Apesar de ser uma alternativa para a medição do nível de água, o processo de obtenção de nível com esta técnica deve ser executado de forma

critériora, a fim de obter medições precisas. A qualidade das respostas obtidas através das ondas eletromagnéticas dependem do bom funcionamento dos altímetros e também de características do curso d'água, tais como forma e largura, da topografia da região, da presença de outros corpos d'água nas proximidades e do tipo de cobertura do solo de suas margens (Birkinshaw *et al.*, 2010; Berry, 2006; da Silva *et al.*, 2010).

Em termos comparativos, para estudos em lagos e rios de grande porte, o erro de estimativa de altitude chega a ser menor que 10 centímetros, enquanto que em rios e lagos de pequeno porte o erro varia, em média, de 20 a 150 centímetros (Créaux *et al.*, 2011; Ričko *et al.*, 2012; Tourian *et al.*, 2013). As melhorias nos sensores altimétricos nadir, na qualidade das correções aplicadas e no pós-processamento dos dados, permitem a realização de medições em rios de menor porte. Contudo, para viabilizar a aplicação da AS em rios do porte do RSF é necessário desenvolver métodos que minimizem os ruídos causados pela cobertura do solo e pela topografia. Poucos trabalhos foram realizados nesse sentido, mas os resultados apresentaram melhorias significativas no cálculo do nível de água, o que instiga a realização de trabalhos desse tipo (Boergens *et al.*, 2016; Ghosh *et al.*, 2015).

A motivação deste trabalho esta no potencial e nos ganhos que podem ser gerados pela aplicação da altimetria em áreas continentais, mesmo em locais em que o rio seja classificado como de pequeno e médio porte. Os pontos selecionados para o trabalho estão em áreas em que o rio varia de dezenas de metros a alguns quilômetros, mas na maioria dos casos as larguras estão entre 300 e 1000 metros. O uso da altimetria na quantificação das águas de corpos hídricos de menor dimensão ainda é muito raro, muitas vezes estes rios são negligenciados por serem considerados de menor importância que aqueles de maior porte e também pela dificuldade de adaptação dos métodos da AS. Essa técnica pode trazer contribuições significativas, tanto na complementação dos dados já existentes, como na geração de dados em locais não monitorados. Outro fator que motivou a execução desta pesquisa foi a possibilidade de melhor compreender o modo com o sinal radar evolui no espaço-tempo quando da aproximação com a água. Esse tipo de informação permite perceber como a topografia, a cobertura do solo e a proximidade com a água podem influenciar nas respostas capturadas pelos radares altimétricos.

Neste contexto, o objetivo principal do trabalho foi o de desenvolver um método capaz de estimar o nível da água com os menores erros possíveis, de forma sistemática e que pudesse ser replicado não só ao longo do RSF, mas de outros cursos d'água de dimensões semelhantes. Além disso, compõem o objetivo principal compreender o comportamento do sinal radar em áreas continentais a partir dos dados brutos dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A.

Para atingir os objetivos principais foram traçados os seguintes objetivos específicos:

1. comparar os dados altimétricos gerados a partir dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A, obtidos com o uso de um algoritmo que visa a obtenção do nível de água;
2. verificar se a implementação de um algoritmo de suavização dos erros grosseiros de medição dos dados altimétricos pode otimizar a exclusão de dados que contém erros discrepantes em relação ao conjunto de dados;
3. analisar e verificar como se comporta o sinal radar no espaço-tempo através dos dados brutos dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A.

Este trabalho foi dividido em oito capítulos. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica com uma base teórica da hidrologia e seus principais conceitos, o sensoriamento remoto com um histórico das missões altimétricas, o funcionamento dos radares, além do estado da arte da altimetria. No Capítulo 3 é dado um panorama geral da área teste deste trabalho e os principais dados utilizados na realização deste estudo. O Capítulo 4 aborda a obtenção do nível d'água por AS com o uso dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A, bem como o método envolvido na obtenção do nível d'água e seus resultados. O capítulo 5, aborda o comportamento espaço-temporal do sinal radar e o método desenvolvido para tal, além disso apresenta os resultados obtidos. O Capítulo 6 traz as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros que podem contribuir para a melhoria da AS. O trabalho possui apêndices com as produções bibliográficas relacionadas a este trabalho e também com alguns dos códigos em linguagem Python 2.7 desenvolvidos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Hidrologia

O ciclo hidrológico (Figura 2.1) é o fenômeno global de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar associada à gravidade e a rotação terrestre (Tucci, 2001). A água pode precipitar em qualquer estado físico, na parte terrestre do ciclo hidrológico, que compreende as águas superficiais e subterrâneas, os rios são os maiores responsáveis pelo escoamento da água em direção aos oceanos (Santos *et al.*, 2001).

Contudo, os rios são impactados pelas diversas atividades humanas desenvolvidas com o uso da água, tais como agricultura, dessedentação animal, abastecimento público e geração de energia elétrica. Este último, por exemplo, implica na alteração do regime fluvial, que passa a ter um controle não natural, que obedece às demandas da produção hidrelétrica. Isso impacta diretamente no ciclo hidrológico, com a inserção de novos lagos e desregulação da vazão dos rios. A mudança da cobertura do solo, com a retirada da vegetação nativa e impermeabilização dos solos, por exemplo, aumentam o escoamento superficial e reduzem o reabastecimento dos aquíferos, o que altera a vazão dos rios. Apesar dos impactos conhecidos a demanda e apropriação da água continuam a aumentar enquanto os recursos disponíveis são fixos e a escassez de água cada vez mais frequente (da Silva *et al.*, 2016).

A essência da escassez global de água é o desencontro espaço-temporal entre demanda e disponibilidade (Postel *et al.*, 1996). No Brasil, apesar de sua relativa abundância, a distribuição natural dos recursos hídricos não coincide com as principais áreas de demanda. Aproximadamente 73% de toda a água disponível está na bacia amazônica, aonde a demanda é a mais baixa de todo o território. Já na região do semiárido, que contém grande parte do curso do RSF, a disponibilidade hídrica é muito baixa e as secas são cada vez mais constantes (da Silva, 2004).

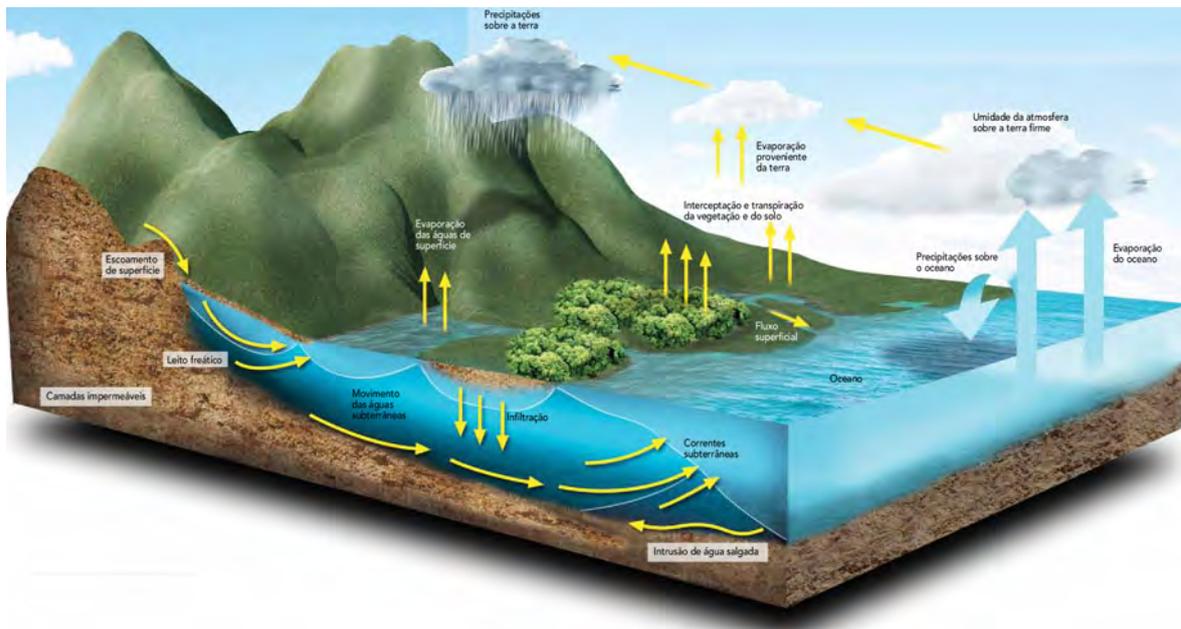


Figura 2.1: O ciclo hidrológico. Fonte: (Moss, 2015).

Diante disso, é importante que se faça um monitoramento eficiente da quantidade de água disponível. Dentre os parâmetros medidos os mais relevantes são o nível e a vazão, que são monitorados a partir de estações fluviométricas e seções transversais instaladas ao longo dos cursos d'água.

2.1.1 Rede Fluviométrica *in situ* e variáveis hidrológicas: nível, vazão e curva-chave

A maioria dos estudos hidrológicos utilizam os monitoramentos pluviométrico e fluviométrico. Assim, a instalação e manutenção ininterrupta de estações fluviométricas ao longo do tempo é primordial para os estudos em hidrologia (de Souza *et al.*, 1976). Nos postos fluviométricos é medido o nível da água, a partir do qual pode ser calculada a vazão. Devido a variação espacial dessas informações é necessário a instalação de vários pontos de monitoramento ao longo dos rios e das bacias hidrográficas que formam uma rede de estações fluviométricas (Santos *et al.*, 2001). A rede fluviométrica brasileira possui, segundo dados do ano de 2010, 7.160 estações¹. Essas estações são do tipo convencional, onde é necessário coletar os dados localmente, e telemétricas, que contam com a transmissão dos dados via rádio (Tucci, 2001). Apesar de extensa, a rede de estações brasileira é de baixa densidade e concentrada na porção leste do país (Figura 2.2).

¹informações obtidas através dos dados baixados no portal <http://hidroweb.ana.gov.br/> em abril de 2017.

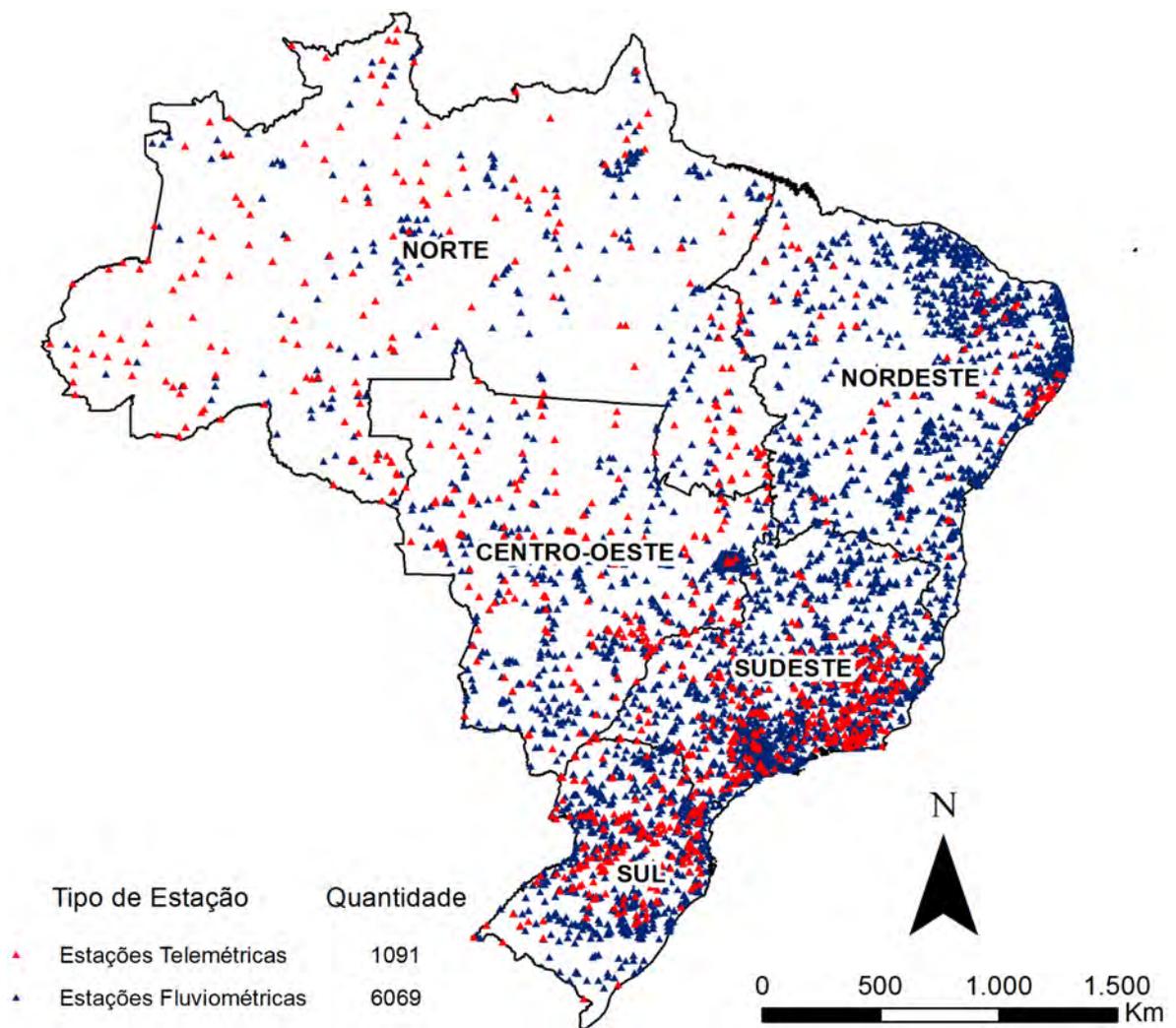


Figura 2.2: Distribuição das estações fluviométricas convencionais e telemétricas no território brasileiro. Fonte: ANA, 2010.

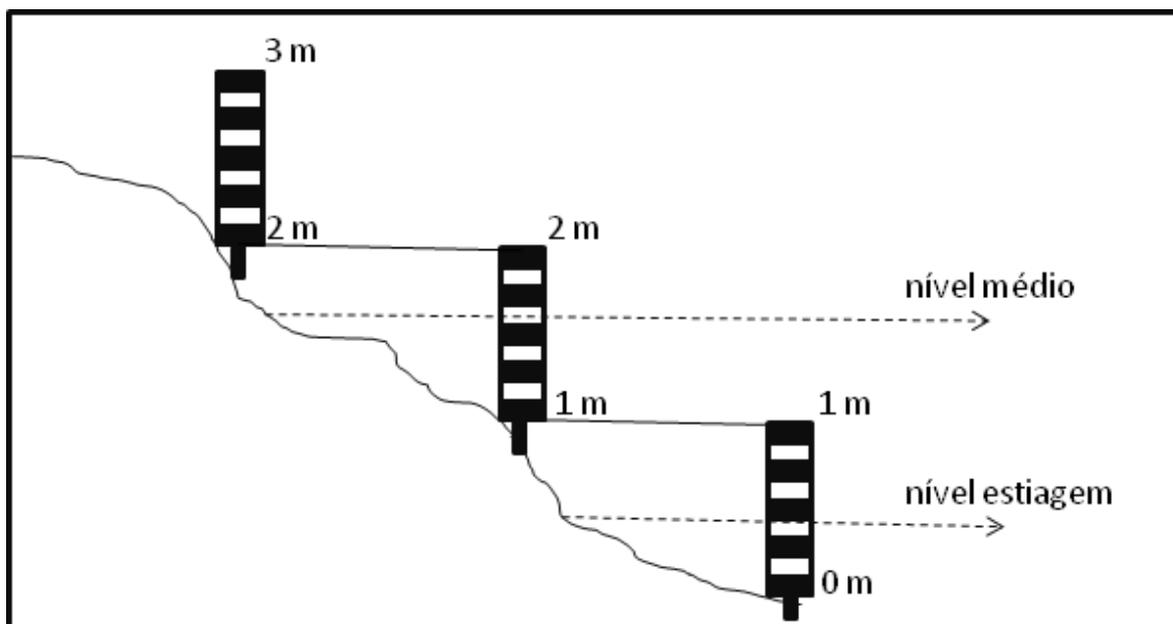


Figura 2.3: Esquema de instalação de réguas limnimétricas em uma seção de rio. As réguas são graduadas em centímetros e o valor zero deve estar sempre em contato a água. Adaptado de: Tucci (2001).

A variação do nível dos rios é uma das variáveis que servem para realizar a quantificação da água e tem ampla aplicação para outros cálculos hidrológicos, tais como vazão e curva-chave. A forma mais simples de se medir o nível de um curso d'água é através da instalação de uma régua vertical no leito do rio e fazer anotações periódicas das medições de nível. Essas réguas são hastes de um metro de altura graduadas em centímetros (Figura 2.3), as quais devem ter o seu limite inferior sempre em contato com a água, mesmo nos períodos mais secos (ANA, 2011), essas réguas são chamadas de limnimétricas. Para garantir uma melhor precisão e qualidade das observações a régua limnimétrica deve ser nivelada a partir de uma referência de nível global. Essa referência é feita através do nivelamento geométrico de alta precisão (IBGE, 2016). Dessa forma é possível converter as medidas relativas em absolutas. A régua limnimétrica não é o único instrumento de medição, outros instrumentos como limnigrafos de boia e de pressão, ultrassom e transdutor de pressão, apesar de mais raros, também são utilizados.

A vazão pode ser medida por capacidade e por diluição de um traçador, esses métodos podem ser consultados em Tucci (2001). Contudo, a derivação do nível para vazão ou descarga é mais comumente realizado através do método de medição da velocidade do fluxo da água (Tucci, 2001). O princípio da vazão consiste na medição do volume de água que atravessa a seção de um rio em um intervalo de tempo. A fórmula geral do cálculo de vazão é dada pela integração da descarga de uma área infinitamente pequena calculada pela Equação 2.1. Com os resultados de dQ é feita a integração da

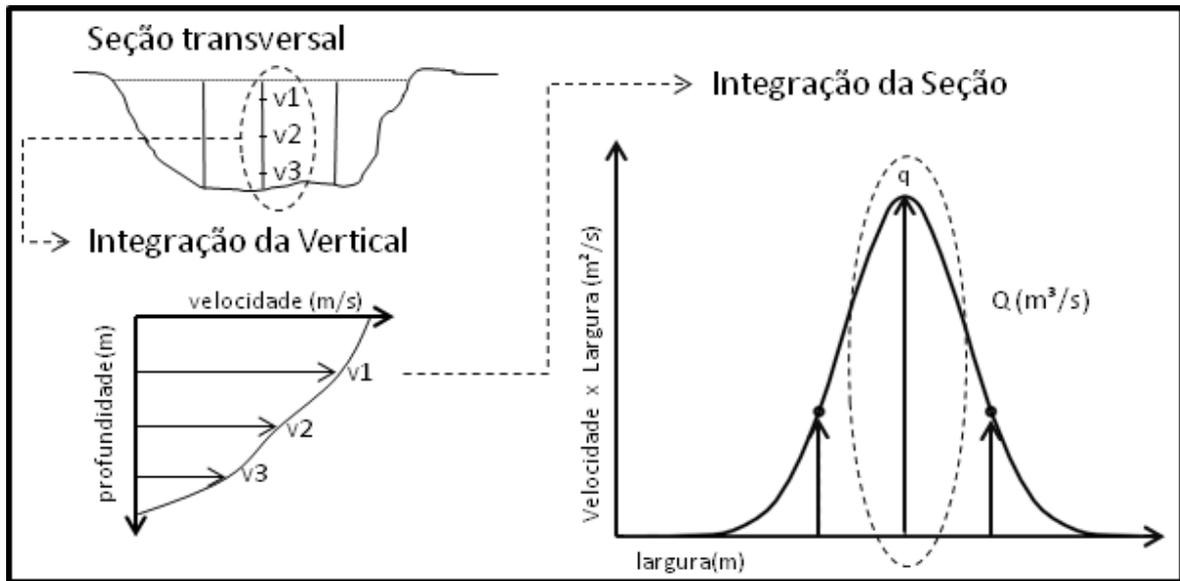


Figura 2.4: Cálculo da descarga líquida pelo método de integração de verticais. Os cálculos são realizados em três etapas que envolvem medidas na seção transversal, seguidas da integração das verticais e é finalizado com a integração da seção, que dá o resultado da descarga ou vazão do rio. Adaptado de: Tucci (2001).

vertical (onde foram medidas as velocidades do curso d'água), a partir da parabólica integrada e, por fim, é feita a integração da seção a partir das medidas de cada vertical em relação à largura do rio (Figura 2.4).

$$dQ = V * dS \quad (2.1)$$

onde dQ é a descarga em um ponto da seção, V é a velocidade e dS é a área da sessão.

A partir do conhecimento do nível da lâmina d'água de um rio e de sua vazão, é calculada e traçada a curva-chave do corpo hídrico. Esse traçado é um modelo aproximado da realidade feito a partir das medições e da análise dos parâmetros de escoamento. A curva-chave (h/Q) pode ser representada de forma gráfica, pela tabela de calibragem e por sua formulação matemática. Essa última é comumente escrita de forma exponencial conforme a Equação 2.2. Esses são os métodos mais utilizados para a realização de medições em cursos de água, a partir deles é possível monitorar os estoques de águas superficiais bem como realizar o enquadramento do regime fluviométrico dos rios (Jacon Gilbert, 1989).

$$Q = a(h - h_0)^n \quad (2.2)$$

Onde h é o nível da régua correspondente a vazão Q , h_0 é o nível para o qual a vazão é nula, a e n são constantes estabelecidas para um determinado local (Jacon Gilbert, 1989).

Apesar de gerar dados hidrológicos importantes, as estações fluviométricas apresentam problemas que podem comprometer a sua eficácia. Um dos principais é a dificuldade de disponibilização dos dados medidos *in situ* para os usuários, já que muitas vezes as estações estão localizadas em áreas remotas, o que dificulta o envio dos valores medidos (Calmant *et al.*, 2008). Em alguns casos o atraso entre a leitura e a disponibilização do dado pode chegar a quatro meses. Outro fator que impacta no uso dessas estações é o custo de instalação, manutenção e operação, além da perda de equipamentos seja por eventos naturais, como cheias, ou por depredação. Para minimizar esses problemas uma alternativa para a obtenção dos dados de nível é o uso do sensoriamento remoto, com os sensores radar altimétrico, que podem gerar os dados de áreas remotas e disponibilizar os mesmos para o usuário final quase que em tempo real².

2.2 Sensoriamento Remoto e Altimetria

2.2.1 Uso do sensoriamento remoto na hidrologia

As medidas qualitativas e quantitativas da situação da água na Terra podem ser feitas através da medição de parâmetros específicos *in situ*: profundidade da água (batimetria), nível, velocidade, turbidez, entre outros. Contudo, os trabalhos que têm por objetivo realizar estas medições em territórios extensos e em áreas de difícil acesso são onerosos, em termos de deslocamentos, aquisição e manutenção de aparelhos e contratação de equipe técnica. Neste sentido o sensoriamento remoto tem papel fundamental na facilitação de obtenção de informações hidrológicas (Jensen, 2009).

O lançamento da missão Landsat é um dos principais acontecimentos que potencializaram o uso do Sensoriamento Remoto na identificação, quantificação e estimativa da qualidade de corpos d'água. O satélite *Earth Resources Technology Satellite 1* (ERTS-1) foi lançado em 1972 e foi o primeiro a adquirir imagens da Terra de forma sistemática, seu nome foi posteriormente alterado para Landsat-1 (Williams *et al.*, 2006). Essa missão tem hoje mais de 40 anos sendo o Landsat-1 apenas o primeiro de uma série de lançamentos, o mais recente desta série foi lançado em 2013 (Knight e Kvaran, 2014), e recebeu o nome de Landsat-8. Além da missão Landsat, outras como Modis, Asar e Cbers podem hoje ser utilizadas de modo combinado para os estudos em hidrologia (Crétaux *et al.*, 2011). Recentemente foi lançada a missão Sentinel-2A, pela *European Space Agency* (ESA) com objetivo similar ao Landsat, porém com uma resolução espacial de 10 metros e uma frequência temporal maior, sendo uma oportunidade para novos estudos de monitoramento da água. Os estudos mais frequentes com

²Dados sem processamento do tipo *Near Real Time* - NTR

o uso de imagens óptica tem por objetivo identificar a localização de corpos hídricos, calcular a área do espelho d'água e os parâmetros de qualidade, como por exemplo a turbidez (Schultz, 1988; Birkett, 1995b; King *et al.*, 2005; Jain *et al.*, 2005; de Oliveira *et al.*, 2016).

Além das imagens ópticas os sensores radar altimétricos à bordo de satélite são uma importante ferramenta, que possibilitaram a medição do nível de oceanos, lagos, rios, além da espessura das camadas de gelo (Calmant *et al.*, 2008). Com o uso das micro-ondas, emitidas nas bandas Ka e Ku, o nível da superfície de água ou a espessura do gelo no nadir do sensor pode ser calculada (Phalippou *et al.*, 1999; Blarel *et al.*, 2016). Isso possibilitou a realização de trabalhos para locais de difícil acesso, além de gerar dados complementares à rede hidrológica existente, neste sentido surgiram bancos de dados globais que disponibilizam o nível das águas obtidos por satélite radar altimétrico, como é o caso do “*Database for Hydrological Time Series of Inland Waters*” (Schwatke *et al.*, 2015).

O sensoriamento remoto, utilizado de forma integrada, com imagens e altimetria, criou uma nova possibilidade de estudos, que permitem a quantificação da água através da relação existente entre a área do espelho d'água e o nível (Crétau *et al.*, 2011; Duan e Bastiaanssen, 2013; Abreu e Maillard, 2014; Henrique Costa *et al.*, 2016). Desta forma, o uso de dados de sensoriamento em estudos hidrológicos oferece possibilidades crescentes para a realização de estudos em escalas regionais e globais. A sua grande vantagem está na obtenção de dados de forma rápida e, na maior parte das vezes, gratuita, sem a necessidade de se obter dados *in situ*, que é muitas vezes um dos fatores limitantes na realização deste tipo de estudo.

2.2.2 Missões Altimétricas

A altimetria por satélite (AS) surgiu na década de 1970 com o lançamento dos satélites SKYLAB, GEOS-3 e SEASAT. O principal objetivo da altimetria radar foi o de medir a forma da Terra (McGoogan *et al.*, 1974), o que é muito simplório diante do grande potencial que se desenvolveu nas décadas seguintes. Em 1973 o satélite Skylab foi lançado, nos anos seguintes foram lançadas as missões GEOS-3 (1975-1978) e SeaSat (1978) (Vignudelli *et al.*, 2011). Essas missões realizavam a medição da altitude para atender as demandas das áreas da Geodésia, da Oceanografia, e da Hidrologia Continental. Nas décadas de 1980 e 1990 a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), fizeram investimentos significativos com o lançamento das missões Geosat (1985), ERS-1 (1991), TOPEX/Poseidon (1992) e ERS-2 (1995). As missões Geosat e ERS-1 tiveram como produto mais relevante os modelos geoidal e de superfície da topografia oceânica, esses são considerados

os melhores modelos já desenvolvidos (Smith e Sandwell, 1997). Os satélites ICESAT e Cryosat foram desenvolvidos para aplicações em estudos de monitoramento das calotas polares, com a medição da espessura do gelo (Calmant e Seyler, 2006). A Agência Espacial Russa também lançou um satélite altimétrico, o GEOIK, o qual pertencia a constelação Kosmos, cujo os objetivos foram o de gerar modelos gravitacionais e geoidais dos oceanos (Vignudelli *et al.*, 2011). No século XXI houve um crescimento significativo no número de missões lançadas (Tabela 2.1), o que fez aumentar o número de estudos com o uso de multi-sensores. Outro ganho foi o desenvolvimento de melhores tecnologias de posicionamento e de obtenção dos dados, que contribuíram para a melhoria da qualidade das medições.

Tabela 2.1: Missões altimétricas por satélite radar.

| Satélite | Agência | Lançamento | Altimetro | Banda | Período de revisita |
|-------------|----------------------------|---------------|------------|--------|---------------------|
| Jason-1 | CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA | 2001 | Poseidon-2 | Ku e C | 10 dias |
| Envisat | ESA | 2002 | RA-2 | Ku | 30-35 dias |
| IceSat-1 | NASA | 2003 | Laser | - | 8 e 9 dias |
| Jason-2 | CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA | 2008 | Poseidon-3 | Ku e C | 10 dias |
| CryoSat-2 | ESA | 2008 | Siral | Ku | 369 dias |
| HY-2A | China | 2011 | - | Ku e C | 14 dias |
| Saral | CNES-ISRO | 2013 | AltiKa | Ka | 35 dias |
| Jason-3 | CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA | 2015 | - | Ku e C | 10 dias |
| Sentinel-3A | ESA | 2016 | SRAL | Ku e C | 27 dias |
| SENTINEL-3B | ESA | 2018 | SRAL | Ku e C | 27 dias |
| IceSat-2 | NASA | Previsão 2018 | Laser | - | - |
| SWOT | CNES, NASA, CSA | Previsão 2021 | Karin | Ka | 21 dias |
| Jason-CS | EUMETSAT | Previsão 2020 | - | - | - |

Para os próximos anos estão previstas uma série de missões que irão contar com a implementação de tecnologias que tendem a melhorar ainda mais a precisão e a acurácia dos dados altimétricos. Além disso, o aumento da quantidade de missões contribuirá para a redução do intervalo temporal das medições, o que melhora a capacidade de geração de dados de nível para estudos em hidrologia.

2.2.3 Missões Altimétrica utilizadas neste trabalho

Envisat

A missão Envisat foi lançada em março de 2002, afim de dar continuidade às medições realizadas pelas missões ERS. Essa missão foi realizada através da cooperação entre *European Earth Observation Programme* e *European Space Agency* (ESA). A principal diferença do altímetro radar RA-2, à bordo do Envisat, em relação aos seus predecessores é que além do monitoramento dos oceanos e áreas recobertas por gelo, este teve como objetivos a realização de medições em águas continentais (Roca *et al.*, 2009). Em termos de ganho técnico, o Envisat possuía um sistema adaptável de *tracker*, que o tornou menos sensível as variações topográficas que os seus antecessores (Baker *et al.*, 2002). Isso trouxe contribuições diretas para seu uso nas áreas não oceânicas. Suas principais características estão na Tabela 2.2. Em 2012 a ESA declarou o fim da missão devido a perda de comunicação entre o satélite e a estação em Terra (ESA, 2014). No total foram 10 anos de medições, o que contribuí em muito para os estudos hidrológicos e oceanográficos, com a possibilidade de construção de uma extensa série histórica.

Saral

A missão Saral foi lançada em 25 de fevereiro de 2013 (atingiu sua órbita nominal em 13 de março de 2013), e é a continuidade de uma série de missões bem sucedidas, tais como TOPEX/Poseidon e Jason. A *Indian Space Research Organization* (ISRO), se uniu ao CNES, a NASA, ao EUMETSAT e a NOAA para o desenvolvimento e lançamento deste satélite. O Saral é considerado o sucessor do Envisat por utilizar as mesma órbitas que ele, o que viabilizou o uso combinado de dados dessas duas missões, aumentando ainda mais a série temporal produzida pelo Envisat³. Apesar de ocuparem a mesma órbita os satélites Envisat e Saral possuem diferenças significativas, sendo a principal delas associada aos seus sensores altimétricos. O sensor altimétrico do Saral é o Altika, que opera na banda Ka, essa banda possui comprimento de onda menor que a do sensor RA-2 (banda Ku), embarcado no Envisat o que em tese gera um ganho em precisão. Além disso, a frequência de envio de pulsos foi incrementada no Saral, o que gerou um aumento no número de medições ao longo do traço do satélite. Enquanto o Envisat gerava uma medição de altitude a cada ≈ 365 metros, no Saral foi reduzido para ≈ 165 metros (Baker *et al.*, 2002). As principais características do Saral estão sintetizadas na Tabela 2.2.

Em março de 2015 o satélite apresentou problemas nas engrenagens internas que reposicionavam os retrofoguetes para ajustes de órbita, CNES e ISRO decidiram que,

³Série temporal de 15 anos, a exceção de dados do ano de 2012 até o início de 2013, período em que o Envisat já estava inoperante.

a partir de julho de 2016, o Saral entraria na fase nomeada de Saral *Drifting Mode* (Modo de derivação), que consiste na variação de sua órbita sem a manutenção de um padrão de repetição⁴.

Sentinel-3A

O satélite Sentinel-3A foi lançado em 16 de fevereiro de 2016 e é o primeiro de uma série de três satélites (Sentinel-3B e Sentinel-3C) que têm o objetivo de obter informações oceânicas e continentais simultaneamente. A previsão de vida útil desta missão é de 20 anos, o que pode torná-la a missão de maior longevidade já lançada. Ela é fruto da parceria entre ESA e EUMETSAT e tem como objetivo medir a topografia da superfície oceânica, temperatura continental e oceânica e a realização de imagens coloridas da superfície dos mares e continentes com alta acurácia. Essa missão satisfaz a necessidade de continuidade das missões ERS, Envisat e SPOT VEGETATION (dados de vegetação), com melhora na performance dos instrumentos. A sua cobertura e suas órbitas são similares às do Envisat (Sentinel-3, 2013).

O altímetro a bordo do Sentinel-3A é o *Synthetic Aperture Radar Altimeter* (SRAL), derivado do RA-2, embarcado no Envisat. Contudo este sensor realiza não só no modo LRM, mas também no modo SAR (Sentinel-3, 2013). As características do Sentinel-3A estão sintetizadas na Tabela 2.2.

2.2.4 Funcionamento do Radar

O termo radar é derivado de *Radio Detection and Ranging* e é composto por um gerador de pulsos, um transmissor, um receptor, um gravador e uma antena (Figura 2.5) (Ridenour, 1965). O sensor radar emite ondas eletromagnéticas e, por isso, independe da energia do sol ou das propriedades termais da Terra para obter informações da superfícies. As ondas eletromagnéticas (energia) são emitidas e transmitidas em direção ao alvo onde acontece o retroespalhamento. A porção das ondas que reflete na direção da antena do satélite é registrada (Jensen, 2009).

O radar emite ondas eletromagnéticas em comprimentos de onda conhecidos como micro-ondas, as mais comumente utilizadas têm sua nomenclatura herdada da Segunda Guerra Mundial quando os primeiros sistemas foram implementados com a finalidade de monitorar a aproximação de aeronaves (Tabela 2.3). As bandas Ku e Ka são as mais utilizadas nos altímetros a bordo dos satélites que tem por objetivo a mensuração do nível de água, pois a reflexão dessas micro-ondas pela água acontece de forma quase-especular.

⁴fonte: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/current-missions/Saral.html>

Tabela 2.2: Características do satélite Envisat.

| Parâmetro | Envisat | Saral | Sentinel-3A |
|------------------------------------|-----------------|------------|-------------|
| Órbitas-Tracks | 501-1002 | 501-1002 | 385/770 |
| Revisita | 35 dias | 35 dias | 27 dias |
| Distância entre órbitas no Equador | 80 Km | 75 Km | 104 Km |
| Altitude no Equador | 764-825 Km | 786-814 Km | 814,5 Km |
| Banda de operação | Ku | ka | ku |
| Frequência de aquisição | 20 Hz | 40 Hz | 20 Hz |
| Largura de banda | 320, 80, 30 MHz | 480 MHz | 350 MHz |
| Acurácia (oceano) | ± 2,5 cm | ± 3,2 cm | ± 3,0 cm |

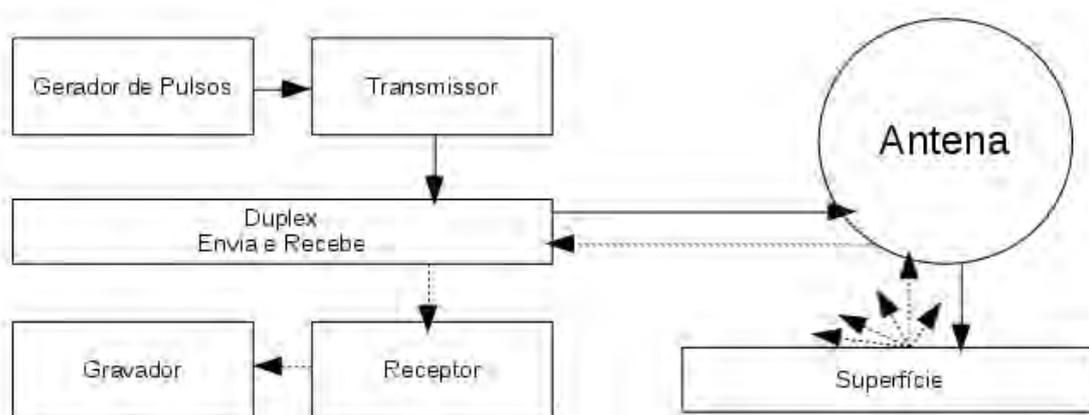


Figura 2.5: Esquema básico dos elementos que compõem um radar. Os equipamentos são um gerador de pulsos, um transmissor, um receptor, um gravador e uma antena.

Tabela 2.3: Principais bandas utilizadas em radares. Adaptado de: Carver *et al.* (1985)

| Banda | Frequência | Comprimento de onda |
|-----------|-------------------|---------------------|
| P | 400 Mhz | 75 cm |
| L | 1275-1400 Mhz | 23,5-21,4 cm |
| S | 3500 Mhz | 8,6 cm |
| C | 5200-6600 Mhz | 5,7-4,5 cm |
| X | 8800 Mhz-10,7 Ghz | 3,4-2,8 cm |
| Ku | 13,5-13,9 Ghz | 2,22-2,15 cm |
| K | 18-22,2 Ghz | 1,66-1,35 cm |
| Ka | 31,4-37,5 Ghz | 9,55-8 mm |
| Q | 53,6 Ghz | 5,6 mm |
| W | 96 Ghz | 3,13 mm |

A interação da energia micro-ondas com a superfície é explicada através de uma série de relações matemáticas. Essas levam em conta a velocidade de propagação, o ângulo de visada do sensor, a quantidade de energia transmitida, o ruído causado pela atmosfera, entre outros fatores (Ridenour, 1965). Através da equação radar (Equação 2.3), é possível compreender e calcular as variáveis inerentes a força do retorno do sinal radar (Moore *et al.*, 1998; Kasischke *et al.*, 1984).

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \sigma A_r}{(4\pi)^2 \cdot R^4} \quad (2.3)$$

onde P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida para o alvo, G_T é o ganho da antena na direção do alvo, R é a distância em *range* do transmissor ao alvo, σ é a área de retroespalhamento efetivo do alvo (seção transversal de radar) e A_r é a área da antena receptora (Jensen, 2009). A equação radar pode ser descrita conforme Jensen (2009):

A potência recebida pelo sistema radar é uma função de um pulso de energia eletromagnética, focalizado em um feixe com uma abertura angular por uma antena, de forma que o fluxo torne-se maior por um fator de ganho, em uma onda que se expande esfericamente. A energia focalizada ilumina uma área no solo que tem uma seção transversal σ . A seção transversal de radar é definida como o equivalente de uma área de reflexão perfeita, refletindo isotropicamente. A energia retroespalhada da superfície expande-se, mais uma vez, esfericamente. Finalmente, a área da antena receptora intercepta e registra uma parte da onda refletida.

Para sistemas que possuem antena de envio e retorno na mesma posição o ganho transmitido e recebido pela antena podem ser combinados e a equação radar passa a ser Equação 2.4, onde o termo λ é o comprimento de onda do sistema radar (Carver *et al.*, 1985).

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (2.4)$$

Existem variações de parâmetros das micro-ondas enviados pela antena tais como a direção de azimute, de alcance e de visada; o ângulo de depressão, de visada e de incidência; e a polarização, que são conhecidos como características geométricas do sistema radar (Jensen, 2009). Essas características elétricas e geométricas são utilizadas tanto na formação da imagem como na realização de correções (Figura 2.6).

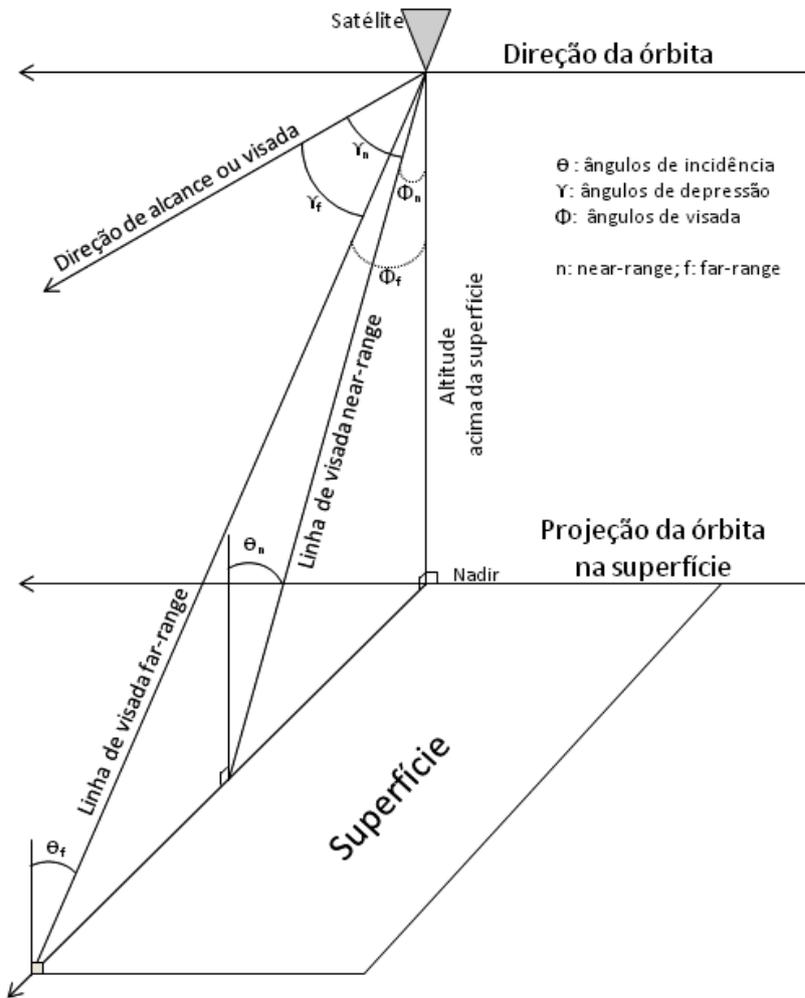


Figura 2.6: Características Geométricas Radar. A figura mostra os ângulos e direções de incidência, depressão e visada do satélite bem como sua direção de deslocamento e altitude em relação a superfície. Além disso, estão representadas as linhas de visada em alcance próximo e distante, a projeção da órbita, a direção de alcance e a superfície iluminada. Adaptado de: Jensen (2009).

2.2.5 Radar Altimétrico

O princípio de funcionamento da altimetria radar é baseada no envio de pulsos na direção da superfície terrestre, esses pulsos são, em parte, refletidos na direção do sensor onde são registrados. A energia eletromagnética percorre a distância de ida e volta à superfície com velocidade próxima a da luz ($\approx 299.792.458 \text{ m}^{-1}$ no vácuo). A antena do radar registra o tempo gasto para o sinal percorrer sua trajetória, como o caminho percorrido pelas ondas eletromagnéticas é de ida e volta, o tempo gasto deve ser dividido por dois e multiplicado pela velocidade da luz (Chelton *et al.*, 2001). A partir desse resultado basta subtrair a altitude do satélite em relação ao elipsoide para estimar a altitude da superfície abaixo do sensor (Gardini *et al.*, 1995). A Equação 2.5 é utilizada para a realização desse cálculo, onde R é o *range* (alcance), c é a velocidade da luz e H_s é a altitude do satélite acima da superfície. Este tipo de sensor radar envia pulsos no nadir e gera informações pontuais, diferente satélites radar imageadores que tem visada lateral.

$$H = \frac{2R * c^{-1}}{2} - H_s \quad (2.5)$$

Grande parte dos satélites altimétricos radar tem sensores do tipo *Low Resolution Mode - LRM* (Modo de Baixa Resolução). Nesse caso o sensor trabalha como um altímetro de pulso limitado, que é baseado na transmissão de pulsos de curta duração, alguns nano-segundos (ns), e com largura de banda relativamente ampla (Chelton *et al.*, 1989). O sinal é transmitido de forma contínua e o retorno é processado e resumido com o objetivo de reduzir os ruídos causados por respostas múltiplas (Fenoglio-Marc *et al.*, 2015). Através desse processo é medido o tempo de duração entre a transmissão e o retorno de um pulso e, conhecidos a altitude do satélite, a velocidade da luz e o tempo gasto no deslocamento das ondas é possível estimar a altitude da superfície no nadir.

Funcionamento do Radar Altimétrico - LRM

O radar altimétrico LRM conta com uma série de processamentos para obter a altitude da superfície de forma precisa. Devido às variações topográficas, o *range* do satélite pode ser maior que aquele possível de ser registrada pelo sistema de gravação do satélite (Roca *et al.*, 2009). Por isso é necessário que o sensor acompanhe a variação da superfície continuamente de modo a estimar o tempo necessário para que um pulso atinja a superfície e retorne a antena radar. Esta operação é executada pelo *tracker* (ou rastreador), a bordo do satélite. O *tracker* é um algoritmo responsável por estimar a janela de gravação (intervalo de tempo) de modo que a parte inicial do eco do sinal seja mantida dentro da janela de respostas, independentemente da sua forma. Em alguns

satélites, a exemplo do Envisat, a resolução do radar pode ser ajustada e assim melhor estimar o tamanho da janela de gravação de acordo com as feições topográficas (Figura 2.7) observadas (Baker *et al.*, 2002).

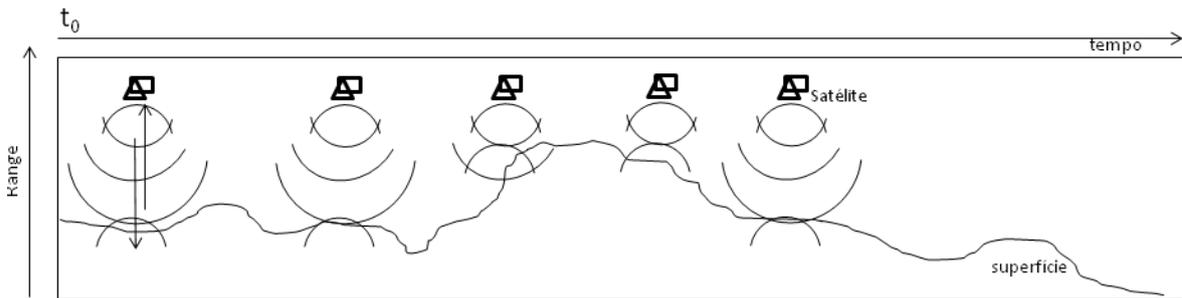


Figura 2.7: *Tracker* sobre a superfície. Ao longo do caminho percorrido pelo satélite a topografia pode ser irregular, implicando em uma variação no tempo de retorno do sinal e conseqüentemente das estimativas de tempo calculadas para abertura da janela de gravação.

O sinal radar é gerado e transmitido em um intervalo de tempo considerado longo, na ordem dos micro-segundos (μs) (Chelton *et al.*, 1989). A fim de melhorar a resolução espacial dos dados os pulsos são convertidos de um intervalo de tempo longo para curto (de micro-segundos - μs para nano-segundos- ns), com a utilização de técnicas de compressão de pulsos. Esses dados possuem algumas centenas de pulsos, que são então discretizados e gravados na janela estimada pelo *tracker*. Esses valores correspondem as amplitudes ou potências dos retornos e cada um é gravado em um *bin*. Esses dados podem ser representados como uma forma de onda (ou *waveform*) que ordena os retornos em função do tempo.

Formas de onda, *retracker* e *footprint*

Cada uma das formas de onda (FOs) captura uma amplitude altimétrica fixa, que fica próxima de 40 m para o Saral e de 60 m para o Envisat, e depende da correta estimativa de tempo de abertura, realizada pelo *tracker*, para evitar a perda de dados. Cada um dos pontos gravados ao longo da projeção das órbitas dos satélites possui uma FO, que pode ser observada individualmente (Figura 2.8), nas quais são aplicados algoritmos específicos com a finalidade de estimar as altitudes das superfícies.

As formas de onda podem conter respostas de vários pontos da superfície, pois as ondas eletromagnéticas respeitam os princípios ópticos, sendo refletidas em várias direções. Aquelas que são refletidas no nadir tendem a representar a resposta de maior potência (amplitude) e aparecem como picos nas FOs. Porém, o dado refletido e registrado não será apenas o correspondente ao nadir, a menos que a superfície tenha um comportamento especular muito marcante. Como as superfícies são irregulares, a

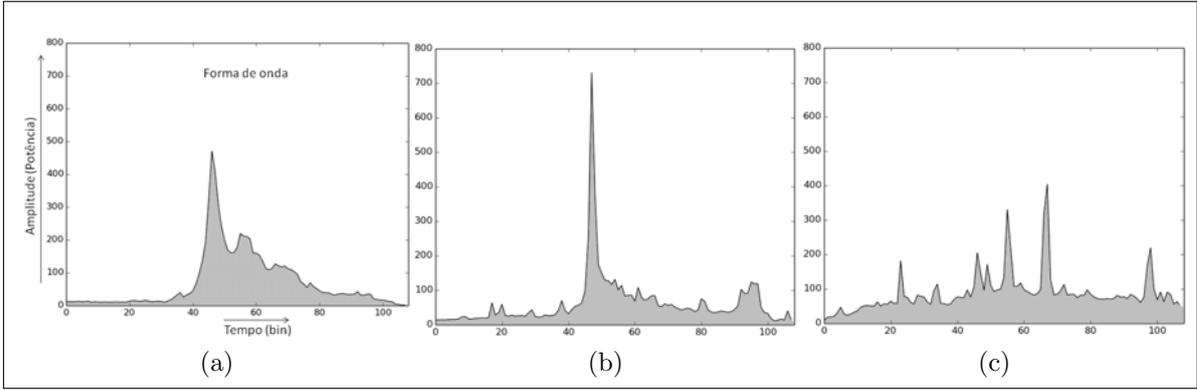


Figura 2.8: Formas de onda, o eixo x representa o tempo ($bins$) e o eixo y corresponde as amplitudes do sinal. (a) forma de onda média em águas abertas; (b) forma de onda média em florestas; (c) forma de onda média em áreas agrícolas.

contribuição de áreas vizinhas ao ponto nadir sempre estará presente no sinal representado na FO. Quanto mais irregular for a superfície, maior será a área responsável pelas respostas registradas. A área interceptada tem sua origem no ponto central (nadir) e expande de forma circular ao longo da superfície (Lee, 2008), essa área é conhecida como pegada do satélite ou *footprint* (Figura 2.9). A área máxima da pegada do satélite pode ser calculada com o uso da Equação 2.6, desde que sejam conhecidos os parâmetros R_0 (*range* do satélite), R_e (raio da Terra), c (velocidade da luz) e τ (tempo de ida e volta do pulso). O Envisat e o Saral, tem raios, respectivamente, de oito e quatro quilômetros. Já o Sentinel-3A possui uma pegada elíptica que tem raio de 300 metros na direção de deslocamento do satélite e cerca de 2 quilômetros na direção perpendicular.

$$A_m = (\Pi R_0 c \tau) / (1 + R_0 / R_e) \quad (2.6)$$

Os algoritmos de *retrackers*, que tem por objetivo calcular as altitudes das superfícies, foram desenvolvidos em conjunto com o *tracker*, o *footprint* e as formas de onda dos dados dos satélites radar altimétricos.

Retrackers - físicos e empíricos

Os dados obtidos à bordo dos satélites são enviados para uma base de recepção em terra aonde são processados com o objetivo de estimar a altitude da superfície terrestre, para isso são utilizados os algoritmos *retracker*. A maioria desses algoritmos foram desenvolvidos para estimar a altitude das superfícies oceânicas e de áreas recobertas por gelo. Dentre eles os mais utilizados são o “Ocean”, o “ICE-1”, o “Ice-2” e o “Threshold”.

Algoritmos *retracker* podem ser divididos em dois tipos, os físicos e os empíricos. Os *retrackers* físicos são baseados no conhecimento dos parâmetros físicos do retroespalhamento das micro-ondas, um exemplo é o modelo de Brown, que é amplamente utilizado para realizar o *retracking* das respostas recebidas de oceanos e águas abertas (Vignudelli *et al.*, 2011). A forma de onda teórica de Brown foi desenvolvida por Brown (1977) (Figura 2.10), ela serviu de base para o *retracker* Ocean-1, que foi utilizado para estimar as altitudes dos oceanos a partir dos dados do satélite Envisat (Vignudelli *et al.*, 2011). Existem outros modelos físicos, como por exemplo os *retrackers* oceânicos não lineares (Vignudelli *et al.* (2011, pp.81-87)).

Os modelos empíricos de classificação das formas de onda têm como base as propriedades estatísticas dos dados ou funções de ajuste das FOs. A principal referência bibliográfica sobre os *retrackers*, utilizada neste trabalho, é o livro Coastal Altimetry de (Vignudelli *et al.*, 2011).

Offset centre of gravity retracker (OCOg)

O algoritmo OCOg calcula o centro de gravidade da FO com base na força das respostas gravadas nos *bins*. Este algoritmo tem uma abordagem puramente estatística, sua forma e seus parâmetros estão ilustrados na Figura 2.11. Esse funciona a partir da definição de um retângulo sobre o centro de gravidade efetivo da forma de onda. Nesse retângulo são calculados a amplitude (A), a largura (W) das formas de onda e o *bin* do centro de gravidade. Para isso são utilizadas as Equações (2.7,2.8, 2.9).

Alguns dos algoritmos tradicionalmente utilizados foram desenvolvidos com o uso do OCOg, sendo um dos mais conhecidos o ICE-1, implementado para a estimativa de altitudes a partir dos dados do sensor RA-2 do Envisat.

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t)}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)}} \quad (2.7)$$

$$W = \left(\frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^4(t)}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$COG = \frac{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} iP_i^2(t)}{\sum_{i=1+n_1}^{N-n_2} P_i^2(t)} \quad (2.9)$$

Nas equações, P_i é o valor da potência do retorno no *bin* i , N é a quantidade de *bins* representados na forma de onda e n_1 e n_2 são os *bins* afetados pelo *aliasing* no início e no final da forma de onda. A partir dos resultados obtidos nas equações 2.7, 2.8, 2.9 calcula-se a posição do *leading edge* da forma de onda (Equação 2.10).

$$LEP = COG - \frac{W}{2} \quad (2.10)$$

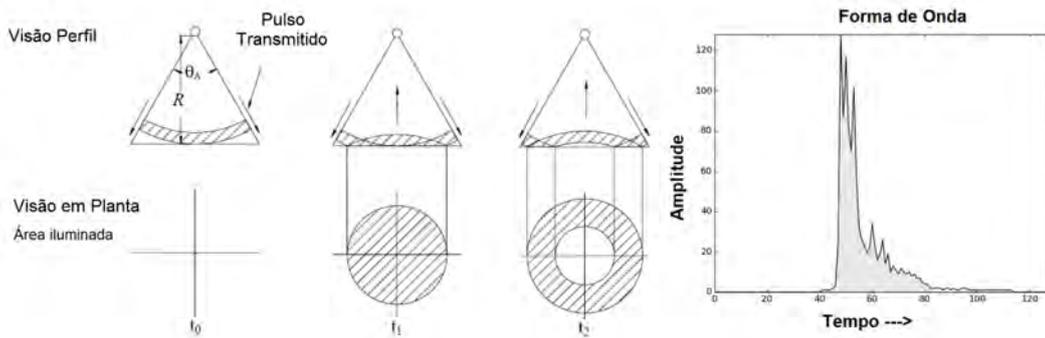


Figura 2.9: Da esquerda para a direita é representado em perfil e em planta a evolução da área iluminada pelo sensor, conforme o tempo passa o círculo se expande, como resultado desse processo tem-se a forma de onda, representada à direita. Fonte: adaptado de (Lee, 2008).

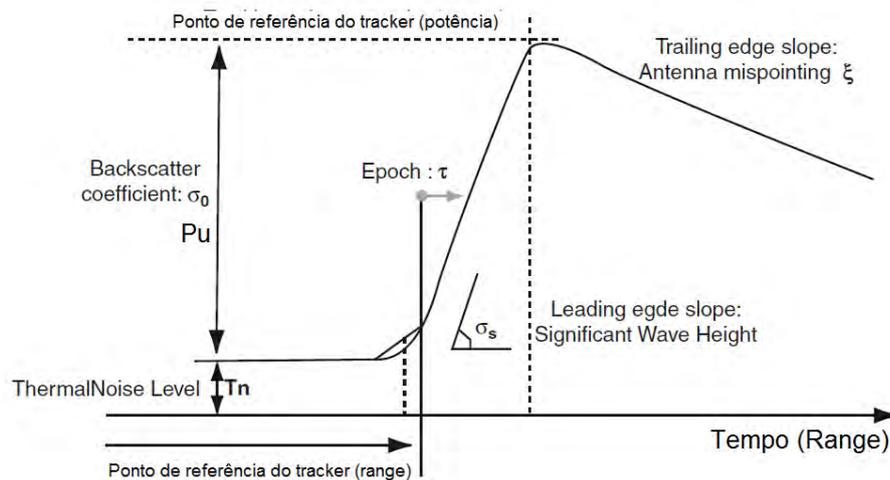


Figura 2.10: Modelo teórico de Brown e seus parâmetros, τ é a diferença de tempo para receber o eco da superfície, σ_s é a inclinação da frente de onda (*leading edge*), P_u é a amplitude do sinal relacionado ao coeficiente de retroespalhamento σ_0 , T_n é o nível de ruído termal, ξ é o *mispointing* do altímetro e σ_s corresponde à assimetria da forma de onda. Fonte: Vignudelli *et al.* (2011).

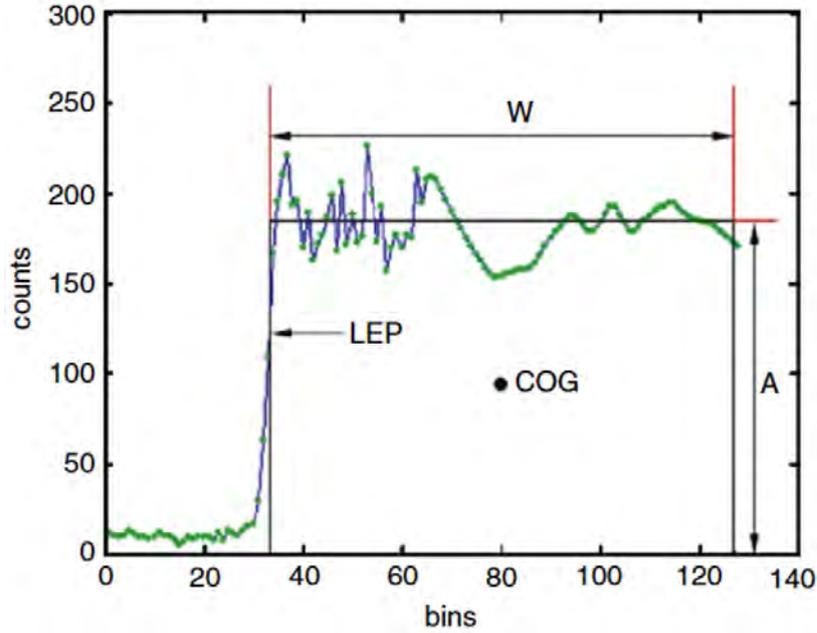


Figura 2.11: Modelo teórico do Centro de Gravidade. W representa a largura efetiva da forma de onda, LEP corresponde ao ponto médio da frente de onda, A a amplitude dos retornos registrados e COG é o centro de gravidade da forma de onda. Fonte: Vignudelli *et al.* (2011).

A partir do LEP e sabendo-se o bin nominal da FO é possível calcular as altitudes da superfície (AS) com a aplicação da Equação 2.11.

$$AS = (Alt - ((Ntrk - NLEP) * sr)) \pm cor \quad (2.11)$$

Onde $NLEP$ é o bin encontrado a partir do LEP , $Ntrk$ é o $track$ nominal, Alt é a altitude do satélite em relação ao elipsoide, sr é a distância entre os $bins$ e cor são as correções físicas e atmosféricas aplicadas no cálculo da altitude.

Threshold Retracker

O algoritmo *Threshold* (limiar) foi desenvolvido por Davis (1995; 1997), a exemplo do OCOG, ele também é baseado no princípio do centro de gravidade (COG) e o bin para aplicação do *retracker* é definido a partir da interpolação linear da porção de maior ângulo interceptado pelo limiar calculado. Esse limiar refere-se a máxima amplitude da forma de onda ou a amplitude do COG . As Equações 2.12, 2.13 e 2.14 são utilizadas para a aplicação do *retracker*, onde A é a amplitude, que pode ser calculada com a aplicação da Equação 2.7, P_N corresponde ao retorno médio dos cinco primeiros $bins$, q é o limiar e G_k é a amplitude no Kth bin onde k é o primeiro bin que excede o limiar. Segundo Davis (1997) o nível de corte pode assumir valores de 25%, 50% e 75%, sendo

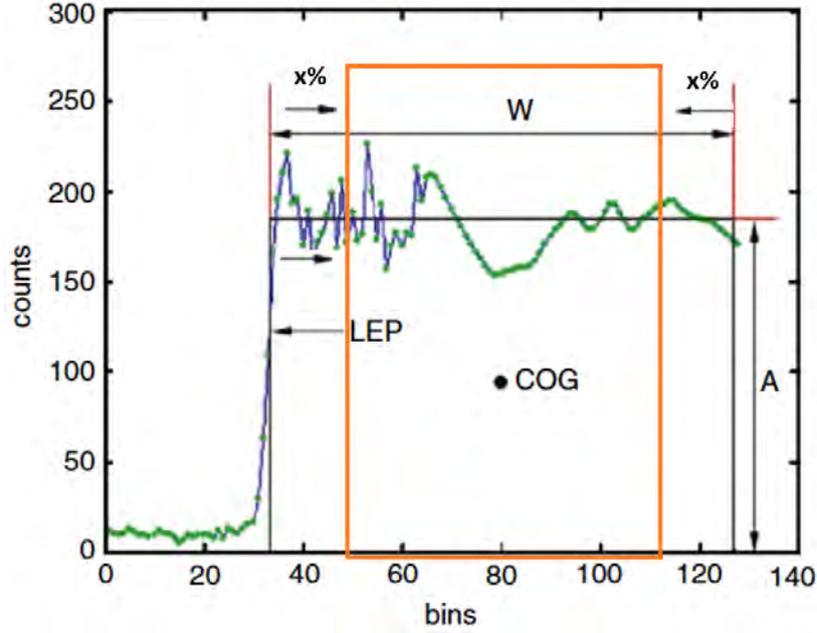


Figura 2.12: Modelo Teórico do limiar do Centro de Gravidade. Assim como no modelo teórico do Centro de Gravidade são indicados: W que representa a largura efetiva da forma de onda (FO), LEP corresponde ao ponto médio da frente de onda, A a amplitude dos retornos registrados e COG é o centro de gravidade da FO. Porém, o limiar reduz a FO de acordo com a porcentagem escolhida (retângulo laranja), esse esquema também é válido para o *Improved Threshold*. Fonte: adaptado de Vignudelli *et al.* (2011).

que em superfícies com predomínio de retroespalhamento o limiar de 50% é o mais indicado (Figura 2.12).

$$P_N = \frac{1}{5} \sum_i^5 P_i \quad (2.12)$$

$$T_h = P_N + q \cdot (A - P_N) \quad (2.13)$$

$$G_r = G_k - 1 + \frac{T_h - P_{k-1}}{P_k - P_{k-1}} \quad (2.14)$$

Improved Threshold Retracker

O *Improved Threshold Retracker* (ITR) é uma adaptação alternativa para formas de ondas complexas em que o OCOG e o *Threshold* não apresentam bons resultados. Esses métodos podem utilizar dados auxiliares externos, como é o caso daquele desenvolvido por Hwang *et al.* (2006). O ITR trabalha a partir da identificação das sub-formas de onda (SFO) dentro de cada FO. Para identificar as SFO, é definido um valor para

destar o primeiro pico da FO e dos picos sucessivos, em seguida são computados os *leading edges* (frentes de onda) dos picos subsequentes. Com os *bins* das frentes de onda identificados, as altitudes são calculadas para cada um deles e comparadas com a altitude obtida na forma de onda anterior. Por fim é calculada a altitude da superfície, sendo a de menor diferença em relação a FO anterior considerada como a resposta mais adequada. Por se tratar de uma adaptação de outros *retrackers* as equações utilizadas foram tomadas de (Davis, 1995; 1997) - equações: 2.7, 2.12, 2.13, 2.14 - .

Contudo os métodos desenvolvidos com o ITR apresentam metodologias discretamente distintas para a identificação dos *bins* a partir da SFO e do *leading edge*. Bao *et al.* (2009) identificou os *bins* de início e fim da FO associando o método OCOG e a Equação 2.7 para computar a amplitude do sinal e posteriormente estimar a altitude da superfície, Lee *et al.* (2008) identificou os valores máximo e mínimo do *leading edge* para evitar picos antes ou depois dessa parte da FO e estimou o *bin* correspondente ao retorno nadir.

Beta Parameter Retracker

O *Beta Retracker* foi desenvolvido pela NASA e possui duas versões, uma com cinco e outra com nove parâmetros, que são aplicados respectivamente para FOs com um ou dois *leading edges* (Lee, 2008). Esses algoritmos são uma adaptação do modelo teórico de Brown, entretanto este é mais simples e conta com apenas um parâmetro de ajuste, não relacionado às propriedades físicas. Os outros parâmetros são extraídos diretamente das características da FO (Figura 2.13).

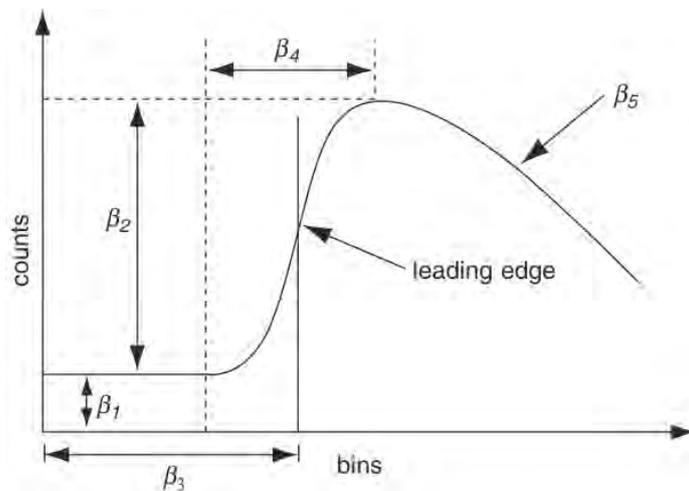


Figura 2.13: Modelo Beta Parameter Retracker criado pelo grupo *Goddard Space Flight Center* (GSFC) da NASA que é utilizado para o *retracking* de formas de onda com um *leading edge*. Fonte: (Zwally, 2016).

Funcionamento do Radar Altimétrico de Abertura Sintética (SAR)

O Radar Altimétrico de Abertura Sintética (SAR) retorna as mesmas informações que o LRM, sendo apenas a aquisição do dado feita de forma diferente, o resultado das medições também é dado de forma pontual e pode ser representado pelas FOs (Sentinel-3, 2013). O SAR possui a propriedade de, através de operações computacionais, simular um tamanho de antena superior ao real, devido a utilização do efeito *doppler* que está relacionado às mudanças de frequências causadas pelo deslocamento relativo dos alvos no sentido de voo do satélite (Hall, 1998). Isso faz com que a resolução espacial do satélite seja melhor na direção de seu deslocamento.

O pulso do radar altimétrico SAR é enviado em direção a superfície, o sinal refletido é registrado pela antena. Com o uso do efeito *doppler* apenas os dados refletidos mais próximos do nadir são gravados, isso resulta em uma resolução espacial mais fina. Um dos maiores benefícios do *delay/Doppler* é o incremento da resolução, com a redução do *footprint* ao longo do *track* do satélite quando comparado com o LRM (Egido e Smith, 2017). No caso do LRM o pulso é enviado e ao atingir a superfície se expande em anéis concêntricos onde as respostas da área circular são enviadas ao sensor, já no modo SAR o pulso enviado e a modulação feita através da *doppler* permitem que ao longo do tempo as médias registradas sejam apenas as de uma faixa de cerca de 300 metros⁵ na direção do deslocamento do satélite e o objeto observado seja o do ponto nadir (Figura 2.14).

A Figura 2.15 mostra a evolução do pulso radar ao longo do tempo e do espaço, uma parte do sinal está na cor vermelha e a outra em verde, afim de dividir o pulso entre a parte que é enviada e a parte que está mais próxima do ponto nadir. Dessa forma, os retornos gravados pelo satélite são apenas aqueles da parte verde do pulso, o que permite o registro apenas das médias dos retornos desta pequena área, ao invés de serem feitas as médias de toda a área circular recoberta pelo sinal radar.

2.3 O estado da arte da Altimetria Radar

A altimetria por satélite radar possui uma série de aplicações apresentadas em literaturas específicas, tais como livros e manuais, além dos artigos resultantes de pesquisas na área. Chelton *et al.* (2001) apresenta no livro “Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications”, além dos conceitos referentes ao funcionamento da altimetria por satélite radar, aplicações em estudos tais como a circulação oceânica em grande escala e as correntes oceânica. Aplicações em áreas recobertas por gelo e em hidrologia continental são apresentadas em Rosmorduc *et al.* (2006), no livro

⁵para o satélite Sentinel-3A

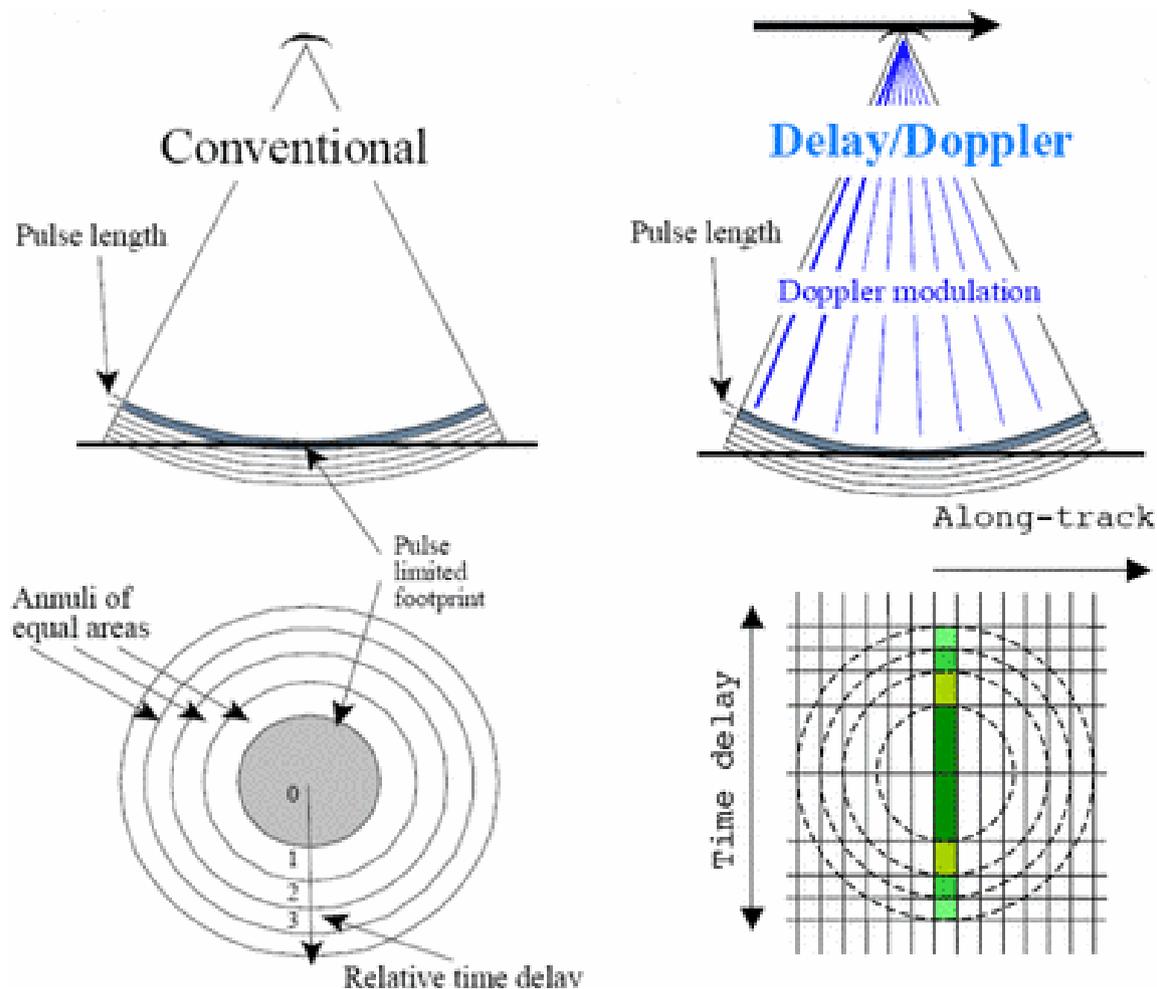


Figura 2.14: A técnica *Doppler* é empregada para a redução do *footprint* ao longo o *track* do satélite, o que gera um aumento da precisão. Fonte: Rosmorduc *et al.* (2006) e R.K. Raney, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory

“Radar Altimetry Tutorial”.

Vignudelli *et al.* (2011) aborda vários dos problemas presentes no uso da altimetria em regiões costeiras e propõe algumas soluções para minimizar os erros de medição nessas áreas. As dificuldades e limitações dos estudos estão relacionados principalmente à dificuldade de aplicação das correções físicas e atmosféricas, devido a complexidade do sinal retornado causada pela heterogeneidade da cobertura do solo. Mercier *et al.* (2010) desenvolveram o projeto PISTACH (*Prototype Innovant de Système de Traitement pour les Applications Côtières et l’Hydrologie*) que teve por objetivo implementar correções adicionais aos produtos altimétricos do satélite Jason-2 em estudos na região costeira. A Figura 2.16 mostra como o pulso enviado pelo altímetro se comporta no espaço-tempo quando há uma transição entre oceano e continente, os anéis inicialmente abarcam apenas a área recoberta por água e as repostas são registradas conforme o

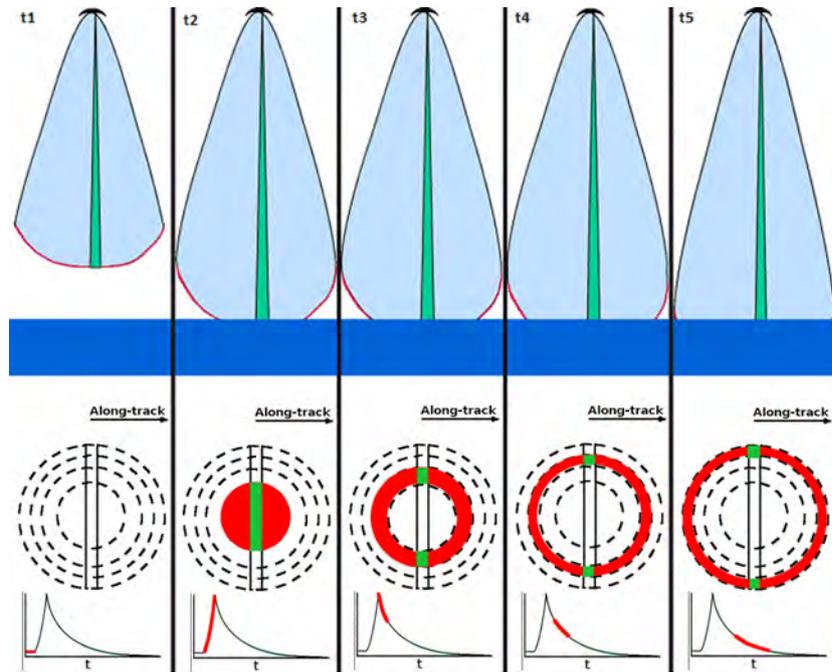


Figura 2.15: A figura mostra a evolução do pulso radar, da esquerda para direita. No tempo t_1 o pulso ainda não atingiu a superfície, assim não existem repostas registradas no *footprint* (anéis circulares) e nem no gráfico que representa a forma de onda (porção destacada em vermelho). Quando o pulso atinge a superfície a antena passa a registrar os retornos que estão representados no *footprint* e na forma de onda, como pode ser visto em t_2 a parte em vermelho corresponde a área total atingida pelos pulsos do radar, já a parte em verde corresponde apenas ao sinal registrado. Adaptado de Rosmorduc *et al.* (2006) e R.K. Raney, Johns Hopkins University.

esperado (em azul no gráfico da forma de onda). Ao atingir o continente os retornos ficam mais fortes que os da água e irregulares (em vermelho no gráfico da forma de onda), o que prejudica a aplicação dos algoritmos de *retracker*.

Os dados altimétricos produzidos podem ser utilizados para complementar os dados convencionais produzidos nas estações fluviométricas, na criação de séries temporais, na elaboração de perfis altimétricos de rios e, também, para o nivelamento de estações *in situ* (Calmant e Seyler, 2006). Devido a sua cobertura global, a altimetria radar pode ser aplicada em áreas continentais de difícil acesso, o que possibilita a geração de dados para corpos hídricos não monitorados. Dentre os problemas de aplicar a AS em hidrologia está a frequência de retorno dos satélites (Rosmorduc *et al.*, 2006), que é incompatível com o modelo tradicional de medições diárias⁶. Além disso, a incerteza é também um fator limitador desta área, uma vez que o erro das medições em águas interiores pode variar de poucos centímetros a alguns metros (Maillard *et al.*,

⁶Em certos pontos de monitoramento é possível fazer medições contínuas. No caso dos dados disponibilizados no Brasil, pela ANA, medições realizadas as 07:00 e as 17:00 horas, além do valor médio dessas duas.

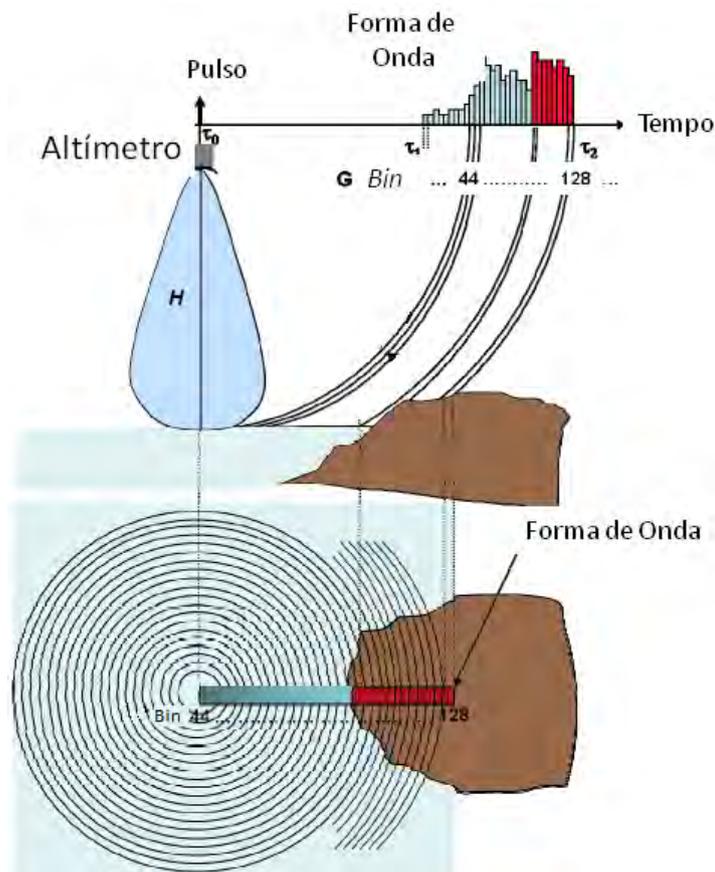


Figura 2.16: Pulso radar altimétrico na transição entre oceano e continente. A forma de onda tem comportamento dentro do esperado enquanto os anéis do sinal radar estão sobre a água (em azul no gráfico), mas ao atingir a costa os retornos ficam mais fortes e irregulares (em vermelho no gráfico). Fonte: adaptado e traduzido de Mercier *et al.* (2010)

2015). Diante das potencialidades de aplicação da hidrologia continental uma série de trabalhos foram realizados, tanto com a utilização dos dados como no tratamento dos erros inerentes à AS.

Birkinshaw *et al.* (2010) realizaram um estudo na bacia do Rio Mekong com dados dos satélites ERS-2 e Envisat. O principal objetivo do trabalho foi de estimar as vazões diárias do rio com o auxílio da altimetria radar. A aplicação da regressão linear resultou em uma melhoria do ajuste do modelo (R^2) de 0,88 para 0,93 nos locais onde não há estação fluviométrica *in situ*. Os autores destacam que o método desenvolvido por eles é dependente da qualidade dos dados de precipitação, obtidos através de satélites como o TRMM⁷, com essa ressalva, destacam o grande potencial do uso da altimetria radar na estimativa das vazões.

⁷Missão que teve com um dos principais objetivos a medição da precipitação. Operou entre os anos de 1997 e 2015. Sítio: <https://pmm.nasa.gov/TRMM/mission-overview>

Papa *et al.* (2012) realizaram um estudo das descargas do rios Ganga e Brahmaputra na Bacia do Bengal, para isso foram utilizados dados do satélite Jason-2. Os dados utilizados cobrem o intervalo compreendido entre meados de 2008 e dezembro de 2011. O erro médio quadrático calculado foi de 0,28 m para o Ganga e 0,19 m para o Brahmaputra. A partir desses dados foram calculadas as vazões dos rios, concluiu-se que é possível utilizar os dados do satélite Jason-2 para a estimativa do nível da água e também da vazão dos rios.

Michailovsky *et al.* (2012) tiveram como objetivo a avaliação do potencial de uso da AS para obtenção no nível e vazão na bacia do rio Zambezi, a maior bacia do Sudoeste da África. Para isso os dados altimétricos radar do satélite Envisat foram comparados aos obtidos nas estações *in situ*. Os resultados mostraram erros entre 0,34 m e 0,72 m, para estações virtuais que coincidem com as *in situ* e 0,27 m a 1,07 m, para as não coincidentes. Em termos percentuais os erros de estimativas da vazão foram semelhantes aos calculados para o nível. De acordo com os autores, o uso combinado dos dados do Envisat com modelos hidrológicos de bacia poderá melhorar a estimativa de nível e vazão com incremento das resoluções temporal e espacial.

Becker *et al.* (2014), com o uso de dados do Envisat, realizaram um estudo na bacia do Congo. O estudo fez uso de dados do período compreendido entre os anos de 2003 e 2009. Foram elaboradas 140 séries temporais para o Rio Congo e seus tributários. A partir da análise de *cluster* foram identificados grupos com regimes hidrológicos de características semelhantes, que foram divididos em nove categorias. O resultado do trabalho mostrou o potencial da altimetria para o monitoramento espaço-temporal da variação de nível da água para grandes bacias. Os autores sugerem que o uso conjunto de dados de várias missões altimétricas pode potencializar a aplicação da altimetria no monitoramento de grandes rios ao contribuir com o aumento da frequência temporal.

No Brasil, a aplicação da altimetria radar é muito frequente na bacia amazônica. Costi (2013) comparou as medidas altimétricas obtidas por radar com aquelas disponíveis para as estações *in situ* entre os anos 2002 e 2008. Os dados remotos acompanharam o regime de variação de níveis registrados nas estações convencionais, o que indica o grande potencial de uso desses dados como fonte complementar em estudos hidrológicos. Também na amazônia, Paris *et al.* (2016) utilizaram radares altimétricos orbitais como suporte à modelagem de vazão. Nesse caso foram utilizados dados dos satélites Jason-2 e Envisat para elaboração de séries temporais para mais de 100 afluentes do rio Amazonas (Figura 2.17).

Com base nos trabalhos apresentados, nota-se o potencial da AS no monitoramento espaço-temporal das variações do nível de água, na caracterização de regimes hidrológicos em bacias hidrográficas (Calmant e Seyler, 2006; Calmant *et al.*, 2008). As grandes bacias e os grandes rios são os mais abordados, a exemplo da bacia dos

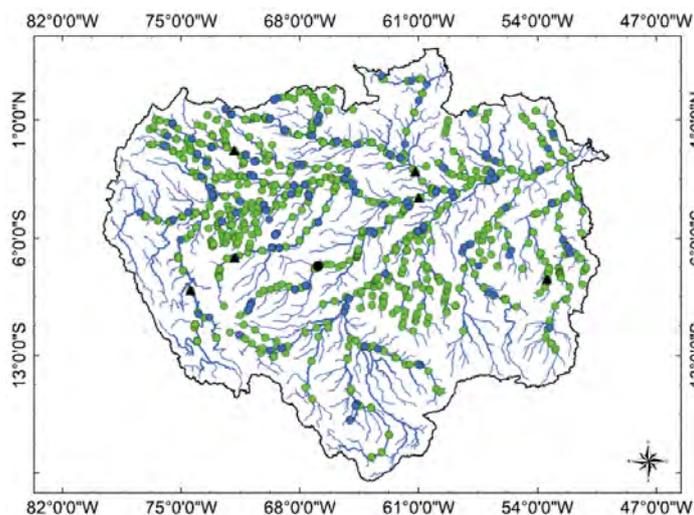


Figura 2.17: Localização de 920 estações virtuais na bacia amazônica criadas a partir do cruzamento dos *tracks* dos satélites Envisat e Jason-2 com os rios amazônicos. Fonte: Paris *et al.* (2016).

rios Amazonas e do Congo devido às características destes rios, que tem muitas vezes comportamento espectral semelhante ao dos oceanos. Contudo, trabalhos em rios de menor porte são mais raros, devido as dificuldades de se obter o nível de água destes com o uso da AS.

Em rios que possuem largura inferior a um quilômetro a contribuição das respostas vindas das regiões próximas as margens dos rios influencia diretamente nas medidas de nível. Os retornos de diferentes coberturas do solo, além da influência das variações topográficas da região e das margens dos rios, são mais frequentes devido as respostas *off-nadir* e do tamanho do *footprint* (Berry, 2006; Birkinshaw *et al.*, 2010; Maillard *et al.*, 2015).

Kuo e Kao (2011), a partir dos dados do satélite Jason-2, estimaram o nível de água do Rio Bajhang (Taiwan) com o uso de técnicas de detecção de água e processamento de dados altimétricos de satélite. O rio estudado tem largura que varia entre 100-200 metros (estação seca) e atinge cerca de um quilômetro (após eventos extremos de chuva), o que o enquadra como um rio de pequeno e/ou médio porte. Os resultados obtidos na aplicação da altimetria a partir das melhorias do *retracker* gerou resultados 0,31 metro mais precisos, nos melhores casos, em comparação com o *retracker* ICE-1. Apesar das interferências da cobertura do solo adjacente ao rio esta técnica se mostrou viável para este tipo de estudo.

Maillard *et al.* (2015) utilizaram dados das missões Envisat e Saral para obtenção do nível de água do Rio São Francisco, no qual foram mescladas técnicas de identificação de localização e forma do rio e dados de altimetria radar. A partir da relação entre as informações sobre o rio e a modelagem do fenômeno de *hooking*. Esse fenômeno está

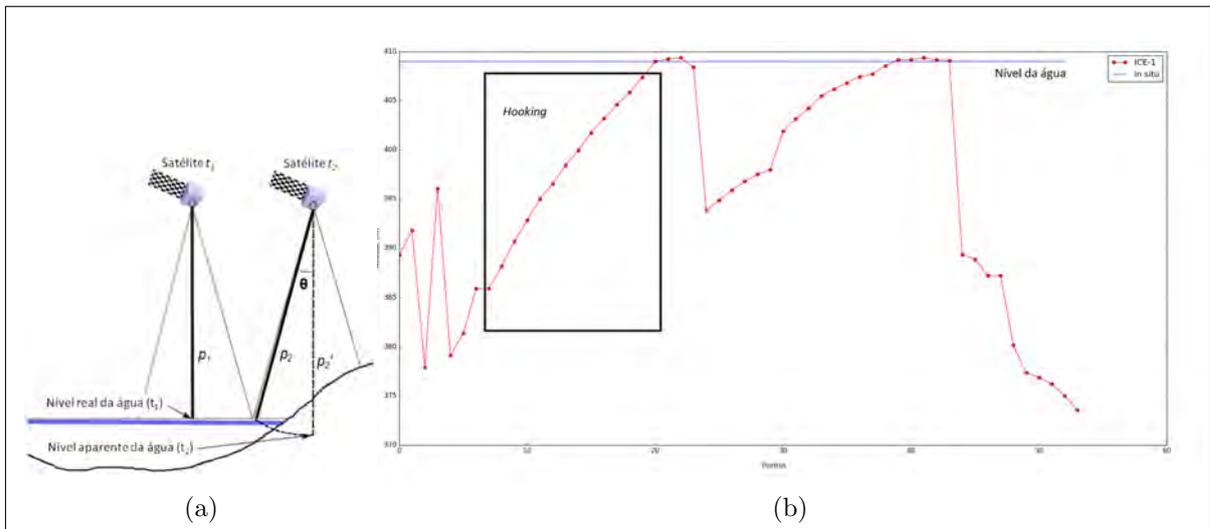


Figura 2.18: Efeito *Hooking*. (a) no tempo t_1 o sensor está sobre a água e a resposta vem do nadir, conseqüentemente o nível d'água é estimado de forma mais precisa. Já no tempo t_2 os retornos que atingem a antena radar são “*off-nadir*” e, assim, a água aparenta estar em um nível inferior ao real;(b) o gráfico representa um conjunto de pontos extraídos, onde é possível identificar o fenômeno de *hooking* (quadrado preto), que tem a forma de uma parábola. O nível real do rio, dado pela medida *in situ* (linha azul), tem altitude superior ao estimado pelo sensor altimétrico para vários dos pontos extraídos. Fonte: (a) Maillard e Calmant (2013).

relacionado as repostas que atingem o satélite, mas que não vem do nadir, o que gera repostas mais fracas que aquelas vindas da água e uma superestimação da altitude, já que o sinal percorre uma maior distância (Figura 2.18). Os resultados mostraram que a acurácia varia significativamente (entre 60 e 30 centímetros) dependendo de diversos fatores ambientais tais como a cobertura do solo e a variação topográfica.

Boergens *et al.* (2016) também abordaram o efeito de *hooking*, eles aplicaram a altimetria radar na bacia do Rio Mekong (localizado no platô do Tibet). Afim de melhorar as estimativas de nível de água foi desenvolvido um método com a utilização de medidas fora do nadir, esse método estima a parábola gerada pelo efeito de *hooking*. Em rios com largura inferior a 500 metros o número de pontos que sobrepõem a água é muito pequeno o que resulta na ausência de dados ou em erros muito altos, assim o uso de pontos que não estão sobre o rio, com a aplicação das devidas correções do efeito de *hooking* geram medidas mais precisas. Como resultado os autores obtiveram erros médios quadráticos inferiores a 1,5 metro, em 80% dos casos, para os níveis da série temporal.

Nos trabalhos em que a altimetria é utilizada como uma ferramenta na hidrologia continental, percebe-se que a aplicação dos *retrackers* existentes, que foram especialmente desenvolvidos para estimar o nível dos oceanos e do gelo, tem de conviver com

uma série problemas e erros (Pereira e Maillard, 2014). Nesse contexto, pesquisas tem sido realizadas com a proposta de desenvolver novos métodos de obter a altitude das superfícies e, desse modo, melhorar a acurácia, a precisão e a consistência dos dados. Para isso são utilizadas várias técnicas que perpassam pela identificação das coberturas do solo dentro do sinal radar, das características físicas da forma de onda, da detecção das respostas vindas da água, entre outras análises e observações.

Afim de viabilizar a aplicação da altimetria radar em rios de pequeno e médio porte, Enjolras e Rodriguez (2009) desenvolveram um novo algoritmo. Aos dados altimétricos foram acrescentadas informações auxiliares tais como modelo digital de elevação (SRTM) e cobertura do solo a partir de imagens. Desta forma, os autores obtiveram bons resultados na aplicação para dois rios europeus, o Rio Meuse (França, Bélgica e Países Baixos) e o Rio Lena (Rússia). Os resultados foram favoráveis, mas foi destacado que mais estudos são necessários para melhorar a acurácia das estimativas de nível.

Em estudo realizado para o reservatório de Maithon, localizado em Jharkhand, Índia, foi desenvolvido um algoritmo para estimar a altitude a partir do sensor AltiKa. Ghosh *et al.* (2015) propuseram um novo *retracking* que teve uma melhoria de 27% na acurácia quando comparado ao resultado obtido com o algoritmo mais frequentemente utilizado para essas situações (ICE-1). O *retracker* desenvolvido foi útil na identificação e substituição de *outliers*, além da extração de parâmetros dos dados altimétricos do Saral. Os autores destacam que uma maior quantidade de dados auxiliares tais como precipitação e umidade são necessários para melhoria do método de *retracker* desenvolvido.

Também com o propósito de melhorar a qualidade dos dados, uma estratégia diferente foi adotada por Tseng *et al.* (2014). Diferentemente de outros autores (Yang *et al.*, 2012; Khaki *et al.*, 2014), que buscaram desenvolver novos algoritmos, estes optaram por modificar o dado original de entrada. O dado obtido pelos sensores do Envisat e do Jason-2 foram analisados e modificados para regiões costeiras, com tratamento de picos, filtragem, entre outras estratégias. Após a modificação, os algoritmos tradicionais foram re-aplicados, dentre eles o 20% *Threshold* (Limiar) foi o que apresentou melhores resultados, com erro médio quadrático de 0,21 m e acurácia 63% melhor do que a obtida quando aplicado o mesmo *retracking* sobre os dados não modificados do satélite.

Capítulo 3

Área teste e dados

3.1 O Rio São Francisco

3.1.1 Localização

A bacia do Rio São Francisco é de suma importância para as regiões sudeste e nordeste. Sua área está inserida em sete unidades da federação com uma área total de 638.883Km^2 , o que equivale a oito por cento do território nacional (MMA, 2006). As principais intervenções humanas ao longo do curso de seu rio principal estão associados a irrigação, a navegação e a construção de reservatórios, estes últimos ligados as produções hidroelétrica, agropecuária e também ao abastecimento humano direto.

O Rio São Francisco tem 2.697 km de extensão, sua nascente está localizada na região da Serra da Canastra de onde flui para a porção norte de Minas Gerais, atravessa o estado baiano e marca a divisa geográfica entre os estados de Pernambuco e Sergipe. O Rio São Francisco possui 36 afluentes de maior ordem, dos quais 19 são perenes, onde se destacam os rios Pará, Paraopeba, Velhas, Verde Grande, Verde Pequeno, Abaeté, Paracatu e Grande (Pereira *et al.*, 2007). O perfil longitudinal da Figura 3.1 representa a posição dos principais afluentes do Rio São Francisco.

Dos rios perenes, o Verde Grande é o único inserido no Polígono das Secas em Minas Gerais, que representa cerca de 50% da área total da bacia sanfranciscana. Isso reforça a importância do São Francisco para a região nordeste. O rio das Velhas destaca-se por sua dimensão, ele é o maior afluente do RSF, com comprimento de 801 quilômetros, nasce em Ouro Preto-MG e deságua no São Francisco, no município de Várzea da Palma-MG (CBHRV, 2015). O mapa da Figura 3.2 mostra a localização da área de estudo com sua divisão fisiográfica.

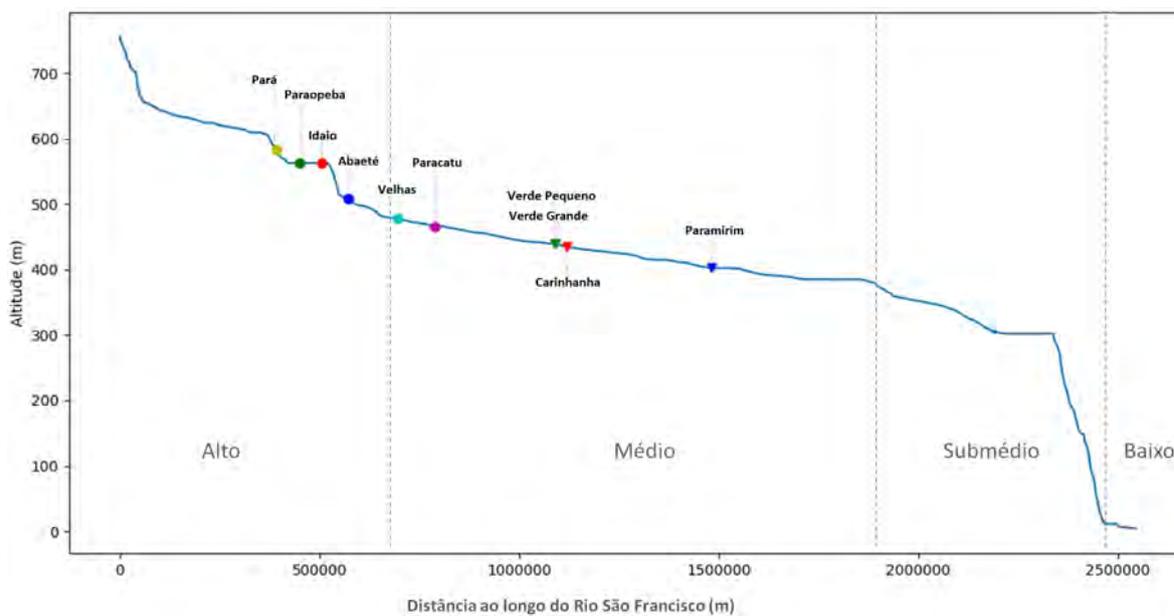


Figura 3.1: Perfil longitudinal do Rio São Francisco e a posição de seus principais afluentes.

3.1.2 Características físicas da área

A AS é influenciada por diversos fatores componentes do meio físico. Dentre estes os mais evidentes relacionam-se ao uso e cobertura do solo, a topografia e as características geomorfológicas, tanto da área quanto do próprio leito do rio (Maillard *et al.*, 2015). Além disso, as características fluviométricas, pluviométricas e climáticas ajudam a compreender as respostas registradas pelos altímetros radar. Desse modo, a caracterização da área de estudo foi feita com base nos itens mencionados para dar um maior enfoque a problemática do trabalho.

Geomorfologia e topografia

A região fisiográfica do Alto São Francisco apresenta as maiores variações topográficas, com a presença de serras, que abrangem cerca de 10% de todo o território, e as maiores declividades ao longo da Bacia do Rio São Francisco. Conforme o Rio segue na direção norte, o terreno fica mais suave e há grande presença de chapadas, que correspondem a cerca de 20% da Bacia e planícies sendo mais concentradas na transição entre o Médio e o Sub-Médio e, também, no Baixo São Francisco (CBHSF, 2015). Essas regiões, mais aplainadas e com menor declividade, tendem a apresentar melhores resultados quando submetidas à AS, uma vez que a superfície apresenta menor variação e a contribuição do relevo tem menor impacto no retorno registrado pelos sensores.

Em termos altimétricos a bacia apresenta altitudes que variam de zero metros, em sua foz, até cerca de 1.600 metros. Na porção do Alto São Francisco a altitude

Localização da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco

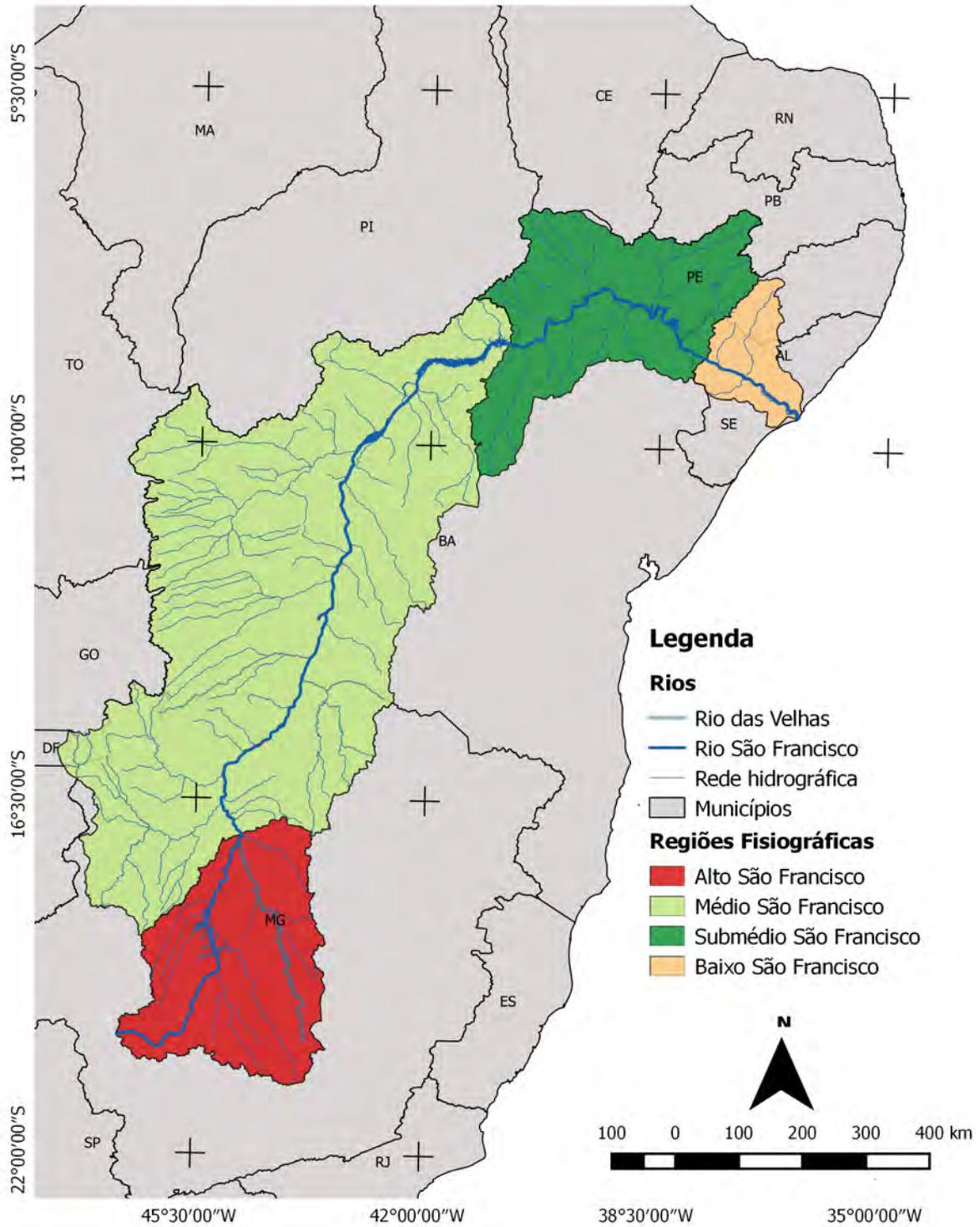


Figura 3.2: Localização da bacia do Rio São Francisco.

está entre 600 e 1.600 metros, aonde ocorrem as Serras da Canastra e do Espinhaço. O Médio São Francisco tem altitudes ligeiramente menores, com registros entre 500 e 1400 metros, uma das principais formações dessa unidade fisiográfica é a Chapada Diamantina. No Sub-médio o nível altimétrico é ainda mais baixo e não alcança os 1.000 metros, nessa porção está inserida a Chapada do Araripe e as Serras dos Cariris. As Serras Redonda e Negra estão inseridas no Baixo São Francisco, onde as altitudes mais elevadas são de cerca de 480 metros (MMA, 2006).

Uso e cobertura do solo

O uso e ocupação do solo na bacia do São Francisco é bastante diversificado. As tipologias apontadas neste trabalho tem como base a classificação estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Em todas as unidades fisiográficas há o predomínio de estabelecimentos agropecuários que são terrenos de área contínua formado de uma ou mais parcelas, subordinados a um único produtor, onde há exploração agropecuária (IBGE, 2015). Os estabelecimentos que tem entre 25 e 50 por cento de suas áreas ocupadas por atividades agropecuárias corresponde, respectivamente, a 28,8%, 25% e 34% para o Alto (AS), Médio (MS) e Submédio (SMS) São Francisco. As matas e/ou florestas recobrem apenas 5,4% (AS), 11,7% (MS) e 7,9% (SMS). No baixo São Francisco predominam as pastagens, com 52,9% do total de sua área. O uso urbano pode ser visto como pouco significativo uma vez que ocupa uma área inferior a um por cento de toda a bacia do São Francisco (CBHSF, 2015).

Cobertura do solo e topografia na região das estações

As características das estações virtuais (EV) criadas na região do Rio São Francisco foram contextualizadas quanto a sua cobertura do solo e altitude com bases nas imagens RapidEye¹, obtidas entre os anos de 2011 e 2014, Sentinel-2A, dos anos de 2016 e 2017² e modelo digital de terreno SRTM³ com resolução de 1-arc-sec (≈ 30 metros). Nas figuras 3.3 e 3.4 estão indicadas as posições das EVs criadas com o uso dos satélites Envisat/Saral e Sentinel-3A em relação ao perfil longitudinal do RSF e suas unidades fisiográficas. As principais características estão sintetizadas na Tabela 3.1.

Na Tabela 3.1 que tem registrado as principais coberturas do solo nas EVs, agricultura e pastagem são registradas na maior parte das estações. Outras coberturas como solo exposto, vegetação nativa e em regeneração ocorrem em menor grau. Somente

¹Imagens obtidas no Geocatálogo do Ministério do Meio Ambiente. Sítio: <http://geocatalogo.mma.gov.br/>

²Imagens obtidas no portal da ESA. Sítio: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2;jsessionid=EA57A2FC2338ACE1582BAB69C127C082.jvm1>

³Modelos Digitais de Elevação - SRTM obtidos da NASA através da aplicação EarthExplorer. Sítio: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

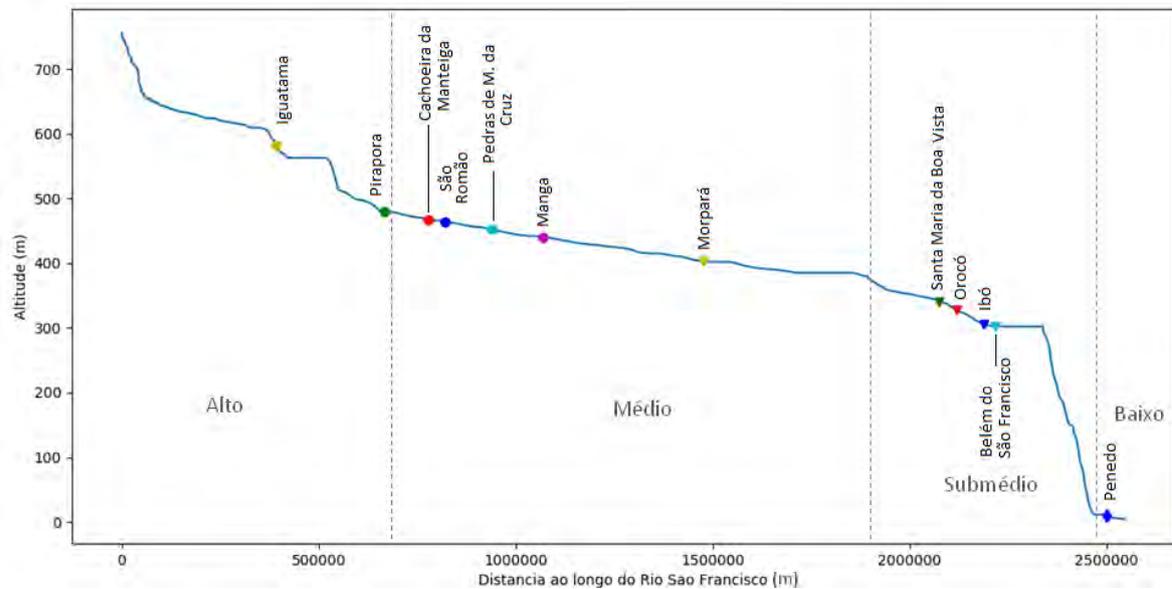


Figura 3.3: Posição das estações virtuais criadas a partir dos dados dos satélites Envisat e Saral ao longo do Rio São Francisco.

em São Romão e Morpará são registradas áreas urbanas próximas à EV. Em termos altimétricos a amplitude é baixa para a maioria das regiões, com exceção daquelas localizadas no alto curso do RSF, Iguatama e Pirapora.

Características climáticas, pluviométricas e fluviométricas

A complexidade climática na bacia do Rio São Francisco ocorre por fatores como a influência da cobertura vegetal, proximidade ao mar, continentalidade e sistemas atmosféricos associados (CBHSF, 2015). A classificação climática de Köppen está apresentada para as unidades fisiográficas conforme a Tabela 3.2. Devido a sua extensão latitudinal dois climas predominam na bacia, o Aw (clima tropical) e o BShw (clima semiárido brasileiro). O que destaca a importância da bacia e do Rio São Francisco para o país, já que consiste em uma bacia de regime climático misto. A porção que abrange o Alto e parte do Médio São Francisco está sob influência do clima tropical úmido, o que garante a perenidade do RSF ao longo de todo o seu curso. Na porção próxima a foz, por influência da umidade oceânica, predomina o clima As (clima de Savana segundo Köppen), onde há concentração de chuvas nos meses de junho, julho e agosto.

A precipitação média anual para as diferentes regiões fisiográficas está representada na Tabela 3.3. Na área de estudo os maiores índices de chuva são registrados nas regiões do Alto e grande parte do Médio São Francisco devido a influência do clima tropical úmido que confere umidade à atmosfera. Na porção norte do Médio e no Submédio São Francisco as chuvas são mais raras devido a predominância do clima semiárido. Já

Tabela 3.1: Características físicas próximas às Estações Virtuais criadas para extração dos dados dos satélites Envisat/Saral e Sentinel-3A ao longo do Rio São Francisco.

| Estações | Unidade Fisiográfica | Variação Altimétrica* | Altitude às margens do rio* | Coberturas do solo† |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|
| Iguatama* | Alto | 630 - 745 m | 665 m | RV;AG |
| Pirapora* ● | Alto | 478 - 751 m | 550 m | AG;PA;RG |
| Cachoeira da Manteiga* | Médio | 469-611 m | 510 m | AG;PA;RV |
| São Romão* ● | Médio | 465-591 m | 500 m | AG;PA;UR |
| Pedras de Maria da Cruz* ● | Médio | 650 - 470 m | 500 m | AG;PA |
| Manga* ● | Médio | 443 - 540 m | 470 m | AG;PA;RG; |
| Bom Jesus da Lapa● | Médio | 420 - 450 m | 430 m | AG;PA;SE; |
| Gameleira● | Médio | 419 - 447 m | 426 m | AG |
| Paratinga● | Médio | 416 - 496 m | 440 m | AG |
| Barra● | Médio | 443 - 540 m | 470 m | AG;RG;RV |
| Morpará* | Médio | 400 - 450 m | 420 m | AG;PA;UR;SE |
| Santa Maria da Boa Vista* | Sub-Médio | 329 - 460 m | 360 m | AG;RV;SE |
| Orocó* ● | Sub-Médio | 329 - 460 m | 339 m | AG;RV;SE |
| Ibó* | Sub-Médio | 305 - 353 m | 320 m | AG;RV;SE |
| Belém do São Francisco* | Sub-Médio | 300 - 420 m | 330 m | AG;RV;SE |
| Penedo* | Baixo | 0 - 115 m | 30 m | AG |

* Estações Virtuais criadas a partir dos satélites Envisat e Saral

● Estações Virtuais criadas a partir do satélite Sentinel-3A

* As altitudes foram extraídas das imagens SRTM com resolução de 1-arc- sec(≈ 30 m)

† Abreviações cobertura do solo: RV-Remanescentes de Vegetação, PA-Pastagem, AG-Agricultura, SE-Solo Exposto, RG-Regeneração, UR-Área Urbana

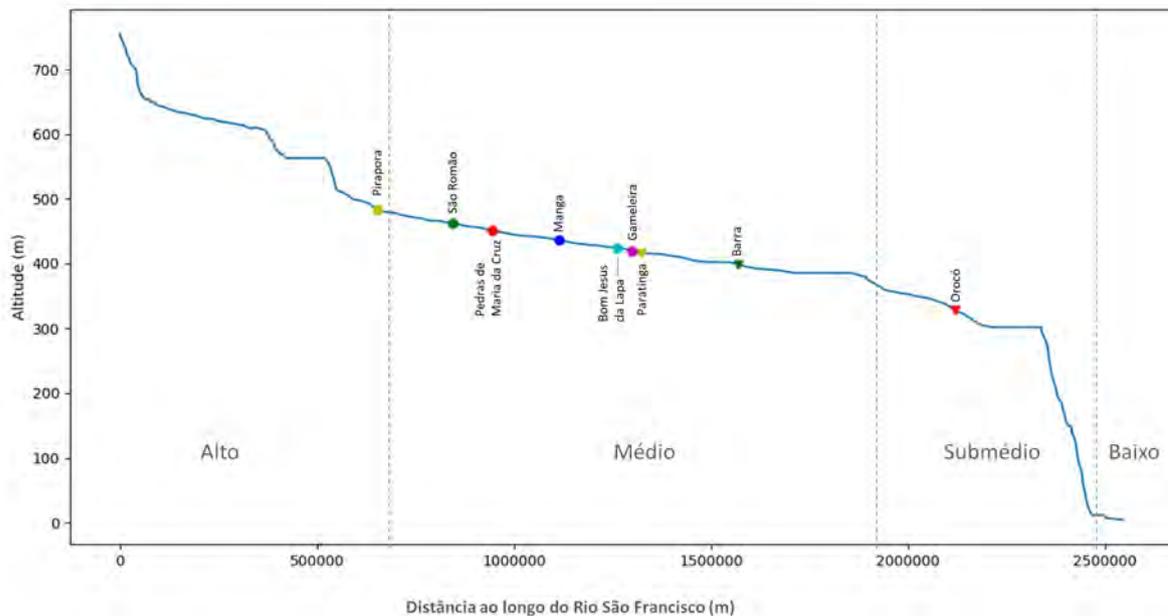


Figura 3.4: Posição das estações virtuais criadas a partir dos dados do Sentinel-3A ao longo do Rio São Francisco.

Tabela 3.2: Clima segundo a classificação de Köppen.

| Unidades Fisiográficas | Tipo e descrição |
|-------------------------------|--|
| Alto | Clima Aw, quente e úmido com chuvas de verão. Chuvas concentradas novembro e janeiro |
| Médio | Predomínio do clima Aw, mas com ocorrência do clima BShw |
| Submédio | clima BShw predomina o clima As, quente e úmido, com chuvas de inverno. Existem zonas a noroeste com características climáticas BShw, com um curto período chuvoso entre o outono e o inverno. |

a região do Baixo São Francisco volta a apresentar taxas significativas de precipitação devido à influência marítima.

Tabela 3.3: Precipitação média anual 1961-2014 em mm/ano. Adaptada de CBHSF (2015).

| Unidades fisiográficas | INMET | | | Hidroweb | | |
|-------------------------------|--------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| | Média | Min. | Máx. | Média | Min. | Máx. |
| Alto | 1295 | 987 | 1525 | 1327 | 806 | 1801 |
| Médio | 990 | 580 | 1375 | 993 | 511 | 2719 |
| Submédio | 583 | 463 | 616 | 571 | 307 | 1365 |
| Baixo | 759 | 520 | 1029 | 742 | 387 | 1257 |
| Total | 921 | 463 | 1525 | 1033 | 307 | 2719 |

A maior contribuição para a vazão média foi registrada no ponto de medição localizado em Juazeiro-BA (Médio São Francisco) devido, provavelmente, a extensão de seu trecho principal que é de 1.230 quilômetros. Em termos de vazão específica o maior valor foi medido em Pirapora-MG, no Alto São Francisco. Já n sua foz, a vazão máxima na atinge cerca de $5.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na estação de cheia e a pouco menos de $1.461 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na época de vazante do RSF. As medições aqui apresentadas foram consultadas em MMA (2006).

Tabela 3.4: Características de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

| Características | Alto | Médio | Submédio | Baixo |
|---------------------------------------|-------------|--------------|-----------------|--------------|
| Trecho principal (km) | 702 | 1.230 | 550 | 214 |
| Contribuição da vazão natural média | 42 % | 53 % | 4 % | 1 % |
| Ponto de medição | Pirapora | Juazeiro | Pão de Açúcar | Foz |
| Vazão média anual máxima $m^3.s^{-1}$ | 1.303 | 4.393 | 660 | 4.999 |
| Vazão média anual mínima $m^3.s^{-1}$ | 637 | 1.419 | 1.507 | 1.461 |
| Vazão específica $l/s/km^2$ | 11,89 | 3,59 | 1,36 | 1,01 |

3.2 Dados

3.2.1 Dados fluviométricos in situ

O nível dos rios e a vazão são medidos através de estações instaladas nos rios, lagos e reservatórios do Brasil, localizados em locais de maior controle hidráulico (Santos *et al.*, 2001). A Agência Nacional das Águas (ANA) é responsável pela gestão e disponibilização dos dados no portal hidroweb. No portal hidroweb os dados das séries históricas podem ser encontrados através dos códigos das estações fluviométricas. As medições de nível da água são feitas, normalmente, duas vezes ao dia (07:00 e 17:00 horas) por um observador e posteriormente são inseridas na base de dados da ANA, os valores medidos possuem referência local de nível (RLN) e as cotas são registradas em milímetros.

Para que os níveis de água possam ser comparados com os dados obtidos por altimetria radar o ideal é que as réguas limnimétricas tenham referenciamento global, associados a um elipsoide. A CPRM possui um projeto para a realização do nivelamento geométrico das réguas limnimétricas ao longo do Rio São Francisco, sendo que para algumas estações esse processo já foi executado e o nível d'água relativo pode ser convertido em absoluto. Já a estação de Pedras de Maria da Cruz foi nivelada em trabalho de campo realizado no decorrer deste trabalho, a Tabela 3.5 contém os dados das estações geometricamente niveladas. Contudo, a grande maioria das estações fluviométricas ao longo do São Francisco ainda não possuem o nivelamento geométrico.

3.2.2 Dados dos satélites altimétricos radar - Envisat, Saral e Sentinel-3A

Tipos de dados e aquisição

Os dados gerados por altimetria radar, através dos sensores a bordo dos satélites, são disponibilizados gratuitamente pelas agências espaciais responsáveis pelas missões. Os

Tabela 3.5: Referências de nível global (RNG) obtida com o nivelamento das réguas limnimétricas com a utilização de GPS geodésico.

| Código | Nome | Referência | Latitude | Longitude | Nível |
|----------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| | | de Nível Local | GMS | GMS | Geométrico |
| | | mm | | | m |
| 41350000 | Pirapora Barreiro | 5589 | -17 22' 09,30" | -44 56' 35,25" | 487,32 |
| 42210000 | Barreiro Cachoeira | 11165 | -17 22' 09,30" | -44 56' 35,25" | 472,20 |
| 43200000 | da Manteiga São Romão | 10615 | -16 22' 18,43" | -45 03' 59,07" | 467,96 |
| 44500000 | Manga | 10517 | -14 45' 33,48" | -43 55' 58,86" | 444,29 |
| 44290002 | Pedras de Maria da Cruz* | 11480 | -15 36' 01,64" | -44 23' 43,70" | 455,98 |

* O nivelamento geométrico da estação de Pedras de Maria da Cruz foi realizado durante este trabalho e não pela CPRM.

arquivos estão em diferentes níveis de processamento, o que influencia diretamente na qualidade do dado.

O *Fast Delivery Geophysical Data Record* (FDGDR) é gerado quase que em tempo real, classificado no nível 1B e não conta com correções feitas a partir dos instrumentos de calibração. O *Interim Geophysical Data Record* (IGDR) é gerado a partir do pós-processamento dos dados inconsistentes e é disponibilizado entre três e cinco dias após a passagem do satélite, esse nível de correção utiliza dados auxiliares e a órbita preliminar do DORIS⁴. O *Geophysical Data Record* (GDR) também é gerado no pós-processamento e leva entre três e quatro semanas para ser disponibilizado, a principal diferença em relação ao IGDR é a utilização dos dados consolidados adquiridos pelos instrumentos de calibração. O último tipo de dado é o SGDR, esses são essencialmente iguais aos GDR, mas com a inserção das formas de onda corrigidas para o nível 1B (Baker *et al.*, 2002; Bronner *et al.*, 2013).

O sítio da Agência Espacial Europeia (ESA)⁵ fornece os dados adquiridos pelo sensor Envisat. Essa missão foi lançada em 2002 e esteve operacional até o ano de 2012, quando a comunicação entre as estações de recebimento e o satélite foram perdidas. Em 2013 o satélite Saral foi lançado e ocupou a mesma órbita do Envisat. Os dados do Saral podem ser obtidos no portal AVISO, o período de operação dessa missão foi menor que o de seu predecessor e está compreendido entre março de 2013 e julho de 2016 quando o satélite mudou para a fase denominada como *Drifting Orbit*. Na fase de deslocamento da órbita o satélite passou a realizar medições ao longo da superfície terrestre sem que houvesse repetição das órbitas, o que interrompeu a possibilidade de

⁴DORIS é um instrumento auxiliar responsável por fornecer informações de posicionamento do satélite em relação à superfície terrestre (Baker *et al.*, 2002; Bronner *et al.*, 2013)

⁵acesso: <https://earth.esa.int/>

uso dos dados para estudos temporais.

A missão Sentinel-3A, lançada em 16 de fevereiro de 2016, tem seus dados disponibilizados para *download* no portal da Agência Espacial Europeia (ESA), através de uma interface que permite selecionar os dados a partir de sua localização geográfica⁶.

Formato dos dados, ferramentas de leitura e extração

Os arquivos disponibilizados possuem um formato que não apresenta muitas plataformas comerciais para leitura, processamento, extração e análise (Baker *et al.*, 2002). Por isso, optou-se pelo desenvolvimento de ferramentas próprias. A linguagem de programação Python⁷ foi escolhida devido a sua ampla utilização no meio científico. As ferramentas desenvolvidas viabilizaram o trabalho com o formato específico, além de facilitar o processamento do grande volume de dados.

Os arquivos de todos os satélites utilizados nesse trabalho são do formato *Unidata's Network Common Data Form* (netCDF). Esse tipo de arquivo é conhecido por ser auto-descritivo, compatível com diversos sistemas operacionais e linguagens de programação e, também, pela capacidade de armazenar dados de diferentes tipos. Os dados dos altímetros utilizados neste trabalho possuem um padrão de nome que facilita a seleção do arquivo a partir de seu traço e ciclo (órbita e data), um exemplo de nome desses arquivos está na Tabela 3.6, esse corresponde a um arquivo do satélite Saral.

Tabela 3.6: Arquivos netCDF - Saral.

| Nome padrão dos arquivos de dados altimétricos radar | |
|---|--|
| SRL_<OIG>P<NRS>_2P<v><SP><c>_<p>_<ynd_hms>_<ynd_hms>.a.nc | |
| Variável | Descrição |
| OIG | Categoria do dado (O: OGDR, I: IGDR, G:GDR) |
| NRS | Tipo de produto (N: nativo, R: reduzido, S: sensor) |
| V | Versão do produto |
| SP | Duração do produto (S: segmentar para OGDR, P: passar para (I)GDR) |
| c | Número do ciclo do primeiro registro |
| p | Numero do traço do satélite (1 a 1002) |
| ynd_hms | Data do primeiro registro |
| ynd_hms | Data do último registro |
| a | Nome da agência que gerou o dado (EUM,CNES, ESA, ISRO) |
| nc | Extensão netCDF |
| Exemplo | SRL_GPS_2PTP030_0835_20160122_084650_20160122_093708.CNES |

Internamente os arquivos possuem diversas informações, basicamente todos os sen-

⁶Sítio da internet para *download* de dados do Sentinel-3A: <https://scihub.copernicus.eu/>

⁷<https://www.python.org/>

sores trazem aquelas que estão na Tabela 3.7. Esses parâmetros variam principalmente em relação à frequência do altímetro, o Envisat, por exemplo, fornece os dados de altitude em frequência de 18 Hz, enquanto que o Saral opera em 40 Hz (para mais detalhes sobre as características de cada satélite consultar a Subseção 2.2.3).

Tabela 3.7: Parâmetros do satélite Envisat.

| Parâmetros | Descrição |
|---------------------|--|
| lat | Latitude do ponto (1 Hz) |
| lon | Longitude do ponto (1 Hz) |
| mod_wet_tropo_corr | Variação de umidade |
| mod_dry_tropo_corr | Variação de pressão |
| ion_corr_doris_ku | Correção ionosférica |
| alt_cog_ellip | Altitude elipsoidal do satélite |
| solid_earth_tide_ht | Correção maré terrestre |
| geocen_pole_tide_ht | Correção maré polar |
| dsr_time | Data em número de dias desde a entrada em operação |
| hz18_diff_1hz_lat | Latitude 18 Hz para interpolação de 1 Hz |
| hz18_diff_1hz_lon | Longitude 18 Hz para interpolação de 1 Hz |
| hz18_ku_ice1 | ICE1 <i>retracker</i> |
| hz18_ku_ice2 | ICE2 <i>retracker</i> |
| ku_band_ocean_range | Ocean <i>retracker</i> |
| hz18_ku_trk_cog | Valor do <i>tracker</i> |

Para extrair os dados o código utiliza as informações relativas ao ciclo, ao traço e ao par de coordenadas acrescidos da distância máxima para a extração em relação a coordenada informada. Os parâmetros necessários para a estimativa de altitude, incluídas as correções físicas e atmosféricas presentes na Tabela 3.7 são extraídos. Durante a extração, alguns parâmetros precisam ser interpolados devido a frequência de obtenção desses, que não correspondem a das variáveis de altitude (ex.: `model_wet_tropo_corr`, `model_dry_tropo_corr`, `iono_corr_gim`, `solid_earth_tide`, `pole_tide`). O cálculo da estimativa da altitude está detalhado na Seção 4.1.

3.2.3 Dados GNSS

A utilização do sistema de posicionamento global de dupla frequência (GPS-L1/L2) permite obter a posição planimétrica e altimétrica com acurácia milimétrica. Esse tipo de método utiliza uma série de suportes espaciais e terrestre, conhecido como *Global Navigation Satellite System* (GNSS) que é uma denominação genérica para os sistemas de navegação de cobertura global (Monico, 2007). O GNSS conta com infraestruturas espaciais, *Satellite Based Augmentation System*(SBAS), e terrestre *Ground Based*

Augmentation System (GBAS), que associadas aos sistemas de posicionamento e as constelações de satélite proporcionam maior acurácia e confiabilidade dos dados obtidos. Atualmente duas constelações de satélites são destinadas ao posicionamento, a *Navigation System Using Timing and Ranging* (NAVSTAR), estadunidense, e a *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya* (GLONAS), de origem russa. Os aparelhos utilizados para coleta possuem características específicas que podem variar de acordo com a marca e o modelo, mas a maior parte deles faz uso das duas constelações de satélites de posicionamento existente⁸.

O aparelho de coleta de dados GPS L1/L2 é composto por um receptor, uma antena e faz uso de um tripé para a instalação (Figura 3.5), esses elementos devem ser configurados de acordo com as especificações do fabricante. A sua correta utilização exige a adoção de uma série de procedimentos que estão diretamente associados à qualidade das medidas, tais como a configuração do modo de coleta, do tipo de alimentação, do ângulo de máscara, da indicação do tipo de antena e intervalo de gravação.



Figura 3.5: Aparelho de GPS da marca TopCon, modelo Hiper+ utilizado em campo. O aparelho está montado sobre um tripé, a esquerda, e também sobre o marco geodésico, a direita.

Os levantamentos em campo com os coletores GPS de dupla frequência necessitam de dois aparelhos e fazem uso do método relativo. Um dos aparelhos é instalado em uma posição conhecida e configurado como base. O segundo é deslocado para os locais em que se deseja conhecer a posição, este é configurado como móvel. Para que a acurácia seja alta é necessário que exista sobreposição temporal das medições feitas com os aparelhos base e móvel (Monico, 2007).

⁸Neste trabalho foi utilizado o aparelho TopCon, modelo Hiper+, cedido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA-SR06).

No Brasil, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), gerenciada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), realiza o monitoramento contínuo de posições através de aparelhos distribuídos em pontos estratégicos. A RBMC facilita o levantamento geodésico, uma vez que elimina a necessidade de instalação de bases de monitoramento por parte do operador dos receptores geodésicos.

Para realizar o levantamento de campo neste trabalho, foi adotado o método estático, em que os dois receptores registram simultaneamente as medidas de posição e altitude. Neste tipo de levantamento é necessário que os aparelhos recebam o sinal de pelo menos 4 satélites simultaneamente. Em cada um dos pontos em que o aparelho configurado como móvel é instalado é necessário realizar a captura do sinal por pelos menos 30 minutos nos casos em que a linha de base, que é a distância entre os dois aparelhos, seja de cerca 20 quilômetros.

Após a coleta dos dados, para que a acurácia seja alta, é necessário a adoção de um método de pós-processamento dos dados. O modo de Posicionamento de Ponto Preciso (PPP) é utilizado nos casos em que apenas um aparelho de GPS L1/L2 faz a coleta das medidas, sem a instalação de uma base. Neste caso são utilizados os dados da portadora e da carregadora, os dados de órbita precisa e de relógio, para melhorar a precisão do ponto medido. Contudo, o modo mais utilizado para o pós-processamento é o Posicionamento Diferencial, este foi adotado neste trabalho devido a natureza do levantamento realizado, que conta com a existência de dados de uma base fixa que é utilizada para incrementar a precisão dos dados.

Neste trabalho o pós-processamento foi feito através de um *software* específico que utiliza como entrada os dados dos dois aparelhos, as coordenadas e altitudes conhecidas da base de referência e as efemérides do dia satélite. As efemérides são informações transmitidas pelos satélites ou observadas por estações em terra que tem por objetivo informar a órbita precisa de todos os equipamentos da constelação GPS⁹. Os dados pós-processados são então utilizados como base de informação precisa utilizada para o nivelamento global das estações fluviométricas.

⁹Para mais informações sobre as efemérides acesse o site: <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsEphemerisInfo>

Capítulo 4

Obtenção do nível d'água ao longo do Rio São Francisco a partir dos satélites Envisat , Saral e Sentinel-3A

4.1 Abordagem Metodológica

A AS permitiu a criação, ao longo do RSF, de 12 EVs com os satélites Envisat e Saral e oito com o Sentinel-3A¹. Essas estações foram criadas nos pontos de cruzamento entre o *track* dos satélites e o rio. Devido à diferença entre as órbitas do Sentinel-3A e dos outros dois satélites, suas EVs foram criadas em pontos diferentes, à exceção da EV de Orocó (Figura 4.1).

O critério para criação das EVs foi condicionado à existência de uma estação *in situ* dentro de um raio de no máximo 25 quilômetros, que permitissem validar os dados. Este critério foi desconsiderado em algumas situações. No caso da EV de Iguatama, o RSF possui largura de ≈ 50 metros, o que a torna interessante para as análises devido a dificuldade de aplicação da AS. No caso do Sentinel-3A, o espaçamento entre seus *tracks* permitiu a criação de um menor número de estações. Porém, isso não foi um fator impeditivo para comparação entre os pontos, especialmente quando a declividade é baixa entre EI e EV.

Existe pelo menos uma EV em cada uma das unidades fisiográficas da bacia do RSF. Isso permitiu a inclusão de uma alta variabilidade de ambientes, com características físicas, hidrológicas e climáticas distintas (Figura 4.2). Essa distribuição das EVs

¹O número de estações passa a ser nove se considerarmos a estação virtual de Pedras de Maria da Cruz, que não apresentou resultados, mas foi testada e será discutida neste trabalho.

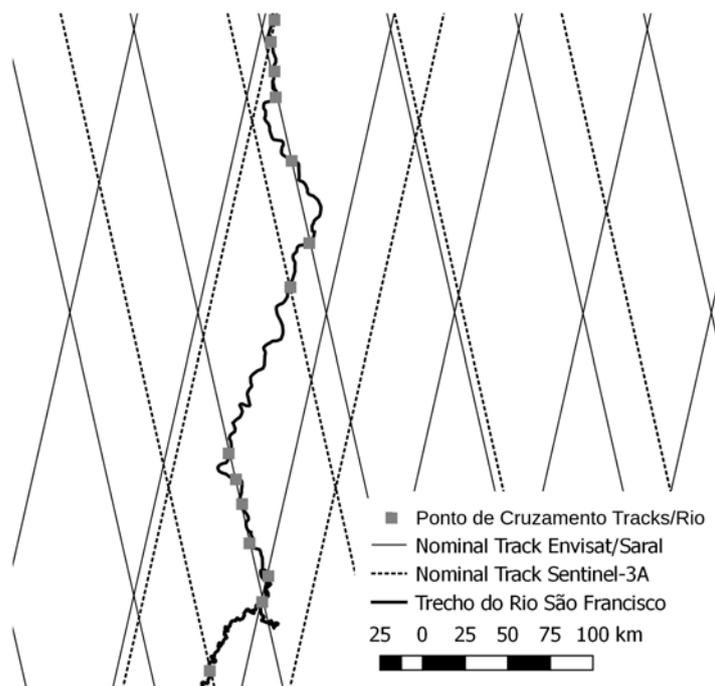


Figura 4.1: Espacialização dos *tracks* dos satélites sobre um trecho do Rio São Francisco. A linha contínua representa o *track* nominal dos satélites Envisat/Saral e a pontilhada do Sentinel-3A. Os quadrados em cinza correspondem aos pontos de cruzamento entre o *track* e o rio.

garante, ainda, a variabilidade de características do leito do rio, como largura, presença ou ausência de bancos de areia, ilhas fluviais, trechos com traçados variados (ex.: retilíneos ou curvilíneos), entre outras.

A obtenção do nível de água com a utilização de dados produzidos por AS envolve uma série de etapas, sintetizadas na Figura 4.3. O processo consiste na leitura dos dados armazenados em um banco de dados (Seção 3.2), dos quais são extraídos os parâmetros que permitem calcular o nível d'água através da aplicação de um algoritmo *retracker*. Os valores obtidos são comparados com aqueles gerados de forma convencional nas estações *in situ*, desta forma é feita a validação dos dados para verificar a viabilidade da AS em cada EV.

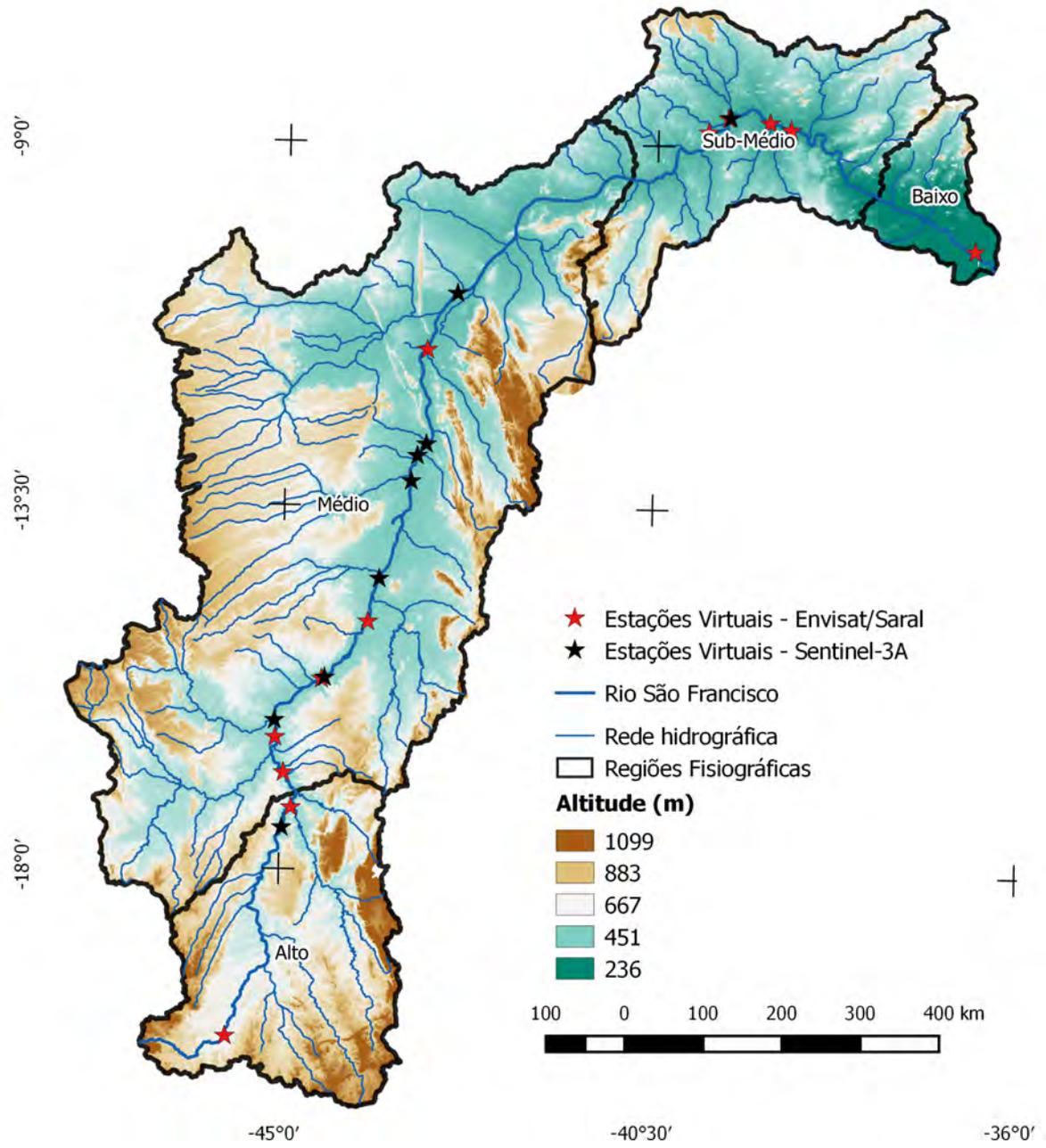


Figura 4.2: Estações Virtuais dos satélites Envisat/Saral (estrelas vermelhas) e Sentinel-3A (estrelas pretas) ao longo do Rio São Francisco.

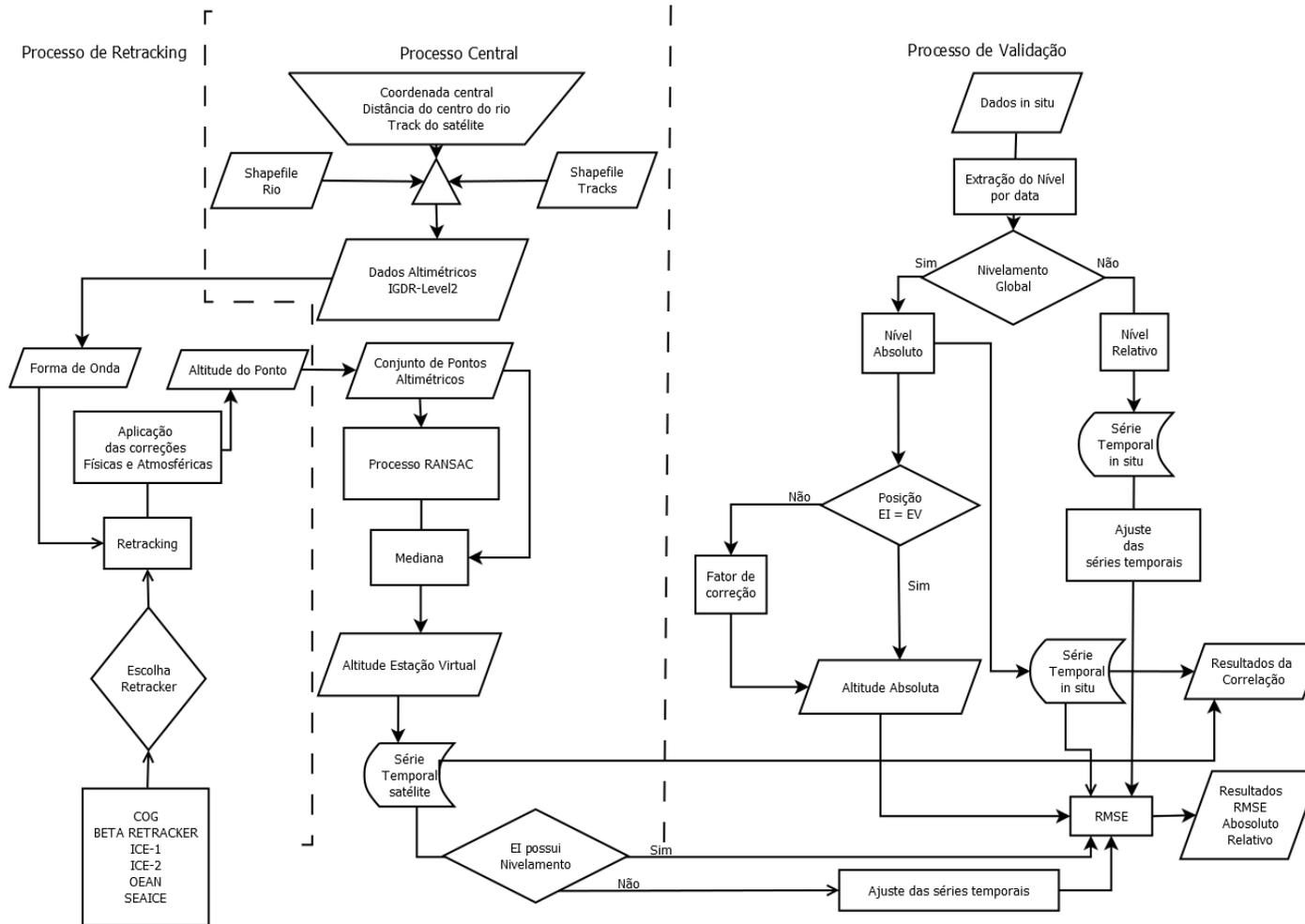


Figura 4.3: O processo está dividido em três módulos que envolvem a extração dos dados, a aplicação do *retracker* e a validação dos dados.

No **Processo Central** os dados são extraídos à partir da coordenada central do rio de interesse. A coordenada central e os *shapefiles* do rio e dos *tracks*, ambos associados a uma distância, são utilizados para a seleção dos dados. Neste trabalho a distância foi fixada em um quilômetro, pois em distâncias superiores o erro das medições aumenta (Maillard *et al.*, 2015). Todos os pontos localizados à distância indicada são extraídos para cada um dos ciclos. A rotina desenvolvida busca os dados em um banco de dados composto pelos arquivos dos satélites, que estão organizados por órbita e ciclo (data de passagem do satélite). Esses dados contêm os parâmetros de correção, a altitude do satélite, o elipsoide de referência e as formas de onda.

No módulo **Processo de Retracking** o *range* do satélite é extraído, com a opção da aplicação de uma série de algoritmos. A partir disso, são estimados e armazenados os valores de altitude de um conjunto de pontos. Para cada ciclo, o conjunto de pontos extraídos é recebido pelo **Processo Central**, aonde os erros grosseiros de medição são eliminados. Para cada ciclo deve haver apenas uma cota altimétrica. Para que isso seja possível é calculada a mediana do conjunto de dados, tanto para o ICE-1 quanto para o RANSAC, resultante da suavização dos erros das medições do ICE-1. Em seguida, as cotas altimétricas de cada data são armazenadas para construir uma série temporal para a EV. Em paralelo, são extraídos os dados *in situ* no módulo **Processo de Validação**.

4.1.1 Módulo Processo Central

O **Processo Central** (Figura 4.4) é o núcleo do processamento dos dados. Através de códigos de programação, em linguagem Python 2.7, foram criados códigos que permitem o processamento semi-automático dos dados. A rotina desenvolvida para a extração dos dados respeita critérios específicos e necessita de três informações para iniciar o processo: coordenada do centro do rio, número do *track* que cruza o rio e a distância em que os dados serão extraídos ao longo do *track* a partir da coordenada central. A coordenada pode ser consultada através de sistemas de informação geográfica ou até mesmo com o Google Earth, já o número do *track* deve ser consultado na camada vetorial disponibilizada pelas agências espaciais responsáveis pelos satélites².

Na Figura 4.5 é apresentado um exemplo da extração realizada nesta etapa. Na região de Manga há um cruzamento entre o *track* 835 e o RSF, no par de coordenadas [S 14,9272;W 43,9620]. Ao inserir estas informações, a rotina desenvolvida busca e seleciona todos os pontos dentro da distância estabelecida. Todos os pontos selecionados são enviados ao **Processo de Retracking**, no qual são calculadas as altitudes. Ao

²Endereço para *download* dos *tracks* em formato kml para Saral e Envisat: [https : //www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/VisuENTracksGEoldOrbit.kmz](https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/VisuENTracksGEoldOrbit.kmz)

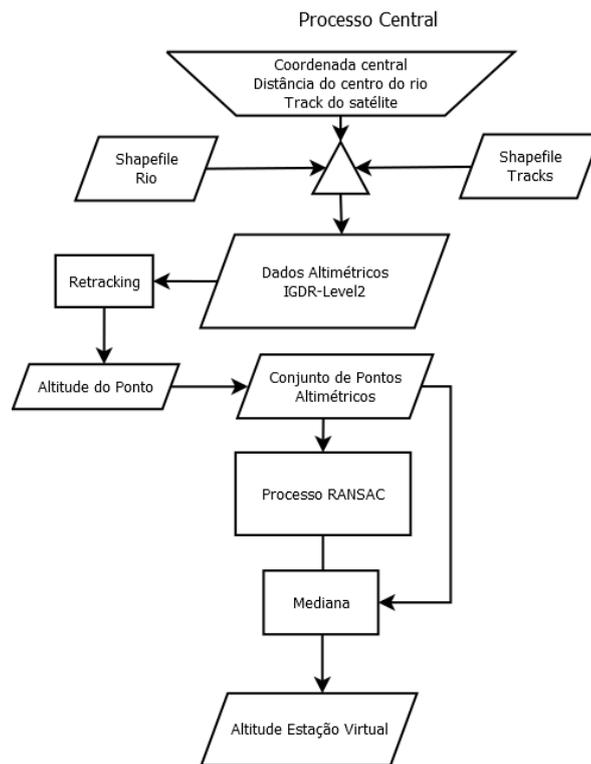


Figura 4.4: Processo Central - Extração do conjunto de pontos. Essa etapa se inicia com a inserção da coordenada central do curso d'água, a partir dela são extraídos os dados dos satélites. Do conjunto de medidas de altitude, gerados no Processo de Retracking, é extraída a mediana. Este valor é salvo e corresponde a cota altimétrica na estação virtual.

fim do processo todos os pontos retornam ao **Processo Central** (Figura 4.5 b).

Para cada data de passagem do satélite na EV deve haver apenas uma medida de altitude, que foi calculada com a extração da mediana do conjunto de altitudes disponível para cada coordenada central (Tabela 4.1). Frappart *et al.* (2005) e Frappart *et al.* (2006) utilizaram a mesma metodologia para obtenção das medidas de altitude em seus trabalhos.

Tabela 4.1: Fragmento do conjunto de dados extraídos para a estação virtual de Manga. Os dados são mostrados para os ciclos 10 e 11 e correspondem a uma data de passagem do satélite Envisat no ano de 2002.

| Satelite | Track | Cycle | Lat | Lon | Year | Datj | Icel |
|----------|-------|-------|----------|----------|------|------|----------|
| Envisat | 835 | 10 | -14,9388 | -43,9608 | 2002 | 303 | 426,1366 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9355 | -43,9616 | 2002 | 303 | 427,0397 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9322 | -43,9624 | 2002 | 303 | 426,8368 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9289 | -43,9631 | 2002 | 303 | 426,1609 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9256 | -43,9639 | 2002 | 303 | 426,1450 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9223 | -43,9646 | 2002 | 303 | 426,0770 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9190 | -43,9654 | 2002 | 303 | 425,8668 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9157 | -43,9662 | 2002 | 303 | 425,5787 |
| Envisat | 835 | 10 | -14,9091 | -43,9677 | 2002 | 303 | 426,0784 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9406 | -43,9594 | 2002 | 338 | 426,3127 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9373 | -43,9601 | 2002 | 338 | 426,4298 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9340 | -43,9609 | 2002 | 338 | 427,7830 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9307 | -43,9616 | 2002 | 338 | 427,1130 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9274 | -43,9624 | 2002 | 338 | 426,4708 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9241 | -43,9632 | 2002 | 338 | 426,5607 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9208 | -43,9639 | 2002 | 338 | 426,5545 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9175 | -43,9647 | 2002 | 338 | 426,1344 |
| Envisat | 835 | 11 | -14,9142 | -43,9654 | 2002 | 338 | 425,6662 |

Nesta etapa existem duas possibilidades de saída dos dados, uma consiste na extração da mediana do conjunto de dados obtidos com o uso do ICE-1 e a outra em aplicar o algoritmo *Random Sample Consensus* (RANSAC) sobre os dados de AS gerados pelo ICE-1. O RANSAC tem por objetivo eliminar erros grosseiros do conjunto de pontos antes da extração da mediana.

Aplicação do *Random Sample Consensus* (RANSAC) aos dados altimétricos

A filosofia do RANSAC é oposta a de outras técnicas de suavização de erros. Ao invés de utilizar o máximo de dados possíveis com a posterior eliminação de dados grosseiros ou inválidos, ele utiliza uma amostra pequena e agrega ao conjunto os dados mais consistente, quando possível (Bolles e Fischler, 1981).

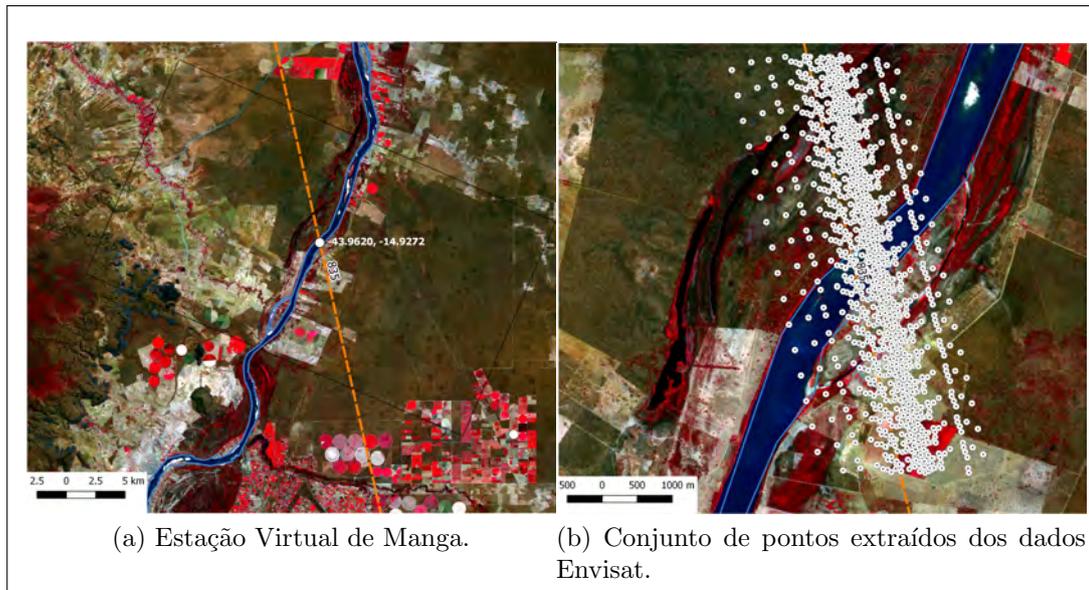


Figura 4.5: (a) Estação Virtual (EV) de Manga. A linha tracejada em laranja representa o *track* do satélite, a linha azul é o contorno aproximado das margens do São Francisco, o círculo branco é a estação virtual. (b) Conjunto de pontos extraídos para os ciclos disponíveis do satélite Envisat na estação de Manga a distância de um quilômetro a partir da coordenada central do rio.

Técnicas clássicas de estimativa de parâmetros, como mínimos quadrados, melhoraram os modelos para todo o conjunto de dados. Estas técnicas não possuem mecanismo para detectar e rejeitar erros grosseiros. Elas são técnicas que calculam a média a partir do pressuposto que o desvio máximo esperado de cada dado do modelo é uma função direta do tamanho do conjunto de dados. O RANSAC funciona de forma diferente, ao identificar os erros grosseiros de forma iterativa e eliminar aqueles que não devem fazer parte do conjunto de dados, ao invés de mantê-los e realizar o ajuste do modelo através da média de todos os erros (Fischler e Bolles, 1981).

Dentre as vantagens do RANSAC destacam-se a sua simplicidade e extensibilidade, o que facilita a sua implementação; a sua forma generalista, o que permite o seu uso de diferentes aplicações; e sua capacidade de trabalhar com populações de dados que contêm taxas de *outliers* superiores a 50% (Roth e Levine, 1993; Schnabel *et al.*, 2007).

Originalmente o algoritmo RANSAC teve como objetivo analisar imagens com base nos problemas de classificação e de estimativa de parâmetros. Como na prática estes dois problemas não são independentes, a solução para um problema é sempre requerida para solucionar o outro (Fischler e Bolles, 1981; Bolles e Fischler, 1981). O conceito do RANSAC foi aqui utilizado não para trabalhar com imagens, mas sim para gerar modelos a partir dos pontos extraídos em cada passagem dos satélites nas EVs. A função RANSAC utilizada no **Processo Central** é uma adaptação de Fischler e Bolles

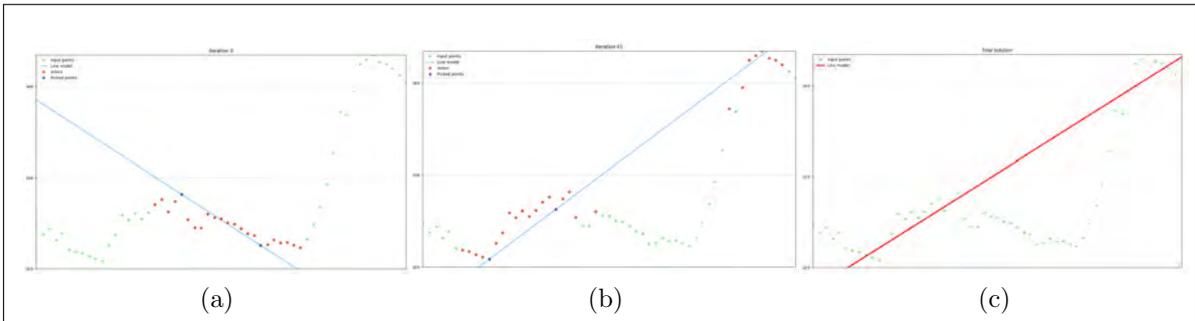


Figura 4.6: Os gráficos representam três momentos de iteração dos dados do RAN-SAC. (a) primeira iteração; (b) aproximadamente na metade do número de iterações previstas; (c) ultima iteração realizada com a obtenção do modelo final.

(1981) e funciona como um filtro para os erros mais grosseiros.

O algoritmo é iniciado a partir da inserção dos seguintes parâmetros: 1 - número de *inliers*, porcentagem de pontos em relação a amostra que serão inseridos no modelo final; 2 - quantidade de iterações e ; 3 - limiar (*threshold*). Definidos os parâmetros, o conjunto de pontos de cada um dos ciclos disponíveis é lido pelo algoritmo, de onde são sorteados dois pontos aleatórios, a partir dos quais é criado um modelo linear teórico do RANSAC, descrito por uma função do tipo $f(x) = ax + b$. Com base nos parâmetros definidos, o algoritmo insere o restante do conjunto de pontos no modelo. A cada iteração um novo modelo é gerado com o sorteio de dois novos pontos. O processo é encerrado quando o maior número de medidas, dentro do limiar estabelecido, é selecionado e passa a compor o conjunto final de dados (*Consensus Set*). A Figura 4.6 mostra, de forma gráfica, o modelo linear e os pontos inseridos no modelo em três momentos diferentes das iterações.

O algoritmo busca manter o maior número de pontos dentro da amostra. Aqueles identificados como pertencentes ao modelo (*inliers*) são salvos em uma lista, que é utilizada para o cálculo da mediana. O fluxograma da Figura 4.7 esquematiza o processo RANSAC. Além disso, o código em Python 2.7 (Apêndice F), também está exposto com a explicação de cada uma das etapas do algoritmo utilizado. Este código é uma adaptação feita de um código disponibilizado na internet ³.

O RANSAC foi aplicado ao conjunto de pontos extraídos com o uso do ICE-1 para excluir os erros grosseiros. Isso foi feito para cada ciclo (data), em cada estação virtual e para cada um dos satélites.

Neste trabalho os parâmetros foram testados, e a melhor combinação foi dada por:: 1 - número de iterações igual a 100; 2 - limiar de 0,01; 3 - taxa de *inliers* de 0,6. O

³<https://salzis.wordpress.com/2014/06/10/robust-linear-model-estimation-using-RANSAC-python-implementation/>. Acessado em 10-11-2016

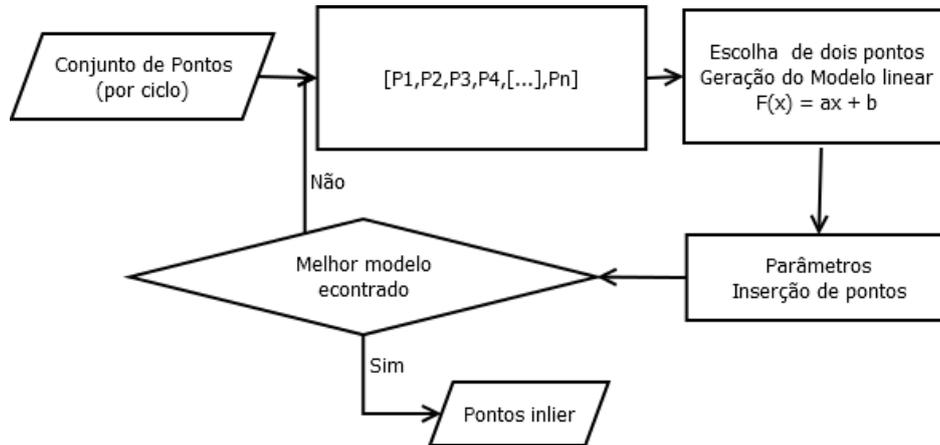


Figura 4.7: Fluxograma do *Random Sample Consensus* (RANSAC). A partir de um conjunto de pontos inseridos é gerado um modelo linear. Com os parâmetros definidos são inseridos os outros pontos, quando o melhor modelo é encontrado o processo se encerra e os pontos são salvos (*inliers*).

número de iterações se relaciona ao número de combinações feitas para o conjunto de dados. O limiar indica a permissividade do modelo para incorporar os pontos, quanto maior este valor mais distantes do modelo os pontos podem estar. Já o número de *inliers* se relaciona com a porcentagem mínima de pontos do conjunto de dados que devem compor o modelo.

4.1.2 Processo de Retracking dos Dados Altimétricos Radar

Os algoritmos de *retracker* foram especialmente desenvolvidos para aplicações em oceanos e em regiões recobertas por gelo, sendo “ICE-1”, “ICE-2”, “OCEAN” e “SEAICE” os mais comumente utilizados (Calmant *et al.*, 2008). Contudo, para estudos realizados em áreas continentais não há um algoritmo padrão que possa ser aplicado. Devido à sua robustez, o “ICE-1” é o mais utilizado para estimar as altitudes (da Silva *et al.*, 2010; Fatras *et al.*, 2015; Blarel *et al.*, 2016). O cálculo da altitude é baseado na variação da distância entre cada *bin* das formas de onda geradas pelas respostas captadas pelos sensores radar (Equação 4.1, Figura 4.8). O *bin* corresponde a discretização do tempo e pode ser convertido em distância⁴.

$$sr = c/(2 * frq) \tag{4.1}$$

Onde c equivale a velocidade aproximada da luz ($\approx 299.792.458$ m/s) e frq é a frequência satélite.

Calculada a variação de distância para cada *bin* (sr), é preciso identificar qual deles

⁴Distância entre a superfície e o satélite calculada no intervalo temporal associado a velocidade da luz.

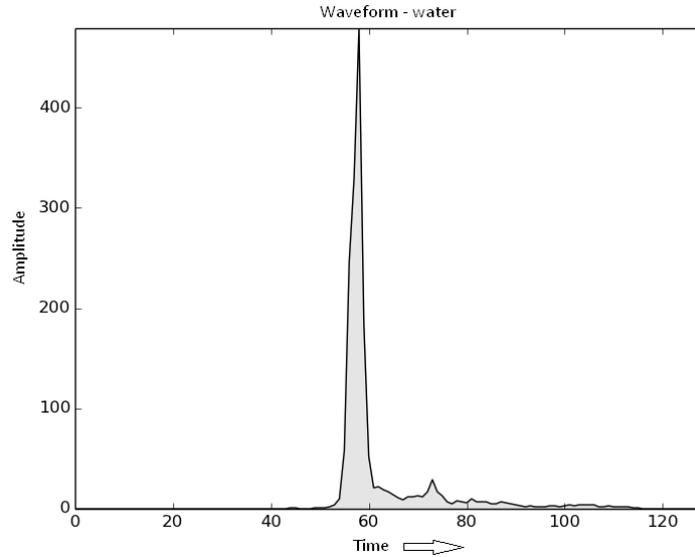


Figura 4.8: Formas de onda (FOs) produzidas a partir da altimetria radar por satélite. O eixo x corresponde aos *bins* da FO (discretização do tempo), já o eixo y corresponde a intensidade do retorno das repostas ou amplitude.

será utilizado para o cálculo da distância entre o satélite e a superfície. É ainda necessário definir o *bin* nominal, utilizado para estimar a janela de abertura de gravação, e o valor do *tracker* do satélite, armazenado no próprio arquivo de dados. A Equação 4.2 é utilizada para o cálculo do alcance (ou *range*).

$$h_{bin} = trk + (cn - b) * sr \quad (4.2)$$

Onde h_{bin} é a altitude da superfície que será calculada a partir de um *bin*, trk é o *tracker* do satélite, cn é a posição do *bin* (no eixo x da forma de onda) do qual a altitude será calculada, b é o *bin* nominal e sr é o produto da velocidade da luz pela frequência do pulso enviado em direção a superfície.

A partir da aplicação dos *retracker*, é feita a estimativa da altitude no módulo nomeado como **Processo de Retracking** (Figura 4.9). São extraídas as FOs dos dados dos satélites, nas quais podem ser aplicados os *retracker* (lado esquerdo da Figura 4.9 [COG, Beta Retracking, ICE1, ICE2, SeaICE]).

O processo segue com a aplicação das correções topográficas e atmosféricas, com base nos parâmetros contidos nos arquivos dos satélites, e é finalizado com a estimativa da altitude de cada um dos pontos extraídos (Equação 4.3), os quais são armazenados no **Processo Central**.

$$h_a = h_s - (\rho + ion + dry + wet + pt + set) + GC(op.) \quad (4.3)$$

h_a é a altitude ortométrica, h_s é a cota altimétrica do satélite em relação ao elipsoide, ρ

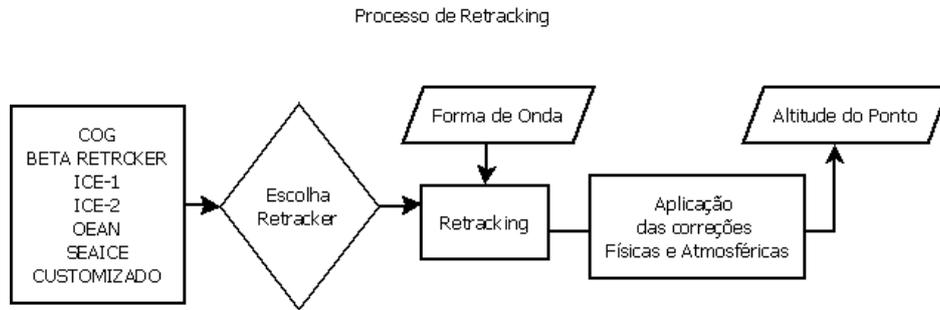


Figura 4.9: Processo de Retracking.

é o *range* do satélite dado pela aplicação do *retracker*, *ion* são as correções ionosféricas, *dry* a de pressão, *wet* a de umidade, *pt* da maré polar, *set* da maré terrestre e *GC* é a correção da ondulação geoidal, está ultima pode ou não ser aplicada.

4.1.3 Processo de Validação dos Dados

O módulo de validação dos dados tem dois objetivos: 1) realizar os testes de precisão do dado altimétrico frente aos dados *in situ*; e 2) avaliar a capacidade dos sensores de realizarem medidas de modo sistemático em cada uma das Estações Virtuais (EVs) propostas (Figura 4.10). Os dados de entrada deste processo são a cota altimétrica medida pelos sensores nas EVs e as medidas *in situ* (EI) feitas através das estação fluviométricas, organizados em séries temporais (Figura 4.11).

Em paralelo são extraídos os dados de nível registrados nas Estações *in situ* (EIs) próximas às EVs, os quais são considerados como as medidas reais das cotas do rio. A maioria das estações fluviométricas ao longo dos rios brasileiros, inclusive no RSF, não possui referência de nível global (RNG), que é a referência em relação ao elipsoide, o que dificulta o processo de comparação direta entre os dados *in situ* e os dos satélites altimétricos. A extração das cotas *in situ* apresenta valores arbitrários em relação às régua instaladas nos rio, para os quais também são produzidas séries temporais (Figura 4.12 a).

Nos casos em que a referência de nível é local (RNL), o procedimento de subtração da mediana das medidas de nível das séries *in situ* e virtual foi adotado para permitir a comparação com os dados altimétricos. A mediana foi escolhida por caracterizar o centro da distribuição de um conjunto de dados para reduzir a influência de medidas extremas (*outliers*), assim como foi feito por outros autores (Frappart *et al.*, 2006; Maillard *et al.*, 2015; Biancamaria *et al.*, 2017). A Equação 4.4 foi utilizada para o cálculo do Erro Médio Quadrático Relativo (EMQR) e o Absoluto (EMQA) nas EVs.

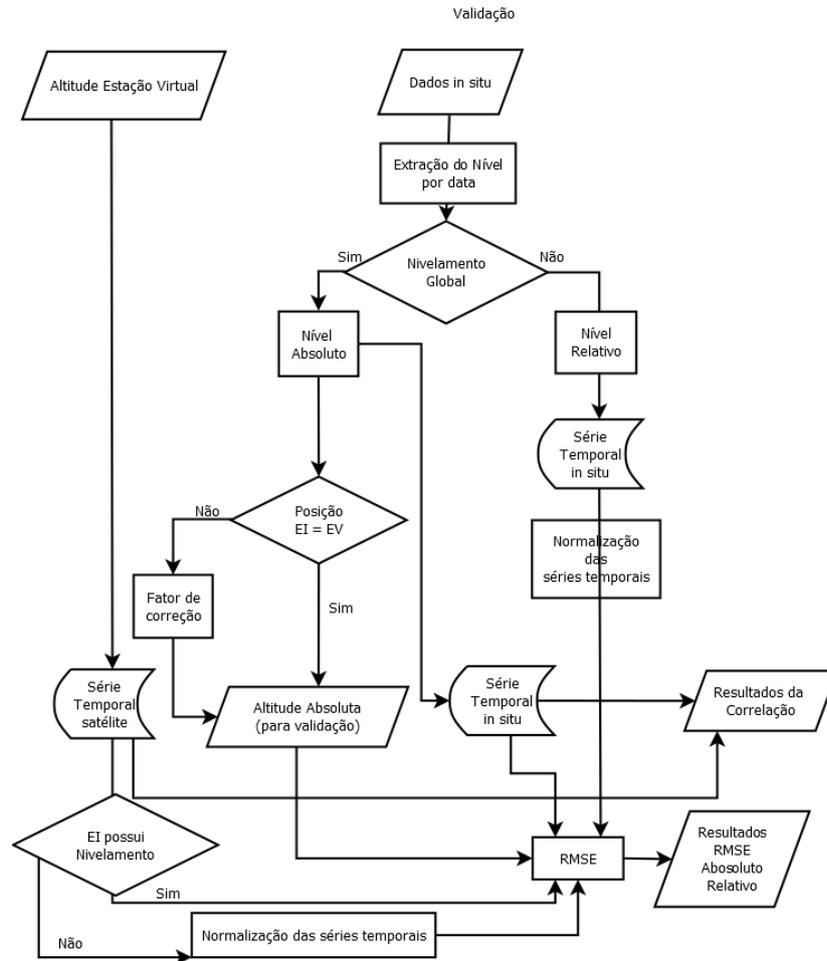


Figura 4.10: Processo de Validação dos dados Altimétricos.

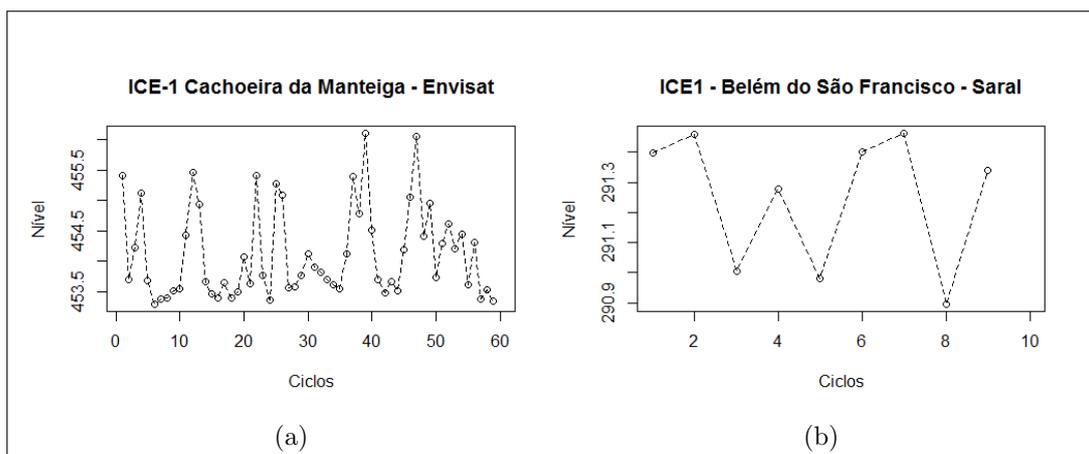


Figura 4.11: Série temporal gerada a partir dos dados de altimetria por satélite radar. Nos gráficos estão plotados os dados obtidos com o ICE-1, em Cachoeira da Manteiga, para o satélite Envisat (a) e em Belém do São Francisco com o Saral (b).

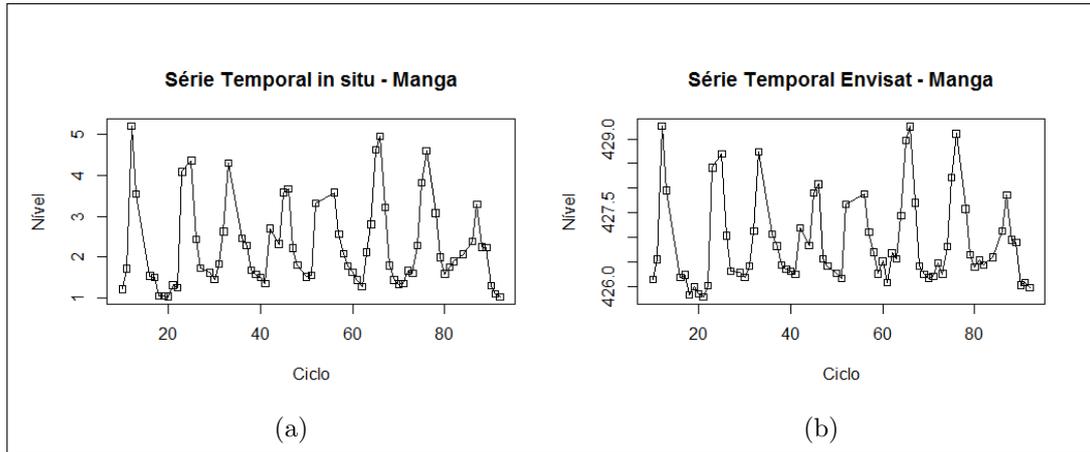


Figura 4.12: Séries temporais para as estações fluviométricas *in situ* (a) e virtual (b) de Manga. No eixo y está o nível do rio, sendo que os dados *in situ* são do tipo relativo e o do satélite são absolutos.

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.4)$$

onde y é o valor observado na estação *in situ*, \hat{y} é o valor medido com o uso dos satélites altimétricos e N é a quantidade total de observações feitas. O valor de y deve ser ajustado, para as séries *in situ* e por AS, nos casos em que a EI não é nivelada.

Nos casos em que há RNG, além da comparação feita através do EMQR, existe a possibilidade dos dados *in situ* serem comparados diretamente com os dados produzidos por AS, uma vez que ambos possuem nível referenciado a um elipsoide. Contudo, este processo exige uma série de correções dos dados *in situ* obtidos no Portal Hidroweb. Para isso é necessário converter o valor de nível da estação fluviométrica *in situ* em termos absolutos, o que é feito a partir da aplicação das equações 4.5 e 4.6, que tem como resultado a cota altimétrica da água (Figura 4.13).

$$h = h_0 + CR \quad (4.5)$$

Onde h é o nível geométrico, h_0 é a cota correspondente ao zero da régua e CR é a cota relativa obtida na leitura da régua limnimétrica. O valor de h_0 é obtido com o uso da Equação 4.6 e RL é obtido no sítio hidroweb (ANA) através dos dados de cota e vazão da série histórica.

O nível elipsoidal do rio (h_0), ou zero da régua, é obtida a partir da Equação 4.6. O valor da leitura feita nas régua limnimétricas é somado ao valor calculado na Equação 4.6. Se a EV e a EI estiverem na mesma posição no rio, a conversão entre cota relativa e absoluta é feita de maneira direta. Caso contrário, é necessária a aplicação de um fator

Referência de Nível Local

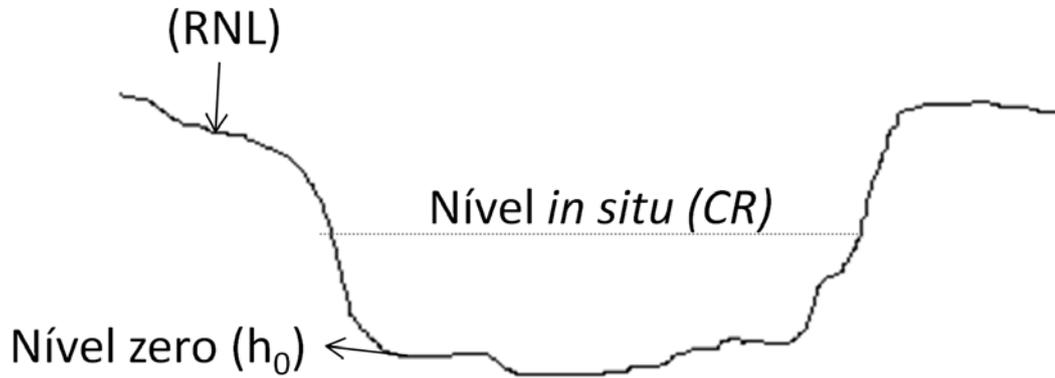


Figura 4.13: A cota relativa (CR) é dada pela ANA através de seu portal, a RNL está em um ponto estratégico na margem do rio e serve de referência para a instalação das régua limnimétrica. O h_0 é o ponto mais baixo em relação a RNL. Para a realização do nivelamento geométrico um aparelho de GPS de alta precisão é instalado sobre a RNL, a partir disso o h_0 elipsoidal pode ser calculado.

de correção correspondente à variação de altitude entre a EI e a EV. Essa constante pode ser obtida através da realização de campanhas de campo em que são utilizados receptores GPS de alta precisão. Após as correções a Equação 4.4 é aplicada para a realização do cálculo do Erro Médio Quadrático Absoluto (EMQA).

$$h_0 = (CG) - RNL \quad (4.6)$$

Onde h_0 é o nível geométrico correspondente ao zero da régua, CG é a cota geométrica da referência de nível global e RNL é a referência de nível local da estação fluviométrica, dados estes fornecidos pela CPRM conforme Tabela 3.5.

Os *outliers* são excluídos durante o mesmo processo. Optou-se por um valor mais conservador, com a exclusão das medidas individuais que tivessem diferença igual ou maior que três metros. A manutenção das medidas com erros desta magnitude permite analisar como o satélite se comporta ao longo do tempo de maneira mais fidedigna. Porém, é importante destacar que foi adotado aqui um método para avaliar os dados, em caso de aplicação sem processos de validação, é necessário adotar outras estratégias para excluir medidas extremas.

Correlação

A correlação indica que duas coleções de dados variam juntas. Valores positivos indicam que os dados variam na mesma direção e valores negativos indicam que elas variam em direções opostas (McKillup, 2011). Existem vários coeficientes de correlação, como por exemplo os de “Spearman” e o de “Pearson”.

O coeficiente de correlação de Pearson (ρ) de uma população é uma estatística que indica o quanto duas variáveis são linearmente relacionadas, e pode assumir valores entre -1 e $+1$. O ρ somente será igual a 1 se as duas variáveis crescem juntas e estão ambas sobre uma linha reta. Da mesma forma ρ igual a -1 corresponde a uma correlação negativa perfeita, porém enquanto uma variável aumenta a outra diminui. Já ρ igual a zero indica que não há correlação entre os dados, mas isso não exclui, necessariamente, que os dados não estejam relacionados.

O coeficiente de correlação de Pearson obtido na comparação de dois conjuntos de dados pode ser calculado com o uso da equação 4.7, presente no livro Press *et al.* (1992).

$$\rho = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (4.7)$$

Neste trabalho optou-se pelo uso do coeficiente de “Pearson” devido a sua capacidade de medir a relação entre duas variáveis e a interpretação ser feita através de valores que variam de -1 e $+1$, o que facilita o entendimento dos resultados.

Trabalho de Campo

A diferença de localização entre a EI e a EV pode dificultar a comparação entre as medidas obtidas por AS e as obtidas *in situ*, sobretudo em função da variação na altitude entre os dois pontos. Para ilustrar essa situação, na Figura 4.14 são apresentadas as localizações de duas EVs e da EI de Pedras de Maria da Cruz.

Com o objetivo de solucionar ou minimizar este problema, foi realizada a medição da diferença de altitude entre o ponto de passagem do satélite e a estação *in situ* através do uso de receptores GPS geodésicos. Em Pedras de Maria da Cruz, um receptor GPS geodésico foi instalado no marco geodésico 2354D para servir de estação de referência ou estação base. Este marco faz parte do Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE que tem posição conhecida com precisão de milímetros conforme Tabela 4.2 que traz a descrição do marco.

Após a instalação do receptor na estação de referência, quatro pontos tiveram suas coordenadas e altitudes determinadas. O primeiro deles foi a referência de nível local da estação *in situ* de Pedras de Maria da Cruz (Figura 4.15 (a)). A partir desse procedimento foi realizado o nivelamento geométrico da EI, o que permite fazer medidas absolutas de nível. Em seguida, foi feita a medição no nível do rio para aquele dia, com a utilização do GPS na estação *in situ*, que foi instalado sobre a régua limnométrica (Figura 4.15 (b)).

Os outros dois pontos que tiveram suas coordenadas e altitudes determinadas se referem aos *tracks* dos satélites Envisat/Saral e Sentinel-3A, que apesar de possuírem

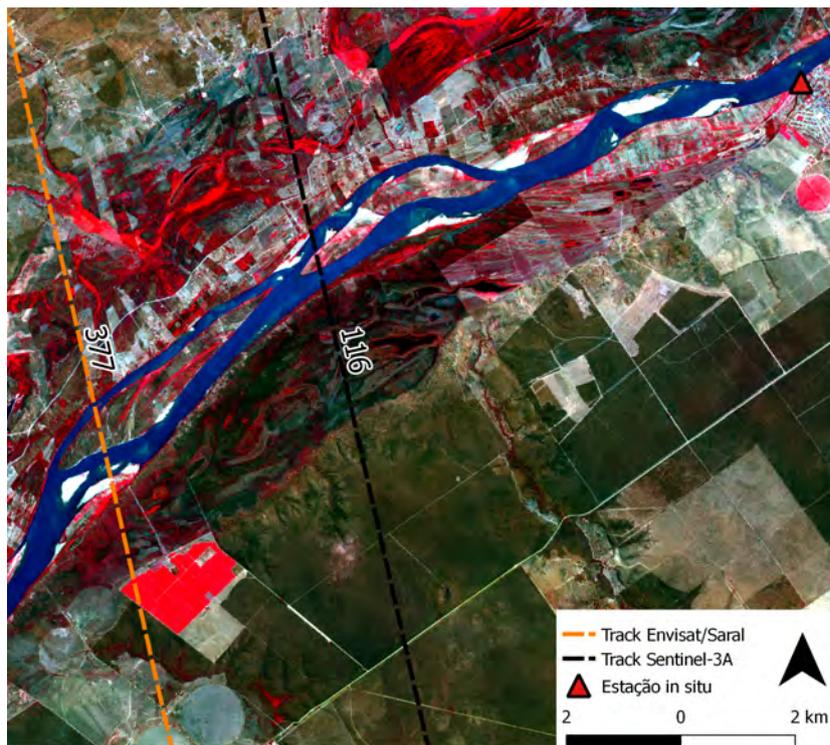


Figura 4.14: Localização das estações virtuais dos três satélites e da estação *in situ* sobrepostas a imagem Sentinel-2A em composição falsa cor. O ponto de cruzamento entre os *tracks* dos satélites e o rio não coincidem com a localização da estação *in situ* de Pedras de Maria da Cruz.

Tabela 4.2: Dados do marco geodésico de Pedras de Maria da Cruz, código 2354D, que faz parte do Banco de Dados Geodésicos (BDG) do Brasil. Os dados são necessários para a realização do pós-processamento das medidas obtidas em campo. Os valores são inseridos como controle para o GPS que foi instalado como base sobre o marco geodésico.

| | | | |
|----------------------------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Estação | 2354D | Local | Pedras de Maria da Cruz-MG |
| Dados Planimétricos | | Dados Altimétricos | |
| Latitude | 15°38'50,94703"S" | Altitude Ortométrica (m) | 489,9857 |
| Longitude | 44°23'58,07160"W" | Fonte | Nivelamento Geométrico |
| Altitude Geométrica | 477,572 | Sigma Altitude (m) | 0,07 |
| Fonte | GPS Geodésico | Datum | Imbituba |
| Origem | Ajustada | Data Medição | 16/05/1991 |
| Datum | SIRGAS 2000 | Data Cálculo | 15/06/2011 |
| Data Medição | 27/10/2015 | | |
| Data Cálculo | 14/03/2016 | | |
| Sigma Latitude (m) | 0,003 | | |
| Sigma Longitude (m) | 0,004 | | |
| Sigma altitude geométrica | 0,014 | | |



Figura 4.15: As fotografias mostram o GPS instalado em quatro pontos de medição, em todas as situações foi medido o nível do espelho d'água no dia do levantamento de campo, exceto no caso de (a), em que foi feita a medição das coordenadas da referência de nível global com o objetivo de nivelar a estação *in situ*.

cruzamento com o RSF naquela região, se encontram distantes da EI. As medições foram feitas junto ao espelho d'água (Figura 4.15 (c) e (d)), a fim de obter o nível absoluto do rio para aquela data.

O mesmo procedimento foi adotado para outras estações, o que permitiu encontrar a diferença de altitude entre o ponto de passagem do *track* do satélite e da estação *in situ*. No pós-processamento foram calculadas as posições e altitudes de forma precisa, com erros inferiores a cinco centímetros. Esses dados também serviram como auxílio no processo de validação dos dados dos satélites altimétricos (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Dados gerados a partir da realização de campo e pós-processamento dos dados de GPS geodésico. São apresentados os dados do nível zero da régua nas estações *in situ* e o nível da água nos pontos de cruzamento dos satélites utilizados no trabalho. Com isso foi gerado o dado de diferença entre o nível na estação *in situ* e na estação virtual.

| Nome | Estação in situ | | Estação Virtual | | | | Nível Zero | Diferença de Nível | | Nível zero | | Distância | |
|-------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|----------|--------|-----------------|--------------------|----------|-----------------|----------|---------------------|-------------|
| | | | Envisat | | Sentinel | | | EI e EV | | Estação Virtual | | até Estação in situ | |
| | Lat | Long | Lat | Long | Lat | Long | Estação in situ | Envisat | Sentinel | Envisat | Sentinel | Envisat | Sentinel-3A |
| Pirapora | -17.37 | -44.94 | -17.24 | -44.86 | -17.49 | -44.97 | 469.38 | x | x | X | X | 16500.24 | 14043.69 |
| Cachoeira da Manteiga | -16.66 | -45.08 | -16.79 | -44.97 | x | x | 447.49 | 2.50 | x | 449.98 | x | 19272.39 | x |
| São Romão | -16.37 | -45.07 | -16.37 | -45.06 | -16.14 | -44.08 | 443.85 | 0.00 | x | 443.85 | x | 0.00 | 24861.18 |
| Pedras de Maria da Cruz | -15.60 | -44.40 | -15.66 | -44.51 | -15.63 | -44.47 | 432.02 | 1.67 | 1.32 | 433.69 | 435.01 | 13927.23 | 9294.01 |
| Manga | -14.76 | -43.93 | -14.92 | -43.96 | -14.41 | -43.82 | 420.70 | x | x | x | x | 18542.33 | 40288.34 |

4.2 Avaliação dos dados das estações virtuais

Os resultados obtidos nas 12 EVs criadas para Envisat/Saral (Figura 4.16) são apresentados na Tabela 4.4. Os dados altimétricos foram processados com o uso do *retracker* ICE-1 e também após a aplicação do algoritmo RANSAC sobre os dados do ICE-1, este último com o objetivo de reduzir os erros de medição de nível d'água.



Figura 4.16: Localização das estações virtuais criadas a partir dos satélite Envisat e Saral ao longo do Rio São Francisco.

A partir dos dados do satélite Sentinel-3A foram criadas nove estações virtuais: São Romão, Pedras de Maria da Cruz, Pirapora, Manga, Gameleira, Paratinga, Barra, Bom Jesus da Lapa e Orocó. À exceção da EV de Orocó, a localização dessas EVs não é a mesma que as do Envisat e Saral em virtude da diferença entre as órbitas dos satélites (Figura 4.17). Os resultados obtidos para as Evs do Sentinel-3A estão

Tabela 4.4: Resultados obtidos com os dados dos satélites Envisat e Saral. As medidas foram comparadas através da correlação de Pearson e do Erro Médio Quadrático Relativo e Absoluto (EMQR e EMQA).

| | Largura (m) | | Distância EV-EI (Km) | Validação | Envisat | | Saral | |
|--------------------------|-------------|---------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | EV | EI | | | ICE-1 (N) | RANSAC (N) | ICE-1 (N) | RANSAC (N) |
| Iguatama | 60 | 50 | 30 | Correlação EMQR | 0,89 1,09 (64) | 0,48 1,16 (54) | - - | - - |
| Pirapora | 335 | 280 | 20 | Correlação EMQR | 0,60 0,45 (35) | 0,55 0,48 (24) | 0,63 0,66 (8) | 0,12 1,36 (5) |
| Cachoeira da Manteiga | 430 | 430 | 23 | Correlação EMQA EMQR | 0,86 1,38 (61) 0,54 (61) | 0,84 1,42 (48) 0,56 (48) | 0,86 8,00 (20) 0,69 (20) | 0,76 7,74 (13) 0,29 (13) |
| São Romão | 500 | 500 | 0 | Correlação EMQA EMQR | 0,87 0,98 (60) 0,43 (60) | 0,83 1,07 (58) 0,54 (58) | 0,58 0,81 (15) 0,52 (15) | 0,85 0,59 (12) 0,09 (12) |
| Pedras de Maria da Cruz | 1200 | 500 | 13 | Correlação EMQA EMQR | 0,96 2,02 (58) 0,46 (58) | 0,97 2,05 (35) 0,49 (35) | - - - | - - - |
| Manga | 580 | 340 | 19 | Correlação EMQR | 0,99 0,23 (69) | 0,98 0,26 (61) | 0,74 0,68 (7) | 0,85 0,52 (6) |
| Morpará | 580-360 | 580-360 | 0 | Correlação EMQR | 0,98 0,46 (67) | 0,95 0,52 (58) | 0,98 0,09 (6) | - - |
| Orocó | 2500 | 2600 | 4,5 | Correlação EMQR | 0,68 0,25 (72) | 0,61 0,31 (60) | -0,1 0,19 (6) | -0,11 0,18 (6) |
| Belém do São Francisco | 2900 | 2900 | 0 | Correlação EMQR | 0,84 0,70 (55) | 0,80 0,74 (50) | 0,89 0,14 (8) | 0,76 0,23 (5) |
| Ibó | 880-1900 | 250 | 17,5 | Correlação EMQR | 0,77 0,22 (41) | 0,44 0,32 (35) | -0,33 0,94 (7) | -0,36 0,77 (7) |
| Santa Maria da Boa Vista | 900 | 430 | 6 | Correlação EMQR | 0,73 0,33 (69) | 0,48 0,46 (58) | -0,54 1,38 (10) | 0,15 1,21 (6) |
| Penedo | 1500 | 1300 | 4 | Correlação EMQR | 0,39 0,93 (42) | - - | -0,35 1,80 (6) | -0,35 1,46(5) |

apresentados na Tabela 4.5.

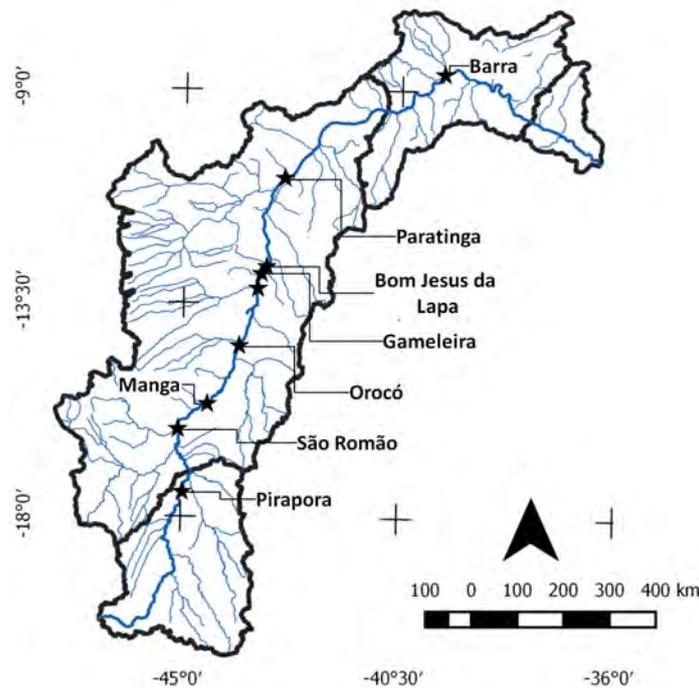


Figura 4.17: Localização das estações virtuais criadas a partir do satélite Sentinel-3A ao longo do Rio São Francisco.

Tabela 4.5: Resultados obtidos com os dados do Sentinel-3A. As medidas foram comparadas através da correlação de Pearson e do Erro Médio Quadrático Relativo (EMQR).

| | Largura (m) | | Distância EV-EI (Km) | Validação | Sentinel-3A | |
|----------------------------|-------------|------|-------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| | EV | EI | | | ICE-1 (N) | RANSAC (N) |
| Pirapora | 330 | 270 | 14,3 | Correlação EMQR | 0,13 0,55 (6) | 0,00 1,07 (6) |
| São Romão | 550 | 500 | 20 | Correlação EMQR | 0,86 0,36 (10) | 0,86 0,35 (10) |
| Pedras de Maria da Cruz | 900 | 460 | 8,5 | Correlação EMQA EMQR | - - - | - - - |
| Manga | 580 | 340 | 40 | Correlação EMQR | 0,93 0,53 (8) | 0,93 0,53 (8) |
| Orocó | 2500 | 2500 | 3 | Correlação EMQR | 0,07 1,14 (11) | 0,12 0,88 (10) |
| Gameleira | 430 | 300 | 3 | Correlação EMQR | 0,86 0,39 (10) | 0,90 0,52 (10) |
| Bom Jesus da Lapa | 360 | 530 | 9,5 | Correlação EMQR | 0,59 0,64 (8) | 0,38 0,65 (8) |
| Paratinga | 415 | 690 | 6,8 | Correlação EMQR | 0,79 0,84 (10) | 0,78 0,83 (10) |
| Barra | 480 | 890 | 36 | Correlação EMQR | 0,81 0,32 (6) | 0,83 0,26 (5) |

A discussão dos resultados foi agrupada em três categorias, de acordo com a acurácia das medidas obtidas: 1 - **Melhor Acurácia**, que reúne os valores na ordem dos 0,30 m; 2 - **Acurácia Intermediária**, com os resultados próximos a 0,50 m; 3 - **Menor Acurácia**, com erros iguais ou superiores a 0,70 m.

4.2.1 Envisat

Maior Acurácia

Os melhores resultados foram obtidos nas EVs de Manga, Orocó, Ibó e Santa Maria da Boa Vista, com o *retracker* ICE-1, onde o EMQR foi de 0,23 m, 0,25 m, 0,22 m e 0,33 m, respectivamente. Após a aplicação do RANSAC o EMQR foi de 0,26 m, 0,31 m, 0,32 m e 0,46, para as mesmas EVs, respectivamente. As correlações foram de 0,99, 0,68, 0,77 e 0,73, respectivamente, com o uso do ICE-1. Estes resultados, associados às séries temporais das estações *in situ* e virtual (Figura 4.18), mostram que as variações do nível d'água nas EV e EI acontecem de maneira similar nas quatro estações analisadas.

Pequenas variações topográficas e maior largura do canal fluvial favoreceram o uso da AS, sendo esta ultima um fator que gera um maior número de pontos sobrepostos ao rio. Fato que pode ser observado tanto na região de Ibó (largura de ≈ 1900 m), como na EV de Orocó, que tem distância entre margens de ≈ 3000 m.

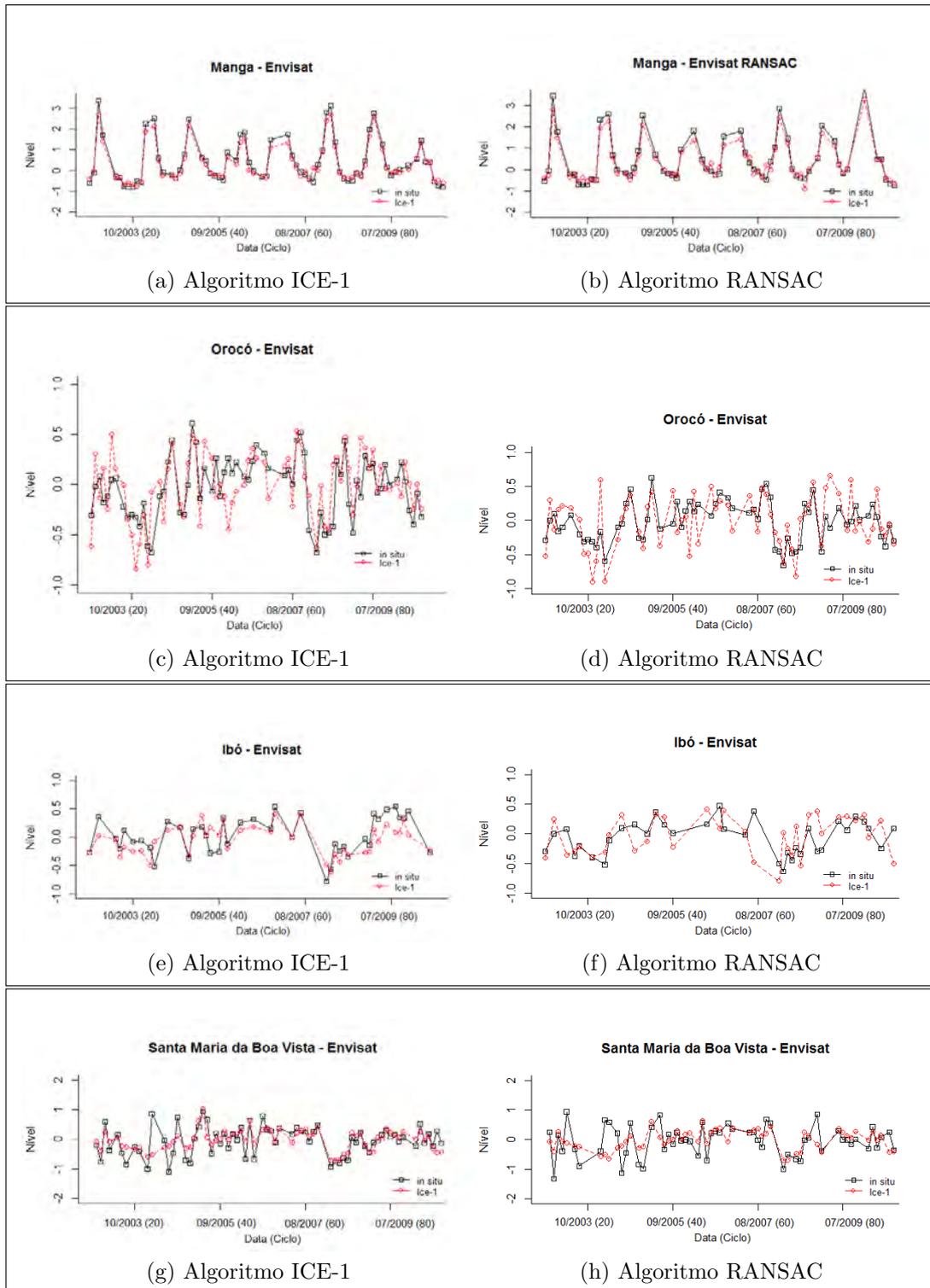


Figura 4.18: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. Os níveis de água ajustados foram plotados, a linha em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto correspondem ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Manga com uso do ICE-1; (b) EV de Manga com uso do RANSAC; (c) EV de Orocó com uso do ICE-1; (d) EV de Orocó com uso do RANSAC; (e) EV de Ibó com uso do ICE-1; (f) EV de Ibó com uso do RANSAC; (g) EV de Santa Maria da Boa Vista com uso do ICE-1; (h) EV de Santa Maria da Boa Vista com uso do RANSAC.

Em Orocó, Manga e Santa Maria da Boa Vista, o número de medições utilizadas foi grande, com cerca de 80% de aproveitamento com o ICE-1 e 70% com o RANSAC. Isso pode ser relacionado com a cobertura do solo presente no entorno dessas EVs (vegetação), que tem alto contraste com a água no comprimento de onda de operação do sensor RA-2 (Figura 4.20). Diferente do que aconteceu em Ibó, em que cerca de 49% e 42% dos dados para ICE-1 e RANSAC, respectivamente, puderam ser aproveitados. O baixo aproveitamento dos dados em Ibó se deve, possivelmente, à presença de solo exposto nas margens do rio, que retorna respostas semelhantes às da água e provoca a perda de medidas (Blarel *et al.*, 2016).

Por outro lado, um fator que contribuiu para a boa acurácia e grande aproveitamento dos dados é a similaridade da forma e da largura do rio nos dois locais de medição, como o que correu em Manga (Figura 4.19).



Figura 4.19: Forma do rio nas estações virtuais e *in situ* de Manga.

Acurácia Intermediária

O EMQR ficou em torno de 0,50 m para a maior parte das EVs criadas com os dados do Envisat, seja com a utilização do algoritmo ICE-1 ou após a aplicação do RANSAC. As EVs com erros nesta faixa são: Pirapora, Cachoeira da Manteiga, São Romão, Pedras de Maria da Cruz, Morpará, Santa Maria da Boa Vista e Belém do São Francisco.

Em Pirapora o EMQR foi de 0,45 m e 0,48 m para ICE-1 e RANSAC, respectivamente. O maior problema identificado nessa EV foi o baixo número de medições aproveitadas, apenas 35 % com o ICE-1 e 24 % com o RANSAC. A aplicação da AS foi pouco eficaz, possivelmente, devido a variação topográfica do próprio rio, o qual possui correntezas. Isso gera respostas vindas de várias direções, o que gera aumento dos ruídos no sinal capturado pelo sensor (Figura 4.21).

As medições plotadas, quando comparadas visualmente com os dados *in situ*, indicam que as variações dos dados na EV são bastante similares àsquelas da EI (Figura 4.22), tanto para o ICE-1, quanto para o RANSAC. Esse fator indica que é possível acompanhar a variação do nível de água ao longo do tempo com o uso do Envisat em Pirapora, apesar do EMQR não ser ideal.

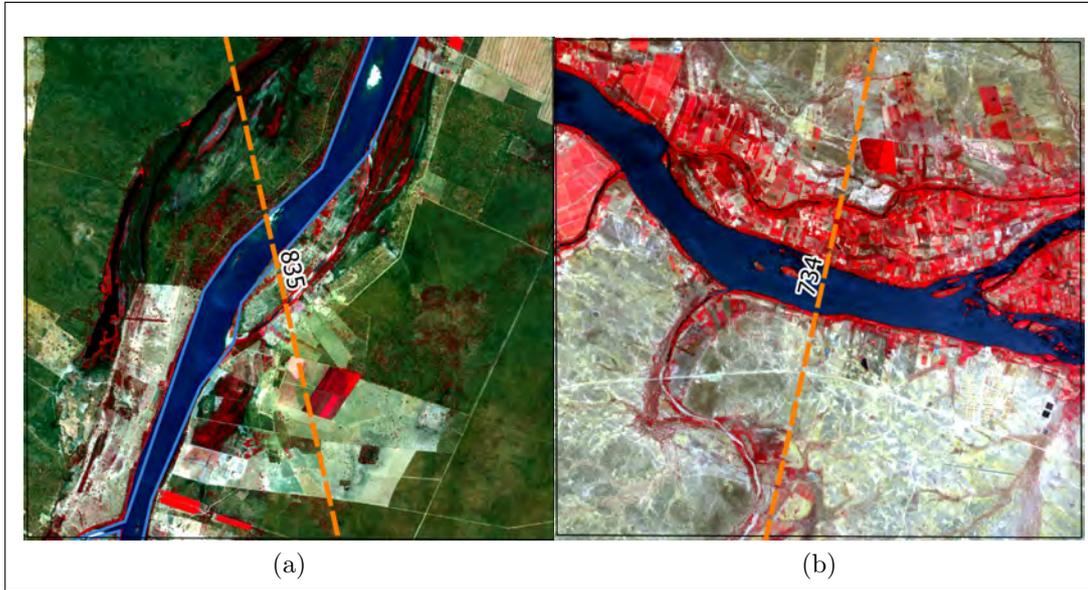


Figura 4.20: Imagem Sentinel-2A em composição falsa cor. (a) Estação de Manga; (b) Estação de Ibó.

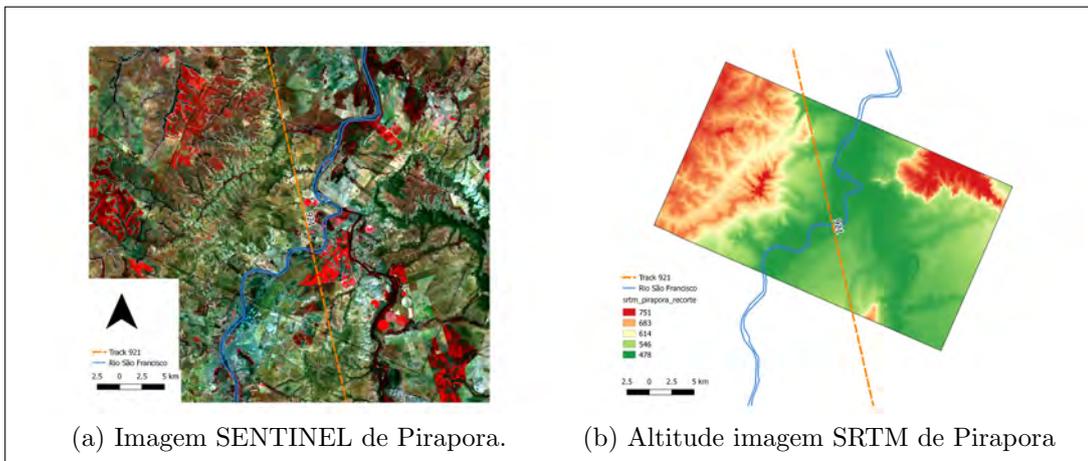


Figura 4.21: Estação virtual de Pirapora no Alto São Francisco. (a) Imagem Sentinel-2A; (b) altitude baseada em modelo digital de elevação SRTM.

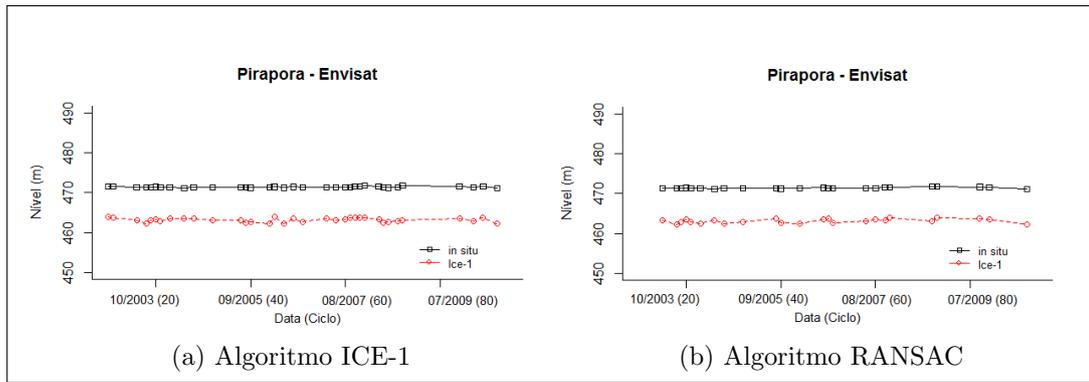


Figura 4.22: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água ajustados, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Pirapora com uso do ICE-1; (b) EV de Pirapora com uso do RANSAC.

As EVs de Cachoeira da Manteiga, São Romão e Pedras de Maria da Cruz estão localizadas em regiões de características semelhantes. A região de São Romão destaca-se pela presença das EI e EV em mesma posição e a existência de nivelamento ortométrico da RN. Nesta EV foi possível calcular tanto o EMQR quanto o EMQA, que foram de 0,43 m e 0,98 m, respectivamente⁵. O erro absoluto é superior ao calculado de forma relativa, o que indica uma possível superestimação da acurácia quando do ajuste dos dados através da mediana. Para as outras duas EVs foram feitos ajustes para viabilizar a comparação dos dados de forma absoluta, nestas o EMQA também foi superior ao EMQR (Tabela 4.4).

Em termos de variação relativa dos dados na EI e EV, a correlação foi de 0,86, 0,87 e 0,96, respectivamente com o uso do ICE-1, o que indica a capacidade de acompanhamento da variação do nível com o uso da AS. Associado a isso estão as séries temporais plotadas para as três EVs, que também colaboram na direção de se utilizar a AS nestas (Figura 4.23).

Menor Acurácia

As EVs de Belém do São Francisco, Iguatama e Penedo foram as que tiveram os resultados com menor acurácia para o satélite Envisat, tanto com o *retracker* ICE-1 quanto com a aplicação do RANSAC. O EMQR foi de 0,70 m, 1,09 m e 0,93 m, respectivamente, com o ICE-1. O RANSAC não retornou resultados para a EV de Penedo, mas para Iguatama o EMQR foi de 1,16 m e o de Belém do São Francisco de 0,74 m.

Em Belém do São Francisco o RSF tem largura próxima a três quilômetros e as

⁵Com o uso do algoritmo ICE1, para os resultados do RANSAC ver Tabela 4.4

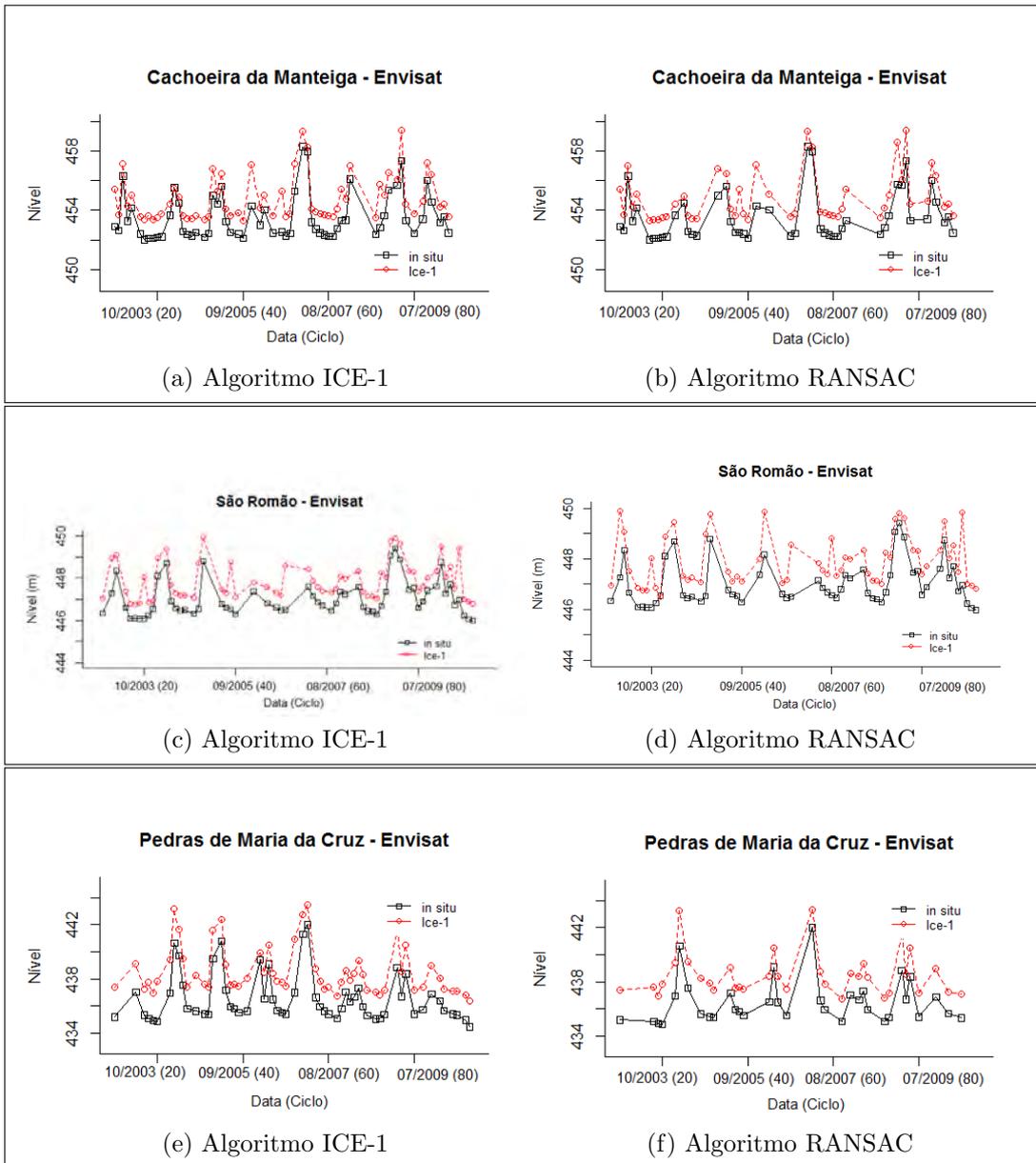


Figura 4.23: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água ajustados a partir da subtração da mediana das duas séries temporais, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Cachoeira da Manteiga com uso do ICE-1; (b) EV de Cachoeira da Manteiga com uso do RANSAC; (c) EV de São Romão com uso do ICE-1; (d) EV de São Romão com uso do RANSAC; (e) EV de Pedras de Maria da Cruz com uso do ICE-1; (f) EV de Pedras de Maria da Cruz com uso do RANSAC.

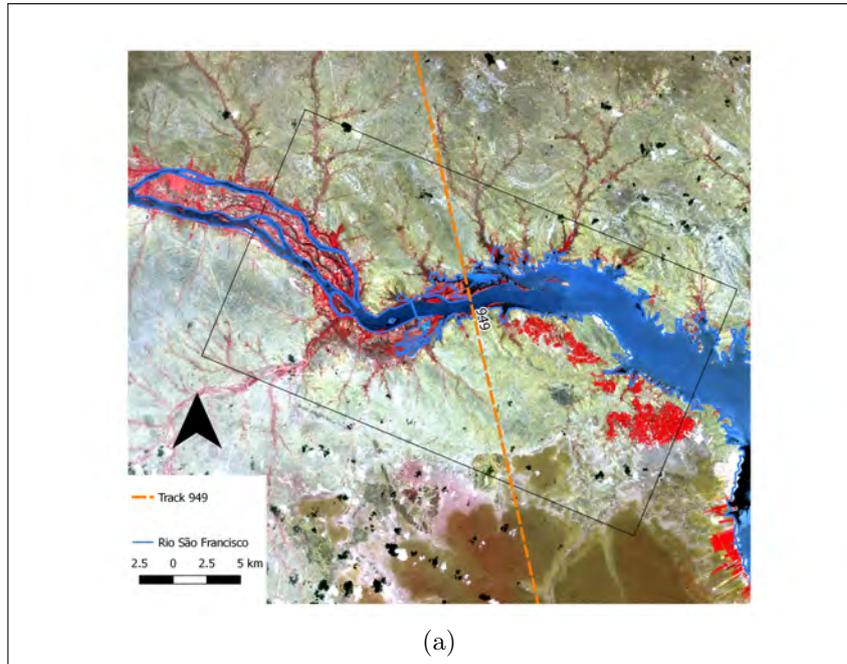


Figura 4.24: Região da Estação Virtual de Belém do São Francisco. Imagem do satélite Sentinel-2A em composição falsa-cor

estações *in situ* e virtual estão praticamente na mesma posição no rio. Mesmo assim o EMQR calculado foi o terceiro pior em comparação com as outras EVs criadas ao longo do RSF. Uma das possíveis explicações para o resultado de Belém do São Francisco está na localização da EV, que está na porção superior do lago da Usina Hidrelétrica Luiz Gonzaga, aonde ocorre o cruzamento do *track* nominal do Envisat (Figura 4.24). Esse tipo de situação pode gerar influências no sinal radar devido à formação de ondas no lago, o que prejudica tanto a acurácia quanto a capacidade de o sensor gerar medidas em diferentes ciclos. Como pode ser visto na Tabela 4.4, $\approx 83\%$ do total de ciclos pôde ser utilizado, com o ICE-1 e $\approx 70\%$ com o RANSAC, valor relativamente baixo para as características do RSF neste ponto. Outro fator relacionado aos erros é a cobertura do solo na região de entorno, que é composta predominantemente por áreas de solo exposto, que geram respostas similares àquelas da água no ponto nadir e no comprimento de onda de operação do Envisat (Figura 4.24).

Dentre as EVs de menor acurácia estão Iguatama e Penedo, localizadas nos dois extremos do RSF, a primeira próxima à região da nascente e a segunda próximo de sua foz (Figura 4.25). Um dos fatores que deve ser levado em consideração no uso da AS é a largura do corpo hídrico do qual será calculada a altitude. Espera-se que a acurácia e o aproveitamento das medições em seções com largura superior a um quilômetro sejam melhores que a de seções de largura inferior (Calmant e Seyler, 2006; Rosmorduc *et al.*, 2006; Maillard e Calmant, 2013). Ao seguir este preceito, esperava-

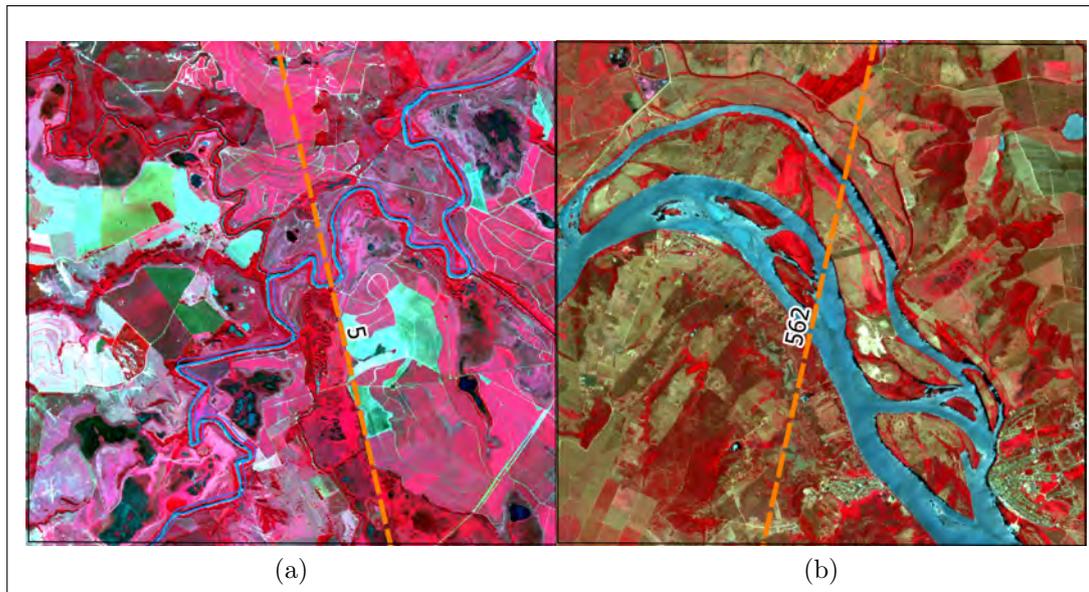


Figura 4.25: (a) Imagem RapidEye em composição falsa-cor da região de Iguatama; (b) Imagem Sentinel-2A em composição falsa-cor da região de Penedo.

se que em Iguatama (largura $\approx 60 m$) os erros de medição fossem maiores que os de Penedo (largura $\approx 1500 m$). Ainda que isso tenha acontecido, o EMQR de Penedo foi somente $\approx 15\%$ menor que o obtido em Iguatama (Tabela 4.4). A comparação entre o resultado de Penedo e Iguatama indica que o uso da altimetria em cursos d'água com pequena largura não é determinante para o uso da AS, mesmo não obtendo dados muito acurados.

Ainda em relação a Iguatama e Penedo, a partir da séries temporais construídas com dados *in situ* e altimétricos, observa-se que as medidas de nível em Iguatama, com o uso do RA-2, acompanham melhor o nível da estação *in situ* do que as medições realizadas em Penedo (Figura 4.26). A correlação também colabora pra isso, com valores de 0,89 para Iguatama e 0,39 para Penedo com o ICE-1.

As razões para que a altimetria tenha sido relativamente boa na região de Iguatama, com uso do Envisat, está no contraste entre a água e a vegetação e no tamanho do *footprint* do satélite. A abrangência do *footprint* de um único ponto medido, associado ao padrão meandrante do RSF nesta região, pode ter contribuído para que o rio tenha sido captado pelo sensor do radar altimétrico como um curso d'água de largura superior (Figura 4.27). Já os resultados de Penedo estão relacionados ao solo exposto, que gera baixo contraste com a água nas bandas Ka e Ku, e a presença de ondas e a influência das marés, devido a proximidade com a costa (Hidayat *et al.*, 2011; Sulistioadi, 2013).

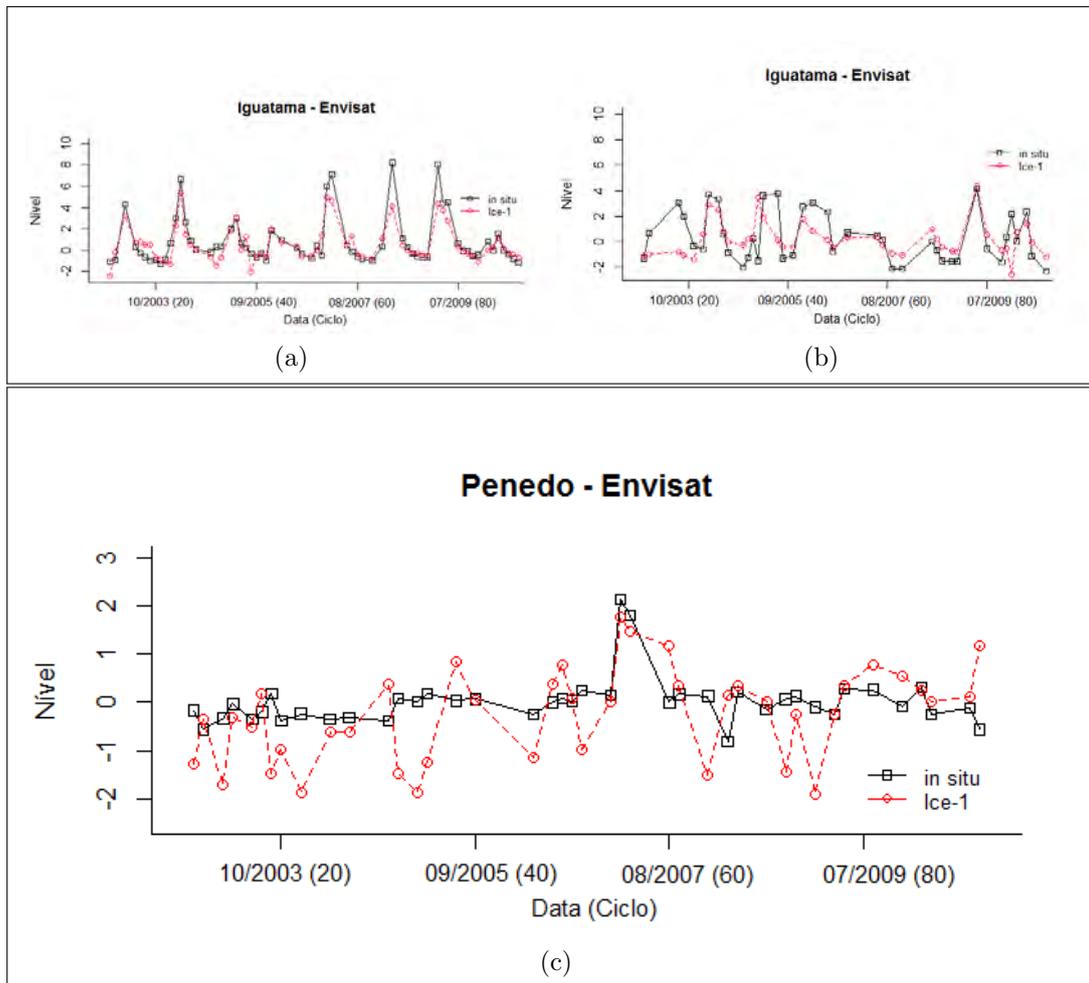


Figura 4.26: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água ajustados a partir da subtração da mediana das duas séries temporais, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Iguatama com uso do ICE-1; (b) EV de Iguatama com uso do RANSAC; (c) EV de Penedo com uso do ICE-1.

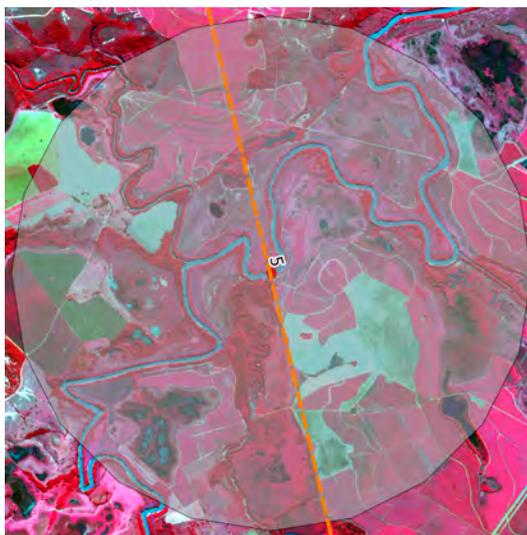


Figura 4.27: Área do *footprint* no cruzamento entre o *track* 5 do Envisat e o Rio São Francisco sobreposto a imagem RapidEye em composição falsa cor. A área recoberta pelo *footprint* inclui vários trechos do rio, sendo assim, as medições do nível podem ter sido favorecidas por uma composição de respostas vindas de diversas partes dentro da área recoberta por um único ponto.

4.2.2 Saral

Maior Acurácia

O Saral gerou resultados melhores do que 0,30 m para a EV de Morpará, com uso do ICE-1, Orocó e Belém do São Francisco com ICE-1 e RANSAC e Cachoeira da Manteiga com o RANSAC. Em Morpará o Saral, com o ICE-1, retornou um EMQR de 0,09 m, um dos melhores obtidos neste trabalho. O baixo EMQR em Morpará foi propiciado pela EV e EI estarem no mesmo ponto do rio, salvo a variação em relação ao *track* nominal. A correlação de 0,98 e o gráfico da Figura 4.28 também mostram como os dados *in situ* e por AS variam na mesma proporção.

Em Cachoeira da Manteiga e São Romão o EMQR foi de 0,29 m e 0,09 m, respectivamente, com o uso do RANSAC. Em São Romão foi feito, ainda, a estimativa do EMQA, que foi de 0,59 m. Já em Cachoeira da Manteiga, a dificuldade na correção do nível em função da distância entre EV e EI gerou resultado pouco acurado com o uso da altimetria radar (Tabela 4.4). A variação de nível na EV e EI, em ambas as estações se deu de forma similar com o uso do RANSAC (Figura 4.29).

Em Orocó e Belém do São Francisco o Saral teve bons resultados, conforme pode ser visto na Tabela 4.4. A Figura 4.30 mostra que para as duas EVs o nível por AS acompanha a variação do nível nas EIs, o que reforça a qualidade das medições. Os bons resultados das duas EVs, está relacionado principalmente à largura do RSF, que é superior a 2.500 metros (Figura 4.31).

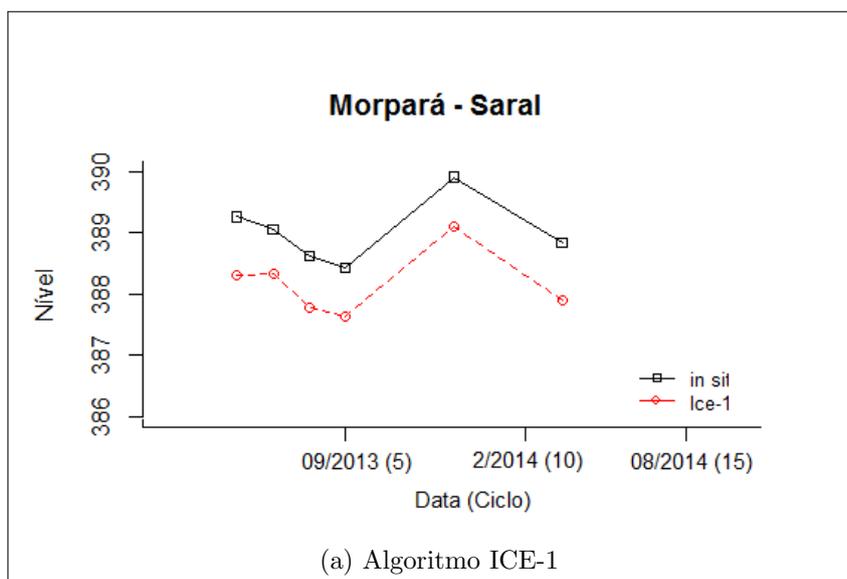


Figura 4.28: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água ajustados para as duas séries temporais, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ* da EV de Morpará com o uso do ICE-1.

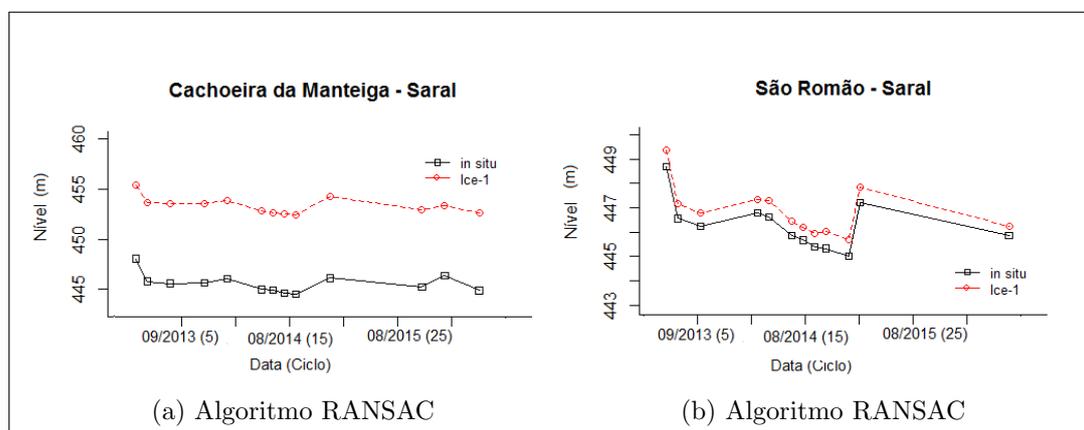


Figura 4.29: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Cachoeira da Manteiga com uso do RANSAC; (b) EV de São Romão com uso do RANSAC.

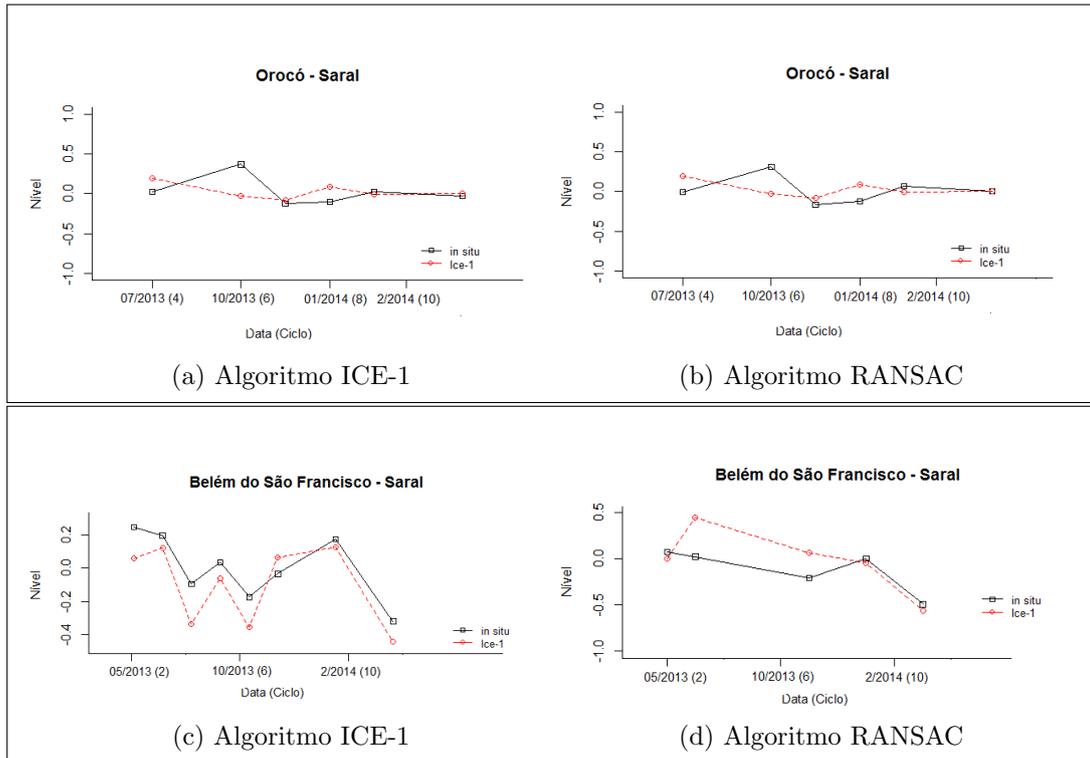


Figura 4.30: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água ajustados para as duas séries temporais, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Orocó com uso do ICE-1; (b) EV de Orocó com uso do RANSAC; (c) EV de Belém do São Francisco com uso do ICE-1; (d) EV de Belém do São Francisco com uso do RANSAC.

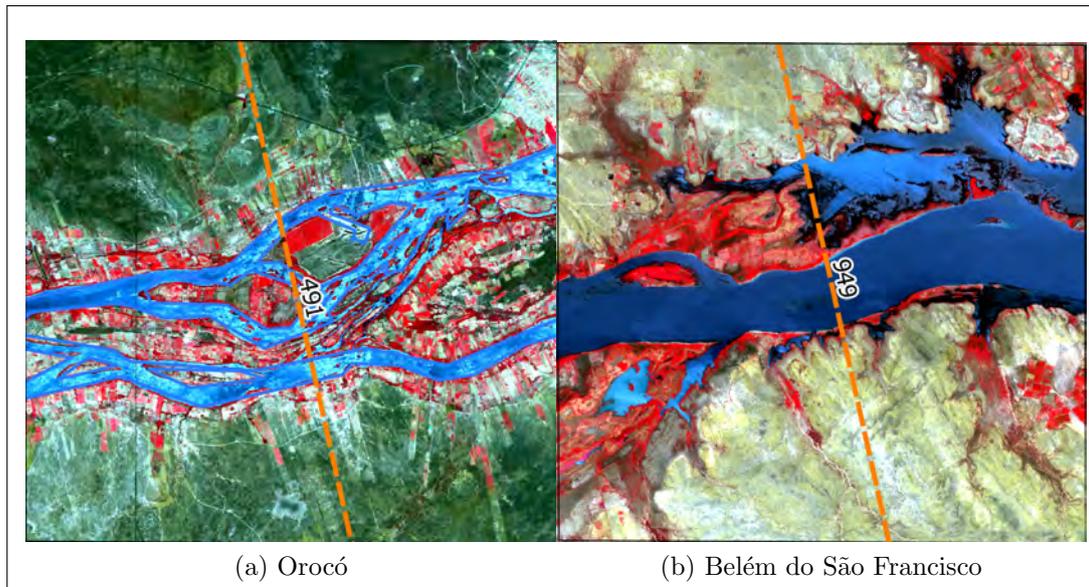


Figura 4.31: Imagens de satélite em composição falsa cor nas estações virtuais (EV). (a) EV de Orocó, imagem RapidEye; (b) EV de Belém do São Francisco, imagem Sentinel-2A.

Acurácia Intermediária

Na EV de São Romão o uso do *retracker* ICE-1 gerou EMQR de 0,52 m, valor este relativamente pior que o obtido com o RANSAC (Tabela 4.4). O EMQA a partir do algoritmo ICE-1 foi de 0,89 m. Outra EV que teve EMQR próximo a 0,50 m foi a de Manga, com acurácia de 0,52 m com o uso do RANSAC. Os gráficos da Figura 4.32 mostram a variação do nível em São Romão (ICE-1) e Manga (RANSAC) que tiveram correlação de 0,58 e 0,85, respectivamente. Os resultados obtidos mostram a boa relação entre a variação do nível nas estações virtuais e *in situ*.

Menor Acurácia

O EMQR calculado para as EVs de Cachoeira da Manteiga e Manga, com o uso do ICE-1, foram de 0,69 m e 0,68 m, respectivamente. A EV de Cachoeira da Manteiga gerou 20 medidas válidas com o uso do ICE-1, sendo a EV com o maior aproveitamento de medidas do Saral neste trabalho. A correlação dos dados da EV com os da EI foi de 0,86 e 0,74 para Cachoeira da Manteiga e Manga, respectivamente. As séries temporais das duas EVs são apresentadas nos gráficos da Figura 4.33. A variação de nível, em ambas as EVs, é semelhante à da estação *in situ*, o que mostra que a variação do nível pode ser acompanhada tanto pelo método convencional quanto pela AS. Destaca-se que, em Manga, o valor absoluto do nível é conhecido, contudo a diferença entre o valor obtido pelo satélite e o *in situ* são muito altos em virtude da distância entre EI e EV

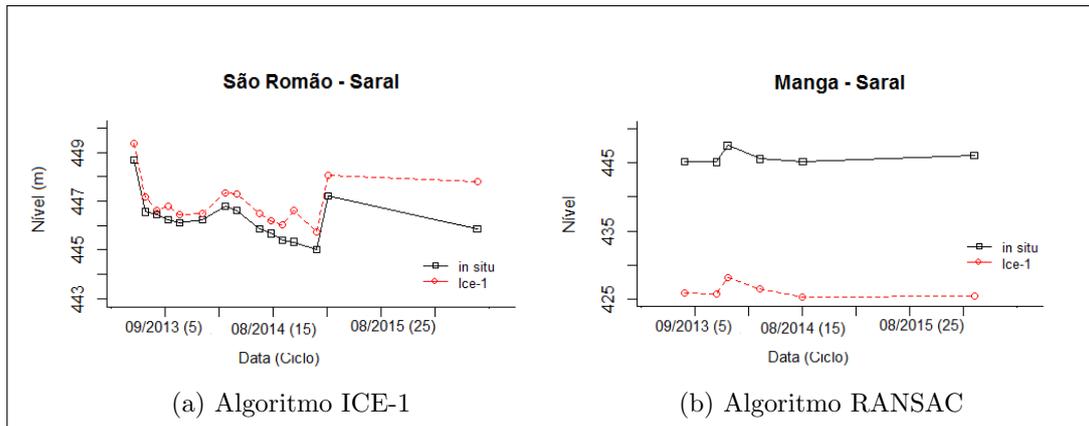


Figura 4.32: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de São Romão com uso do ICE-1; (b) EV de Manga com uso do RANSAC.

e do mau funcionamento do *tracker* do Saral nesta região. Outra possibilidade para os valores discrepantes de medidas entre o dado *in situ* e o virtual pode estar relacionado à problemas no processamento dos dados pelas equipes em terra, que podem incorrer em erros grosseiros como os vistos na EV de Manga.

Nas EVs de Ibó, Santa Maria da Boa Vista e Penedo, tanto os resultados obtidos com o ICE-1 quanto com o RANSAC, a acurácia foi pior que 0,70 m. Nas três EVs isso é inesperado, uma vez que o curso d'água possui mais de 800 metros de largura, o que favoreceria a AS. O EMQR calculado foi de 0,94 m, 1,38 m e 1,80 m, respectivamente, com o uso do ICE-1 e de 0,77 m, 1,21 m e 1,46 m, respectivamente, com o uso do RANSAC.

As razões para a baixa acurácia da AS nessas EVs podem estar relacionadas com a presença de vastas áreas de solo exposto às margens do RSF, que pode causar ruídos nas respostas capturadas pelo sensor (Figura 4.34). Além disso, a presença de bancos de areia no curso d'água pode prejudicar as medições (Verron *et al.*, 2018).

A partir dos gráficos da Figura 4.35 constata-se que a variação de nível na EV, mesmo com o uso do RANSAC, não acompanham bem as medidas *in situ*. Fator esse que pode ser comprovado, também, pelos resultados da correlação (Tabela 4.4). Dessa forma, o uso do Saral não foi capaz de gerar medidas com boa acurácia ou que contribuíssem para o acompanhamento do nível ao longo do tempo nas referidas EVs.

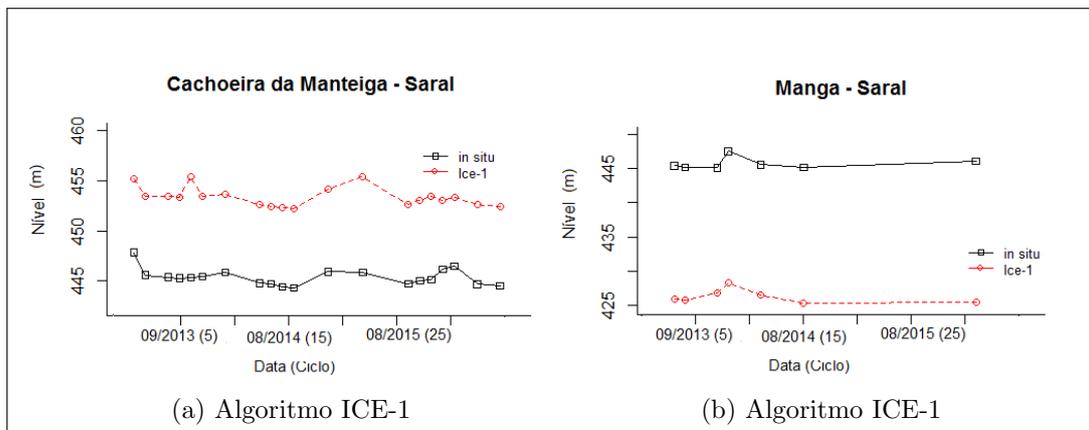


Figura 4.33: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Cachoeira da Manteiga com uso do ICE-1; (b) EV de Manga com uso do ICE-1.

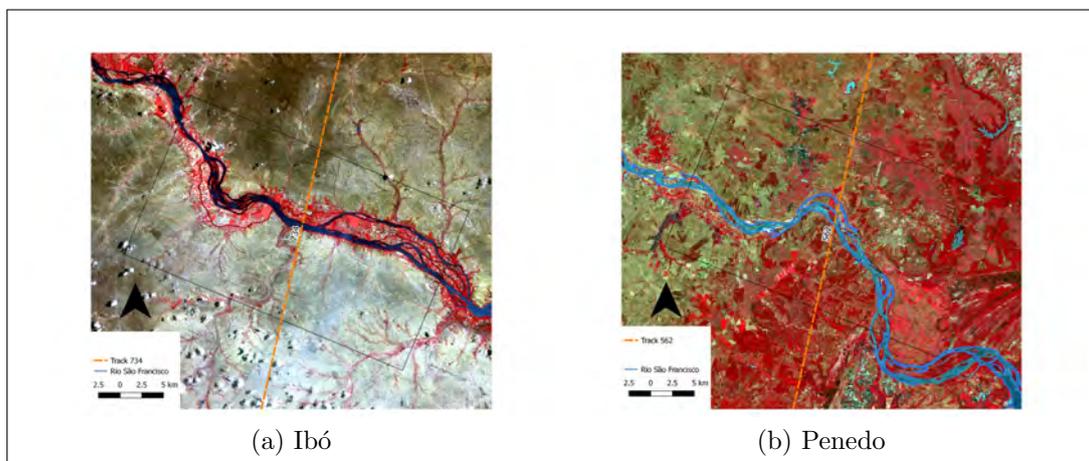


Figura 4.34: Estações virtuais de Ibó e Penedo no Rio São Francisco. (a) Imagem Sentinel-2A de Ibó; (b) Imagem Sentinel-2A de Penedo.

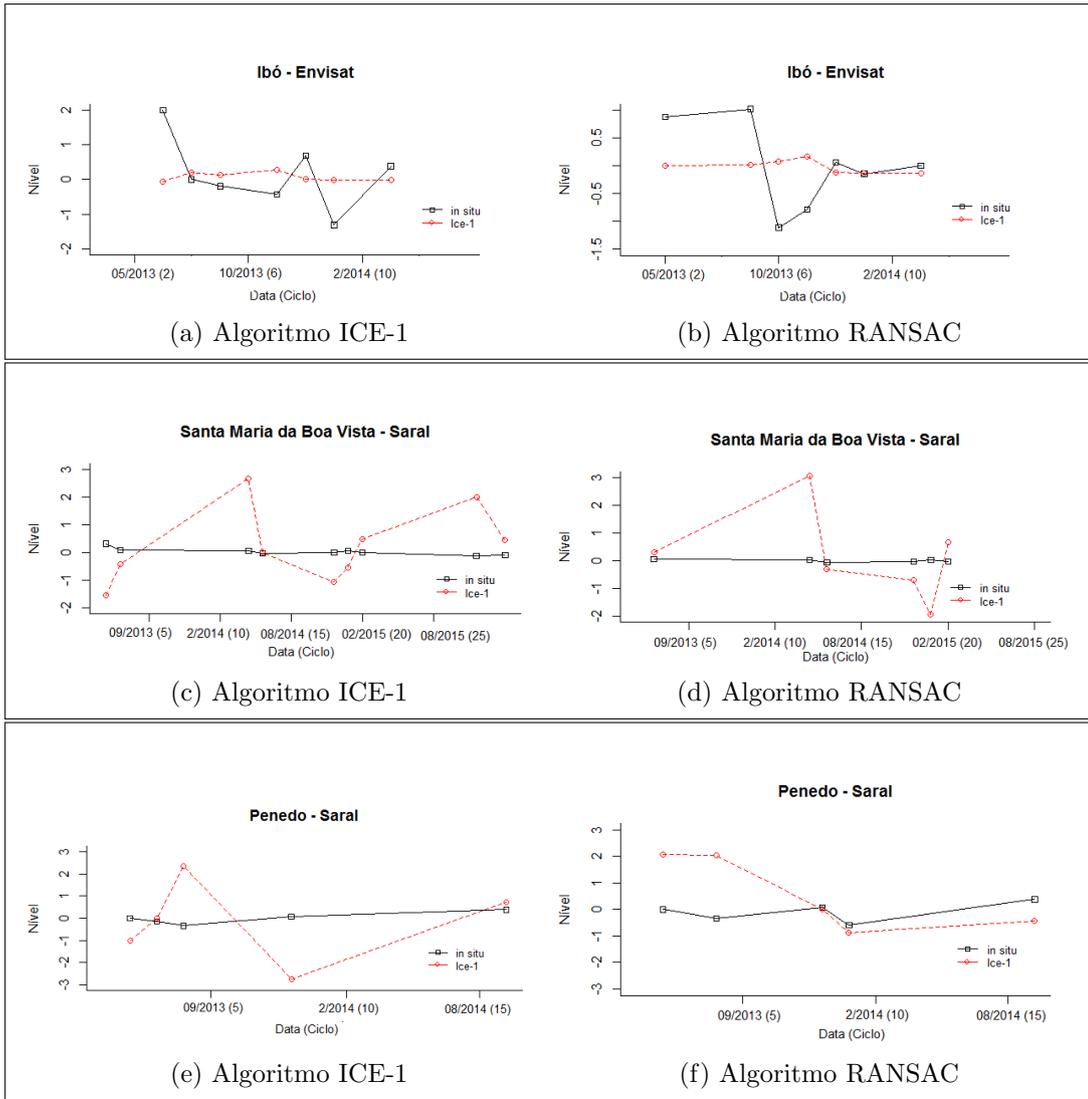


Figura 4.35: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água ajustados das duas séries temporais, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Ibó com uso do ICE-1; (b) EV de Ibó com uso do RANSAC; (c) EV de Santa Maria da Boa Vista com uso do ICE-1; (d) EV de Santa Maria da Boa Vista com uso do RANSAC; (e) EV de Penedo com uso do ICE-1; (f) EV de Penedo com uso do RANSAC.

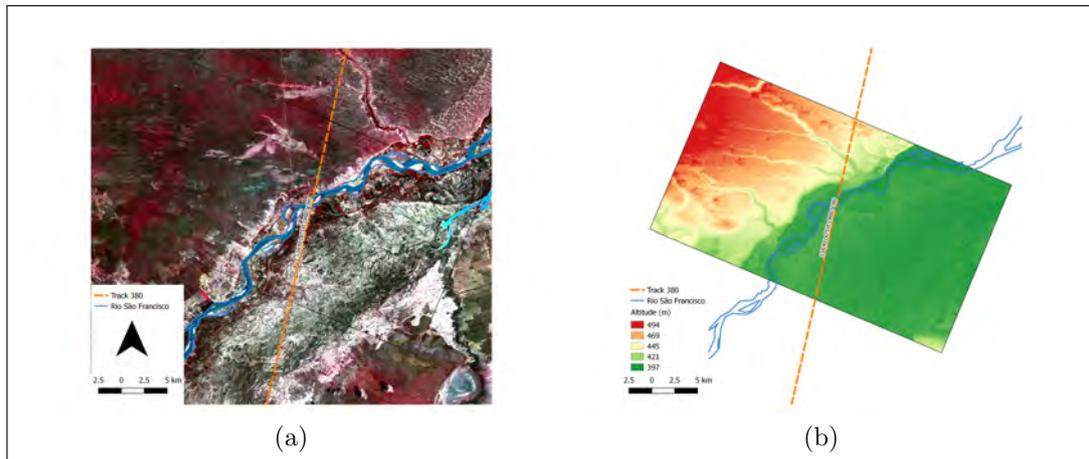


Figura 4.36: Região da Estação Virtual de Barra. (a) Imagem Sentinel-2A; (b) altitude baseada em modelo digital SRTM.

4.2.3 Sentinel-3A

Maior Acurácia

Na EV de São Romão⁶ o EMQR foi de 0,36 m e 0,35 m para ICE-1 e RANSAC, respectivamente. Já em Barra os resultados foram de 0,32 m e 0,26 m.

A principal razão para que São Romão tenha uma boa precisão com o uso do Sentinel-3A está nas características da área, que são semelhantes às de sua homônima criada para os satélites Envisat e Saral. Além disso, a relação entre largura do rio na EV e EI, que é de ≈ 550 m, contribui para que o nível varie em proporções semelhantes nos dois pontos.

Na região da EV de Barra o RSF possui um canal anastomosado, apesar da complexidade do canal fluvial a topografia suave da região favoreceu o uso da AS (Figura 4.36).

Ao comparar as EVs de Barra e São Romão percebe-se, para esta última, que o nível varia de forma mais semelhante aos dados *in situ* do que no caso da EV de Barra (Figura 4.37). Portanto, apesar da acurácia calculada ser maior em Barra, a taxa de variação parece ser mais semelhante entre os dados *in situ* e por altimetria na EV de São Romão. Situação essa comprovada, também, pela correlação dos dados que foi de 0,86 (ICE-1 e RANSAC) para São Romão e 0,81/0,83 (ICE-1/RANSAC) para Barra.

⁶A estação virtual criada com o uso do Sentinel-3A não possui a mesma localização daquela criada a partir do Envisat/Saral.

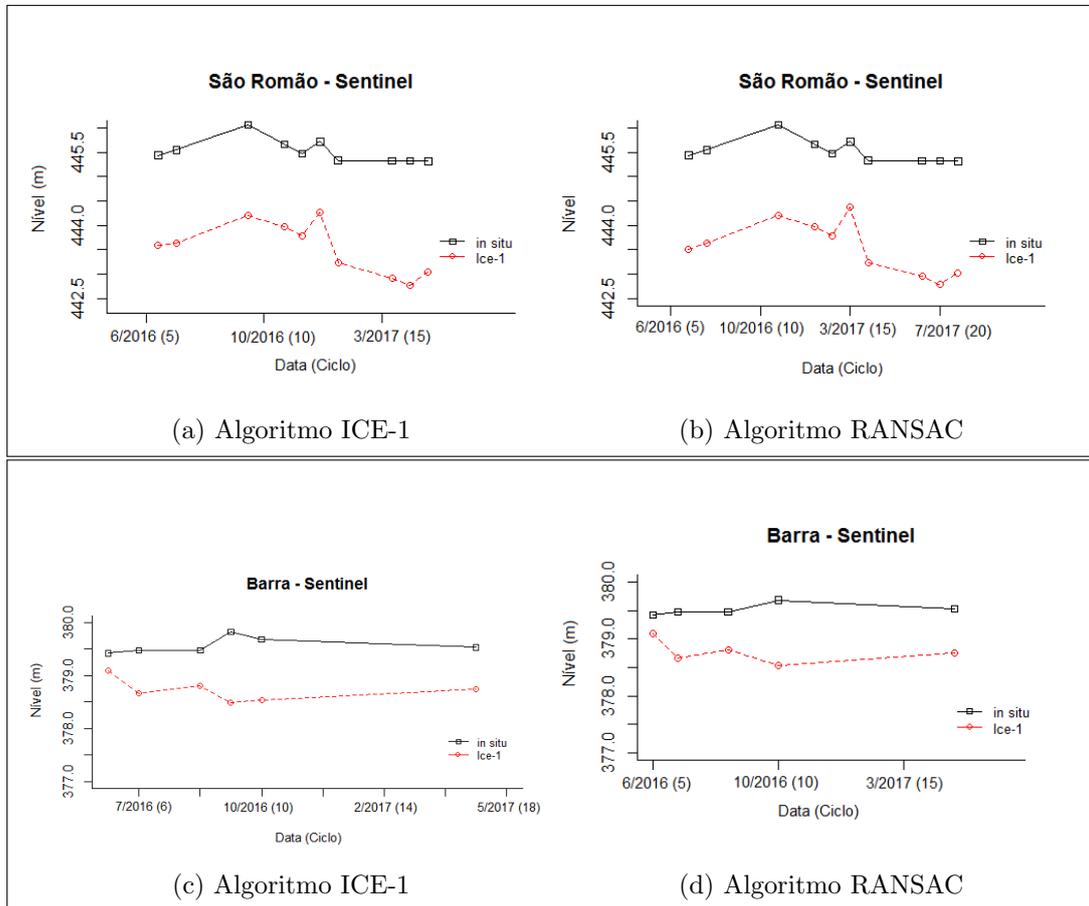


Figura 4.37: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de São Romão com uso do ICE-1; (b) EV de São Romão com uso do RANSAC; (c) EV de Barra com uso do ICE-1; (d) EV de Barra com uso do RANSAC. Para estação de Barra foi inserido um fator de correção para que o nível *in situ* possuísse valores mais próximos dos obtidos por altimetria por satélite.

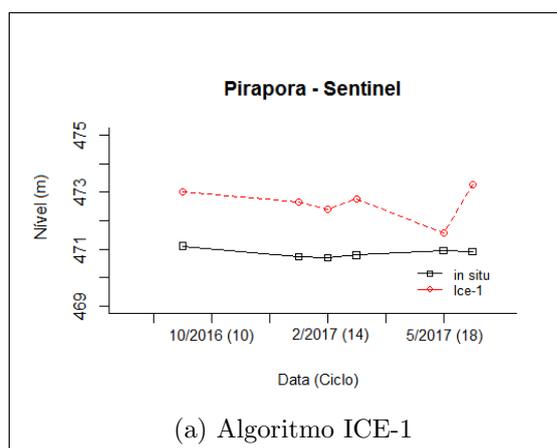


Figura 4.38: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ* na estação virtual de Pirapora com o uso do ICE-1.

Acurácia Intermediária

A EV de Pirapora obteve EMQR de 0,55 m com o uso do ICE-1 que, apesar de não estar no mesmo local da EV criada para os satélites Envisat e Saral, compartilha características físicas semelhantes a sua homônima. A variação do nível da água com o uso da AS e dos dados *in situ* mostra que para os ciclos iniciais as medições por satélite acompanham aquelas realizadas na estação *in situ*, porém após o ciclo 14 o nível por AS passou a variar de forma diferente daquele da EI (Figura 4.38). Além disso, a correlação entre os dados da EI e da EV de Pirapora foi de 0,13 e 0,00 para ICE-1 e RANSAC. Neste caso comprova-se que a altimetria por satélite, com o uso do Sentinel-3A, apesar de ter um EMQR aceitável, não retrata a variação do nível corretamente.

Em Gameleira o EMQR foi de 0,39 m e 0,52 m para ICE-1 e RANSAC, respectivamente. Já em Manga o EMQR foi de 0,53 m, com os dois algoritmos. A EV de Manga compartilha das características de sua homônima, criada para Envisat e Saral, contudo a distância entre a EV e a EI é de ≈ 40 Km. Trata-se de uma das exceções dentro dos critérios de seleção propostos, isso pode ter contribuído para uma superestimação dos erros.

Ao observar os gráficos da Figura 4.39, percebe-se que o nível na EI e EV, com ICE-1 e RANSAC, variaram de forma bastante semelhante. Contribui para comprovar essa situação a correlação que foi de 0,93, tanto com o ICE-1 quanto com o RANSAC. A baixa declividade entre os dois pontos de medição e a manutenção da forma e largura do canal podem ter contribuído para esse resultado.

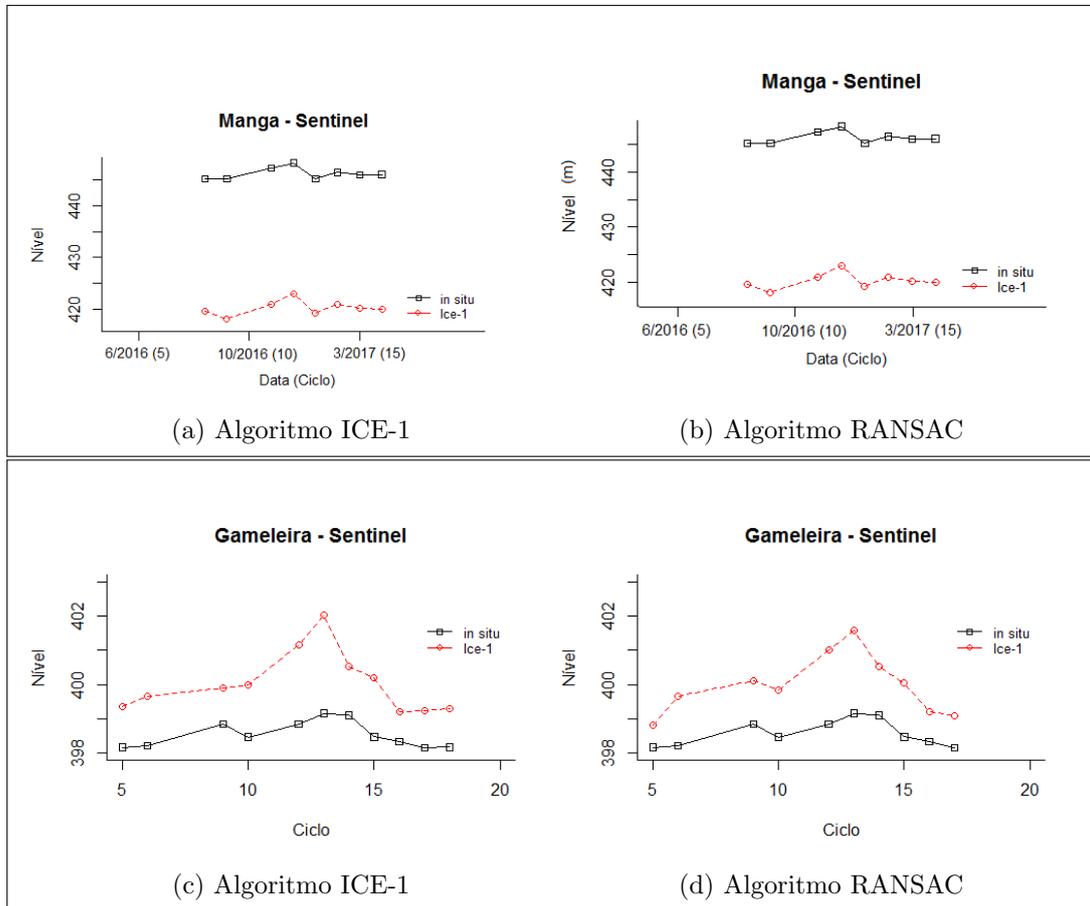


Figura 4.39: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Manga com uso do ICE-1; (b) EV de Manga com uso do RANSAC; (c) EV de Gameleira com uso do ICE-1; (d) EV de Gameleira com uso do RANSAC. Para estação de Gameleira foi inserido um fator de correção para que o nível *in situ* possuísse valores mais próximos dos obtidos pelo satélite.

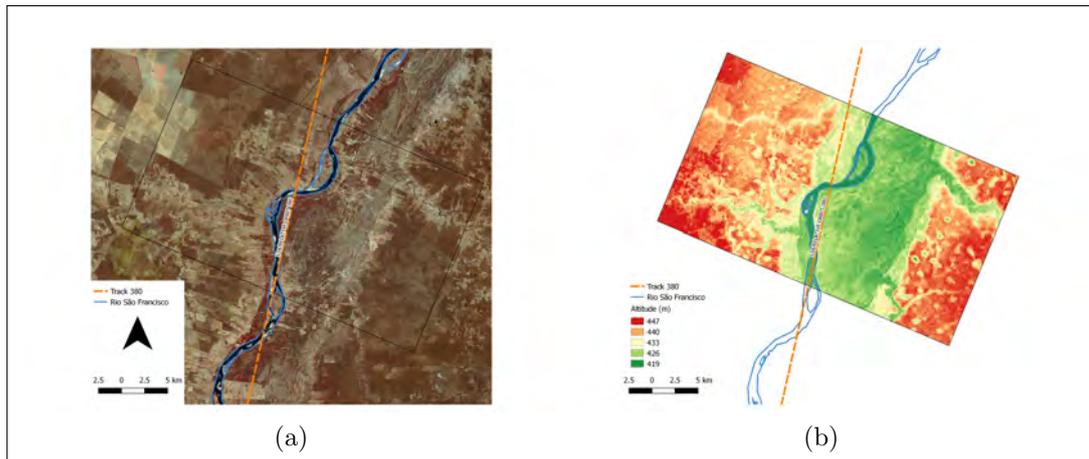


Figura 4.40: Região da Estação Virtual de Gameleira. (a) Imagem Sentinel-2A; (b) altitude baseada em modelo digital de elevação SRTM.

A região da EV de Gameleira é recoberta, predominantemente, por extensas áreas de solo exposto e vegetação muito incipiente, além de possuir grande quantidade de cultivos agrícolas nas margens do RSF e baixa variação altimétrica (Figura 4.40). Essas características colaboraram pra os resultados na ordem dos 0,50 m nesta EV. A correlação dos dados de Gameleira pode ser vista na Tabela 4.5 e as séries temporais na Figura 4.39.

Menor Acurácia

As variações topográficas no trecho do RSF próximo a Pirapora prejudicam o uso da AS. Neste caso o EMQR foi de 1,07 m, menor acurácia obtida com o *retracker* ICE-1. A correlação calculada para o ICE-1 foi de 0,13, o que reforça o mal funcionamento deste *retracker* na região. As baixas correlações são também explicadas pelo baixo número de observações. Apesar disso, a variação dada nas séries temporais mostram que a AS gerou medidas que acompanham a variação de nível da estação *in situ* em quatro dos seis ciclos (Figura 4.41).

Em Orocó o EMQR na EV foi de 1,14 m e 0,88 m com o uso de ICE-1 e RANSAC, respectivamente. Apesar do RSF ter largura superior a dois quilômetros nesta região, o tipo de canal pode prejudicar o uso da AS. Canais anastomosados possuem muitos bancos de areia, podendo gerar interferências no sinal radar. A Figura 4.42 (a e b) mostra que as medidas na EV e EI variam de forma diferente, mesmo com o uso do RANSAC, que trouxe um ganho em acurácia. O resultado da correlação foi de 0,07 e 0,12 com ICE-1 e RANSAC, respectivamente, o que reforça a constatação da impossibilidade de uso do Sentinel-3A nesta EV.

Na EV de Bom Jesus da Lapa o EMQR foi de 0,64 m e 0,65 m, com ICE-1 e

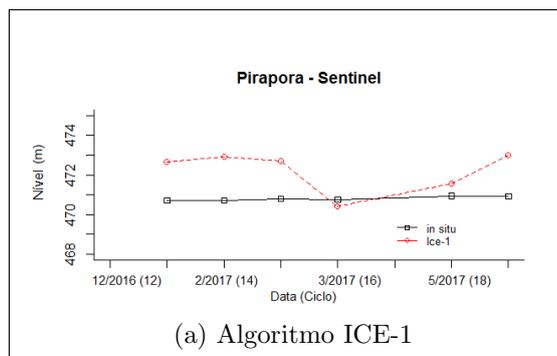


Figura 4.41: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ* na estação virtual (EV) de Pirapora, com o uso do RANSAC.

RANSAC, respectivamente. O RSF tem largura de aproximadamente 360 metros na EV e a região contém duas grandes ilhas fluviais, orientadas quase no mesmo sentido do *track* do satélite. Outros destaques são a lagoa marginal e o rio que deságua no RSF, ambos localizados na margem esquerda. As altitudes na região de entorno estão próximas dos 430 metros (Figura 4.43).

Ao observar os gráficos da Figura 4.42 e a correlação (Tabela 4.5), percebe-se que em Bom Jesus da Lapa o nível na EV, tanto com o ICE-1 quanto com o RANSAC, varia de forma semelhante ao da EI.

Na EV de Paratinga, com o ICE-1, a acurácia foi de 0,84 m e com o RANSAC de 0,83 m. Nesta região o RSF possui uma ilha fluvial e, em sua margem direita há uma grande quantidade de áreas alagadas que correspondem à planície de inundação do rio e sua topografia é suave (Figura 4.44 (a)). A Figura 4.42 mostra que os níveis da AS nas EI e EV são similares e a correlação é de 0,79 e 0,78, com ICE-1 e RANSAC, respectivamente (Tabela 4.5). Apesar de terem acurácia baixa, nessas três EVs o uso da altimetria contribui para o acompanhamento do nível do rio.

Estação Virtual de Pedras de Maria da Cruz

A EV de Pedras de Maria da Cruz não apresentou resultados que pudessem ser testados estatisticamente devido à grande quantidade de falhas do Sentinel-3A na região (Tabela 4.5). Apesar disso, optou-se por manter esta EV no trabalho a fim de explicar as possíveis causas e hipóteses da impossibilidade de se obter medições com o sensor do tipo SAR.

Na Tabela 4.6 são apresentados os erros individuais das medições de nível. Nela é possível observar que, para os ciclos 7, 11, 18 e 22, a diferença relativa entre a medida

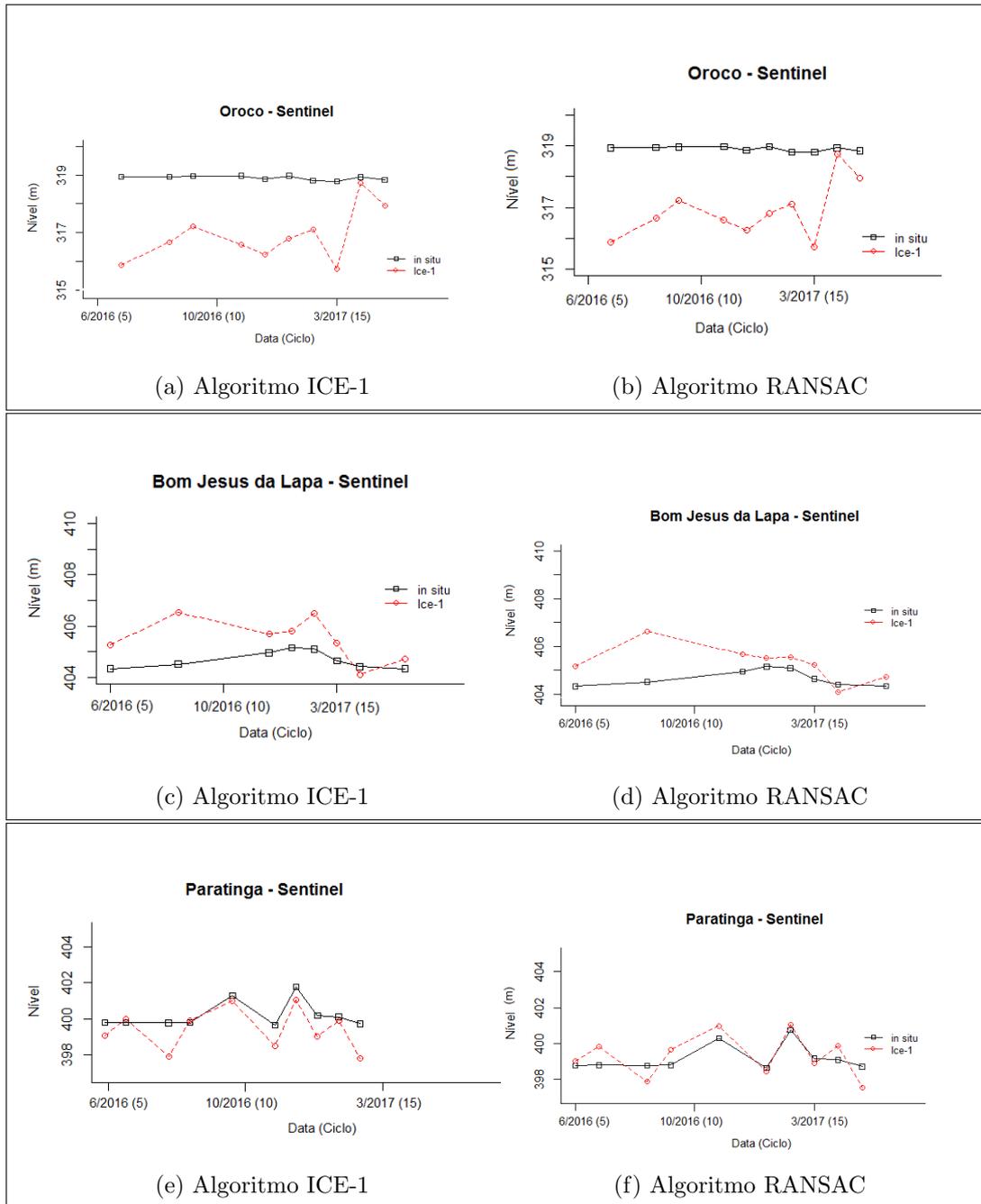


Figura 4.42: Série temporal *in situ* e por altimetria satélite (AS) radar. As séries plotadas contém os níveis de água, a linha tracejada em vermelho corresponde as medidas por AS e a em preto corresponde ao nível *in situ*. (a) Estação virtual (EV) de Orocó com uso do ICE-1; (b) EV de Orocó com uso do RANSAC; (c) EV de Bom Jesus da Lapa com uso do ICE-1; (d) EV de Bom Jesus da Lapa com uso do RANSAC; (e) EV de Paratinga com uso do ICE-1; (f) EV de Paratinga com uso do RANSAC.

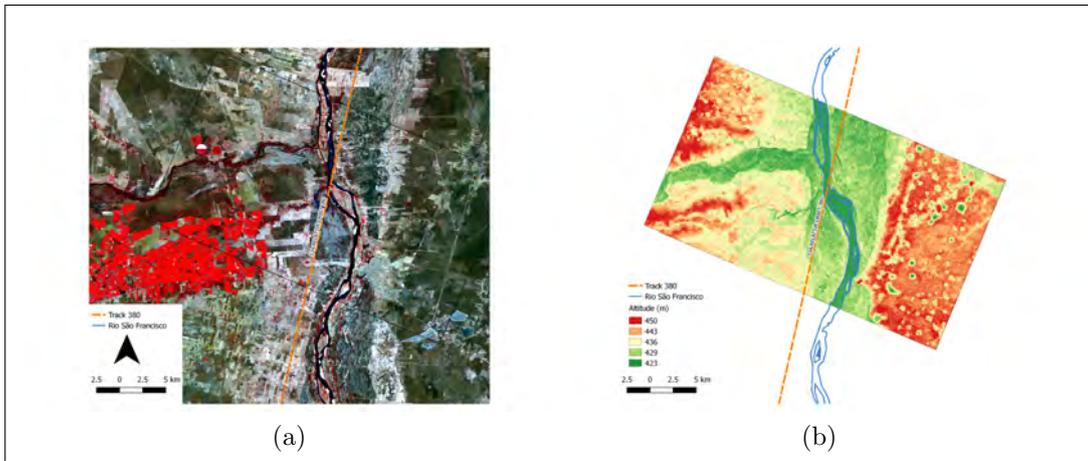


Figura 4.43: Região da Estação Virtual de Bom Jesus da Lapa. (a) Imagem Sentinel-2A; (b) altitude baseada no modelo digital de elevação SRTM.

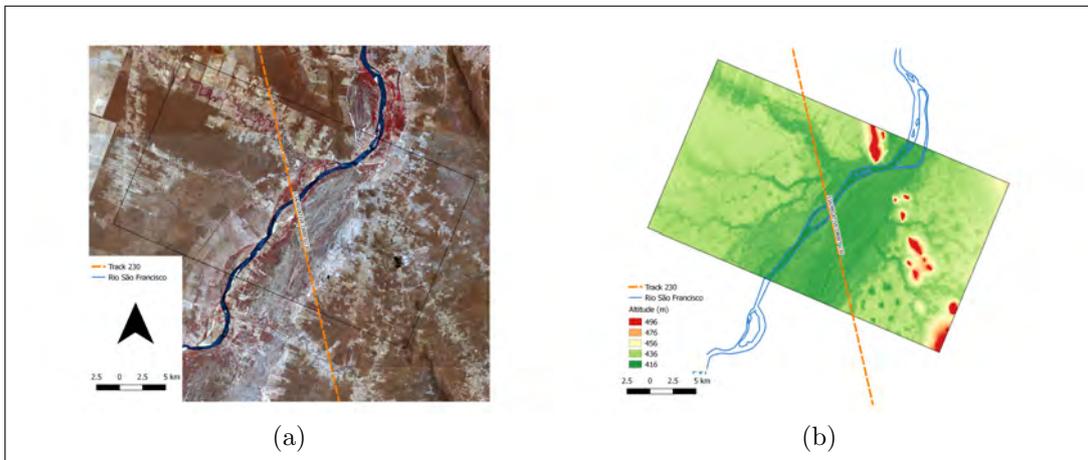


Figura 4.44: Região da Estação Virtual de Paratinga. (a) Imagem Sentinel-2A; (b) altitude baseada no modelo digital de elevação SRTM.

in situ e a obtida por satélite foi superior a 40 metros. Para os outros ciclos presentes na mesma tabela, os erros são muito altos em comparação com os das outras oito EVs. Uma possível explicação para esses resultados pode estar na relação existente entre o modo de funcionamento do Sentinel-3A e a superfície observada.

Tabela 4.6: Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite (AS), com o uso do Sentinel-3A, e as medições *in situ* da estação de Pedras de Maria da Cruz. Os dados estão organizados para cada uma das passagens (datas/ciclos) das medições do satélite.

| Ano | Dia Juliano | Traço | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x AS |
|------|-------------|-------|-------|-------------------------------|
| 2016 | 189 | 116 | 6 | 4,58055 |
| 2016 | 216 | 116 | 7 | -44,47335 |
| 2016 | 243 | 116 | 8 | 1,86545 |
| 2016 | 270 | 116 | 9 | 8,66115 |
| 2016 | 324 | 116 | 11 | -45,73045 |
| 2016 | 351 | 116 | 12 | -5,15545 |
| 2017 | 93 | 116 | 16 | 6,90915 |
| 2017 | 147 | 116 | 18 | -46,44935 |
| 2017 | 201 | 116 | 20 | 14,22935 |
| 2017 | 255 | 116 | 22 | -46,71905 |

Durante visita de campo na região de Pedras de Maria da Cruz constatou-se que existe um desnível de aproximadamente 50 metros entre o RSF e a área superior da margem esquerda. Na Figura 4.45 têm-se duas fotografias obtidas a partir desta margem e a imagem do satélite Sentinel-2A, na qual está sobreposto o *track* ascendente do Sentinel-3A. Apesar da Figura 4.45 não possuir uma referência de escala, é perceptível a diferença de altura em relação à calha principal do rio. O perfil topográfico gerado a partir do modelo digital SRTM, mesmo com resolução espacial insuficiente para a escala de medição do sensor altimétrico, nos permite perceber o quanto a margem esquerda do rio é inclinada (Figura 4.46).

O mau funcionamento do Sentinel-3A está no modo de operação de seu sensor, que é do tipo SAR. Ele emite e recebe um conjunto de medições e, através de processamentos, busca a redução do *footprint* a partir do efeito *doppler*, medido no sentido de deslocamento do satélite (Egido e Smith, 2017; Raney, 1998). Devido à presença de um desnível muito grande entre a calha do rio e sua margem, a média dos retornos vindos da superfície pode conter valores muito diferentes, entre um pulso e outro, o que gera medições como as apresentadas na Tabela 4.6. Em regiões como a de Pedras de Maria da Cruz o *tracker* do satélite parece não acompanhar a variação topográfica de maneira eficiente.

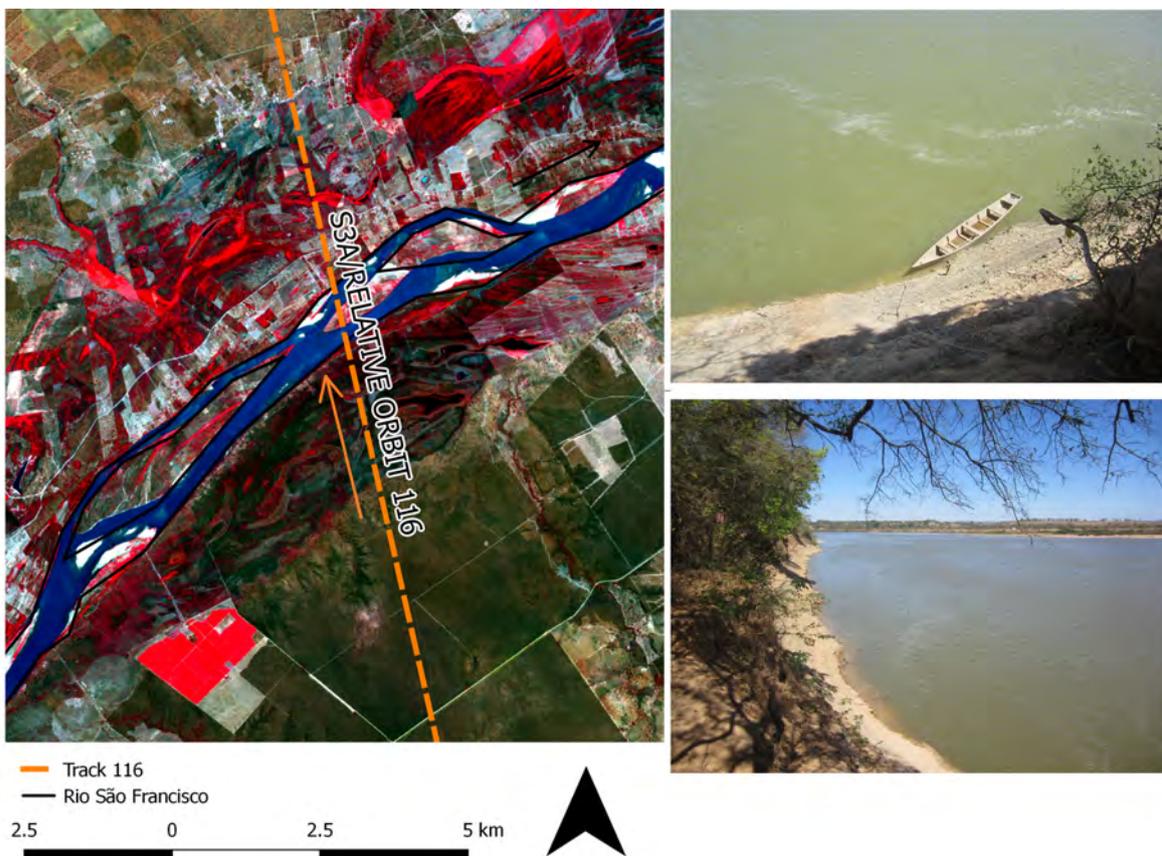


Figura 4.45: *Track* do Sentinel-3A e o desnível da margem em relação ao rio. A imagem Sentinel-2A, em falsa cor (lado esquerdo) é da região de Pedras de Maria da Cruz. A linha alaranjada é o *track* 116, ascendente. As fotografias são da margem esquerda do RSF, próximo ao cruzamento entre ele e o *track*.

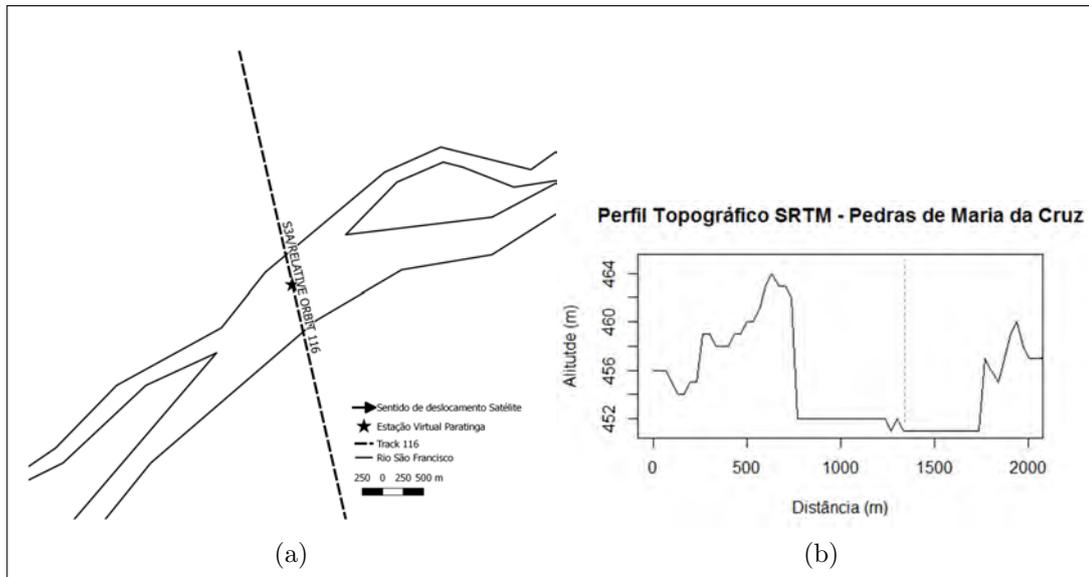


Figura 4.46: Estação virtual de Pedras de Maria da Cruz. (a) a linha tracejada é o *track* nominal 116 do Sentinel-3A, que é ascendente. Em (b) está o perfil topográfico gerado a partir do modelo digital de elevação SRTM de 1-Arc-Sec no alinhamento e sentido do *track* nominal.

4.3 Discussão comparativa entre os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A

Nas figuras 4.47 e 4.48 está representado o EMQR nas EVs em que há medidas de nível de pelo menos dois dos três satélites. Com o uso do ICE-1, o EMQR foi menor para o Envisat que para o Saral em oito das estações criadas, enquanto que o Saral foi melhor em apenas três dessas EVs. A acurácia do Sentinel-3A ficou entre as do Saral e do Envisat, em três estações obteve melhores resultados que o Saral e em uma das EVs foi melhor que o Envisat.

Na comparação entre Envisat e Saral o primeiro foi mais acurado em quatro das EVs, com o uso do RANSAC (Figura 4.48). Na comparação com o Sentinel-3A, o Envisat teve menor EMQR em três EVs. Saral e Sentinel-3A tiveram resultado igual em uma das EVs, em uma delas o Sentinel-3A foi mais acurado enquanto que o Saral foi melhor em duas delas.

O EMQR calculado, com uso do ICE-1 e do RANSAC, para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A em cada uma das EVs criadas estão registrados na Tabela 4.7. As EVs criadas para o Sentinel-3A, em alguns casos, têm o mesmo nome das EVs dos outros dois satélites, contudo não estão localizadas na mesma posição no rio, à exceção da EV de Orocó.

Os erros de medição encontrados com o uso do Envisat são compatíveis com os

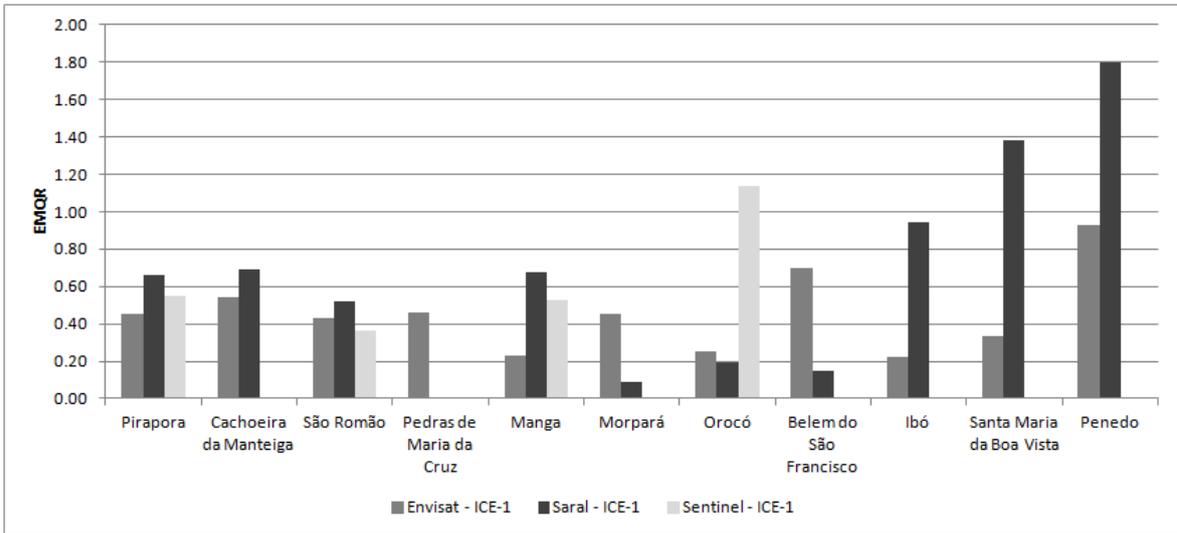


Figura 4.47: Gráfico do Erro Médio Quadrático Relativo nas estações virtuais para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A com uso do algoritmo ICE-1.

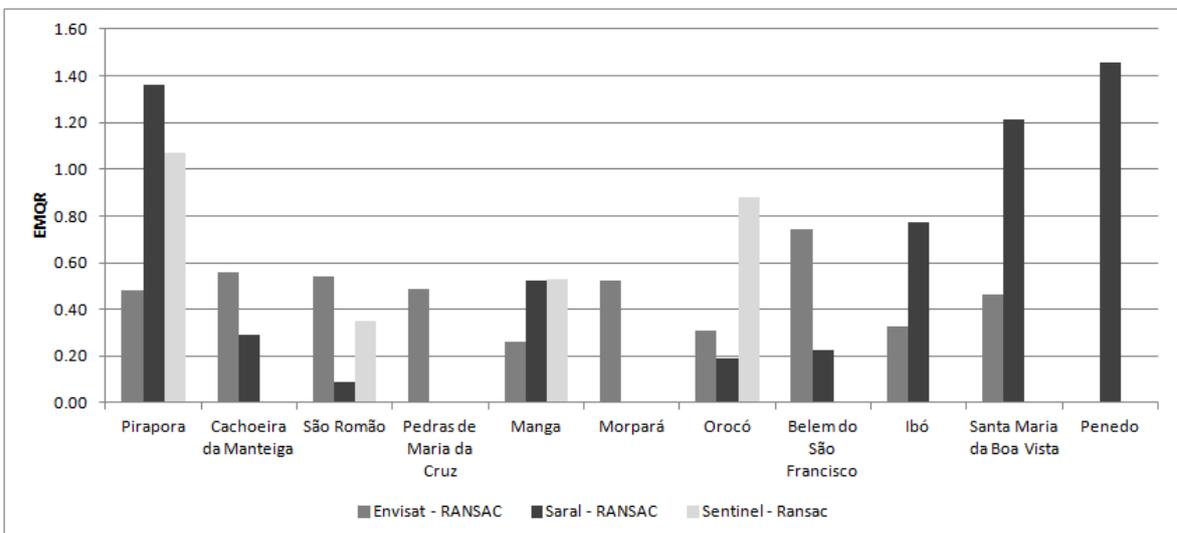


Figura 4.48: Gráfico do Erro Médio Quadrático Relativo nas estações virtuais para os satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A com uso do algoritmo RANSAC.

Tabela 4.7: Erro Médio Quadrático (EMQR) e o número de medições (N) realizadas com cada um dos satélites nas estações virtuais criadas. Resultados para ICE-1 e RANSAC.

| Estação | Envisat - EMQR(N%) | | Saral - EMQR(N%) | | Sentinel-3A - EMQR(N%) | |
|------------------------------|--------------------|------------|------------------|------------|------------------------|------------|
| | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC |
| Iguatama* | 1,09 (79%) | 1,16 (67%) | - | - | - | - |
| Pirapora* | 0,45 (43%) | 0,48 (30%) | 0,66 (22%) | 1,36 (14%) | 0,55 (33%) | 1,07 (33%) |
| São Romão* | 0,43 (74%) | 0,54 (72%) | 0,52 (42%) | 0,09 (33%) | 0,36 (55%) | 0,35 (55%) |
| Pedras de Maria da Cruz* | 0,46 (72%) | 0,49 (43%) | - | - | - | - |
| Manga* | 0,23 (85%) | 0,26 (75%) | 0,68 (19%) | 0,52 (16%) | 0,53 (44%) | 0,53 (44%) |
| Orocó† | 0,25 (89%) | 0,31 (74%) | 0,19 (16%) | 0,18 (16%) | 1,14 (61%) | 0,88 (55%) |
| Morpará* | 0,46 (83%) | 0,52 (72%) | 0,09 (17%) | - | - | - |
| Cachoeira da Manteiga* | 0,54 (75%) | 0,56 (60%) | 0,69 (55%) | 0,29 (36%) | - | - |
| Belém do São Francisco* | 0,70 (68%) | 0,74 (62%) | 0,14 (22%) | 0,23 (14%) | - | - |
| Ibó* | 0,22 (51%) | 0,32 (43%) | 0,94 (19%) | 0,77 (19%) | - | - |
| Santa Maria da Boa Vista* | 0,33 (85%) | 0,46 (72%) | 1,38 (28%) | 1,21 (16%) | - | - |
| Penedo* | 0,93 (52%) | - | 1,80 (16%) | 1,46 (14%) | - | - |
| Gameleira● | - | - | - | - | 0,39 (55%) | 0,52 (55%) |
| Bom Jesus da Lapa● | - | - | - | - | 0,64 (44%) | 0,65 (44%) |
| Paratinga● | - | - | - | - | 0,84 (55%) | 0,83 (55%) |
| Barra● | - | - | - | - | 0,32 (33%) | 0,26 (28%) |

* Estações Virtuais (EVs) criadas a partir dos satélites Envisat e Saral

● EVs criadas a partir do satélite Sentinel-3A

★ EVs criadas para os três satélites, mas a do Sentinel-3A não possui a mesma localização espacial

† EV criada para os três satélites na mesma posição no rio

obtidos em outros trabalhos que fizeram uso do mesmo sensor para rios de porte semelhante ao do RSF e até mesmo para rios de largura superior (Frappart *et al.*, 2006; da Silva *et al.*, 2010; Michailovsky *et al.*, 2012; Sulistioadi *et al.*, 2014). Isso reforça o potencial da altimetria radar na medição do nível em rios de pequeno e médio porte com o uso do Envisat. O maior destaque em relação aos outros dois satélites está em sua estabilidade, comprovada pela quantidade de dados gerados de maneira sistemática durante seu longo tempo de operação.

Os melhores resultados com o uso do Saral foram obtidos nas EVs de Morpará, que obteve EMQR de 0,09 m com o ICE-1 e Orocó, que obteve EMQR de 0,13 m com o RANSAC. Assim como os resultados obtidos com o Envisat, estes também foram condizentes com os obtidos em outros trabalhos (Maillard *et al.*, 2015; Schwatke *et al.*, 2015; Dubey *et al.*, 2015). O maior problema do Saral está na sua baixa estabilidade, que gerou grande perda de dados em seu período de operação (Tabela 4.7).

Com o satélite Sentinel-3A o EMQR médio foi de 0,59 m e 0,63 m para ICE-1 e RANSAC, respectivamente. Sua maior precisão foi registrada nas estações de Barra, em que o EMQR foi de 0,26 m com uso do RANSAC e em São Romão, na qual o EMQR foi de 0,35 m. A quantidade de medições aproveitadas é semelhante a do Saral, isso porque o Sentinel-3A entrou em operação recentemente⁷. A pequena quantidade de medidas está relacionado, também, com o tempo necessário para a ANA disponibilizar os dados *in situ* no portal Hidroweb. O tempo gasto entre a leitura e a publicação dos dados é de aproximadamente três meses, o que inviabilizou o uso dos dados mais atuais do satélite devido a impossibilidade de validação.

A EV de Orocó é ideal para a comparação dos resultados obtidos pelos três sensores devido a coincidência de localização de suas EVs, que estão separadas por poucos metros (Figura 4.49). O EMQR com a utilização do ICE-1 foi de 0,25 m, 0,19 m e 1,18 m, para Envisat, Saral e Sentinel-3A e com o RANSAC, foi de 0,31 m, 0,18 m, 0,88 m, respectivamente (Tabela 4.7).

Devido à largura do RSF, tanto as medidas feitas com o Envisat quanto com o Saral foram precisas diante desta tecnologia, com erros inferiores aos 30 cm. Com o Sentinel-3A a precisão ficou em torno de um metro. O principal fator para obtenção de medidas não foi o comprimento de onda dos sensores, relacionado ao *footprint*, e sim o modo de operação dos satélites. Os sensores que utilizam o modo LRM (Envisat e Saral) tiveram boa precisão, enquanto que o Sentinel-3A, que opera no modo SAR, foi pouco preciso. Possivelmente a grande inclinação da margem do RSF nesta EV.

Outras estações virtuais também foram avaliadas em relação à topografia das mar-

⁷Apenas 22 ciclos do Sentinel-3A estavam disponíveis no momento da realização deste trabalho. Para saber mais sobre o lançamento do Satélite Sentinel-3A acesse: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/SENTINEL_3/Third_SENTINEL_satellite_launched_for_Copernicus. Acessado em 23/11/2017.

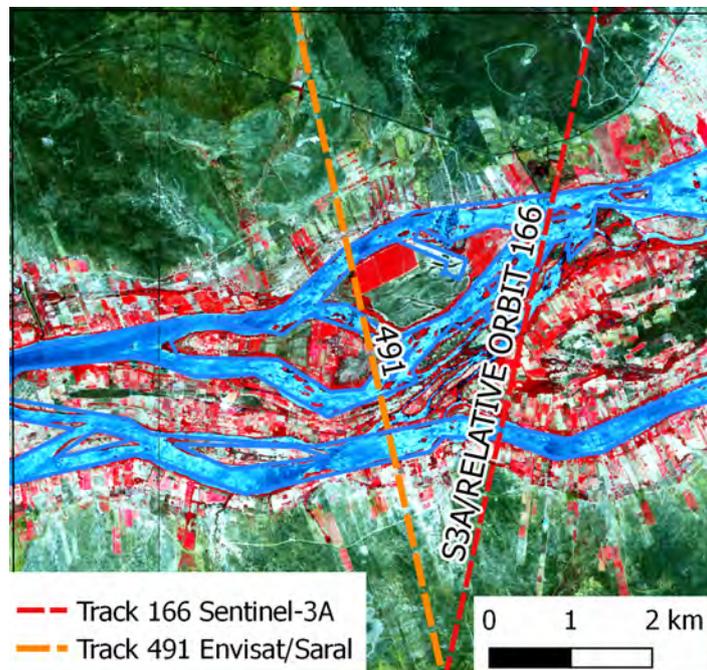


Figura 4.49: Os *tracks* dos satélite Envisat/Saral e Sentinel-3A estão sobrepostos a imagem RapidEye em composição falsa cor na EV de Oroco.

Tabela 4.8: Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite (AS), com o uso do Sentinel-3A, e as medições *in situ* na estação de Oroco. Os dados estão organizados para cada uma das passagens (datas/ciclos) das medições utilizadas do satélite.

| Ano | Dia Juliano | Traço | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x AS |
|------|-------------|-------|-------|-------------------------------|
| 2016 | 190 | 130 | 6 | -0,5765 |
| 2016 | 244 | 130 | 8 | -0,7376 |
| 2016 | 271 | 130 | 9 | 0,1544 |
| 2016 | 325 | 130 | 11 | -0,4948 |
| 2016 | 352 | 130 | 12 | -0,2151 |
| 2017 | 13 | 130 | 13 | -0,045 |
| 2017 | 40 | 130 | 14 | 0,4368 |
| 2017 | 67 | 130 | 15 | -0,7849 |
| 2017 | 94 | 130 | 16 | 2,1314 |
| 2017 | 121 | 130 | 17 | 1,2405 |
| 2017 | 148 | 130 | 18 | 2,518 |

gens, a fim de verificar se a declividade das mesmas possui ou não influência na precisão dos dados obtidos pelo Sentinel-3A.

Influência Topográfica

O algoritmo de *tracker* dos satélites é o responsável por acompanhar a variação topográfica da superfície. Através dele é feita a estimativa da janela de gravação dos dados, que é o tempo previsto para os sinais enviados retornarem ao satélite. A variação máxima de altitude registrada em uma janela de gravação, a partir do *tracker* de referência, é de 64 m e 50 m para Envisat e Saral, respectivamente (Baker *et al.*, 2002; Bronner *et al.*, 2013).

Nos caso de falha na estimativa por parte do *tracker*, os sinais podem retornar antes ou depois do tempo previsto, o que causa perda de respostas vindas da superfície. Isso acontece, principalmente, devido a variações bruscas da topografia. No caso do Saral a janela de gravação é menor, consequência de sua maior frequência e as perdas dos retornos são mais recorrentes que no Envisat, já que sua sensibilidade à variação topográfica é maior (Biancamaria *et al.*, 2017). Apesar de sofrerem influência da topografia, Envisat e Saral são menos sensíveis às suas variações do que o satélite Sentinel-3A.

A sensibilidade do Sentinel-3A causou aumento dos erros de medição e, por vezes, a completa perda do sinal radar. Essa sensibilidade não está relacionada ao tamanho da janela de gravação, que é de 60 m para o Sentinel-3A, mas sim aos processamentos feitos a partir do efeito *doppler*, o que reduz a resolução no sentido de deslocamento do satélite.

Na EV de Paratinga, criada para o satélite Sentinel-3A, foi feita a associação entre o *tracker* e a topografia das margens do rio, no sentido de deslocamento do satélite. Como o satélite se desloca em direção à margem do rio, que tem alta declividade, as respostas retornadas ao sensor e processadas a partir do efeito *doppler* têm um *range* muito alto dentro da célula de resolução, o que pode ter contribuído para os erros de estimativa das altitudes. O EMQR nesta EV foi de 0,84 m e 0,83 m com ICE-1 e RANSAC, respectivamente (Tabela 4.5) e os erros brutos são altos (Tabela 4.9). O perfil topográfico mostra que há uma diferença altimétrica relativamente grande entre o leito do rio e suas margens e, também, na sua interface com a ilha fluvial presente em seu canal (Figura 4.50).

Diferente do que acontece em Orocó e Paratinga, a topografia na EV de Barra é mais suave. Nesta o EMQR foi de 0,32 m e 0,26 m com ICE-1 e RANSAC, respectivamente. O perfil topográfico construído no sentido de deslocamento do satélite mostra que a margem direita do RSF tem topografia mais suave, o que contribuiu para os bons

Tabela 4.9: Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite (AS) e as medições *in situ* da estação de Paratinga, com uso do Sentinel-3A. Os dados estão organizados para cada uma das passagens (datas/ciclos) do satélite.

| Ano | Dia Juliano | Traço | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x AS |
|------------|--------------------|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 2016 | 170 | 230 | 5 | -0,3115 |
| 2016 | 197 | 230 | 6 | 0,4702 |
| 2016 | 251 | 230 | 8 | -1,438 |
| 2016 | 278 | 230 | 9 | 0,3315 |
| 2016 | 332 | 230 | 11 | 0,1426 |
| 2017 | 20 | 230 | 13 | -0,7762 |
| 2017 | 47 | 230 | 14 | -0,2819 |
| 2017 | 74 | 230 | 15 | -0,8375 |
| 2017 | 101 | 230 | 16 | 0,2141 |
| 2017 | 128 | 230 | 17 | -1,7428 |

resultados apresentados nesta estação (Figura 4.51). A Tabela 4.10 apresenta, em negrito, resultados bastante precisos para alguns ciclos na EV de Barra.

Tabela 4.10: Diferença entre as medidas obtidas por altimetria radar satélite (AS), com o uso do Sentinel-3A, e as medições *in situ* da estação de Barra. Os dados estão organizados para cada uma das passagens (datas/ciclos) do satélite.

| Ano | Dia Juliano | Traço | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x AS |
|------------|--------------------|--------------|--------------|--------------------------------------|
| 2016 | 180 | 380 | 5 | 0,4003 |
| 2016 | 207 | 380 | 6 | -0,0797 |
| 2016 | 261 | 380 | 8 | 0,0603 |
| 2016 | 315 | 380 | 10 | -0,4177 |
| 2017 | 138 | 380 | 17 | -0,055 |

Em relação a outras características, como forma do canal, presença de ilhas fluviais, entre outros, Barra é bastante semelhante às EVs de Orocó e Paratinga. A diferença marcante entre elas é a inclinação das margens do RSF, por isso pode-se afirmar que a topografia das margens é o fator limitante ao uso da altimetria no modo de operação SAR.

Diferença dos resultados obtidos com Envisat, Saral e Sentinel-3A

Os três satélites utilizados neste trabalho foram comparados entre si a partir dos resultados obtidos com ICE-1 e RANSAC. Como as EVs do Sentinel-3A não têm a mesma localização que as do Envisat e Saral, optou-se por utilizar os resultados das quatro EVs que receberam o mesmo nome para os três satélites que são: Pirapora, São Romão, Manga e Orocó⁸ (Tabela 4.11). Já a comparação entre Envisat e Saral pôde ser feita

⁸A estação virtual de Orocó é a única que possui a mesma localização para os três satélites

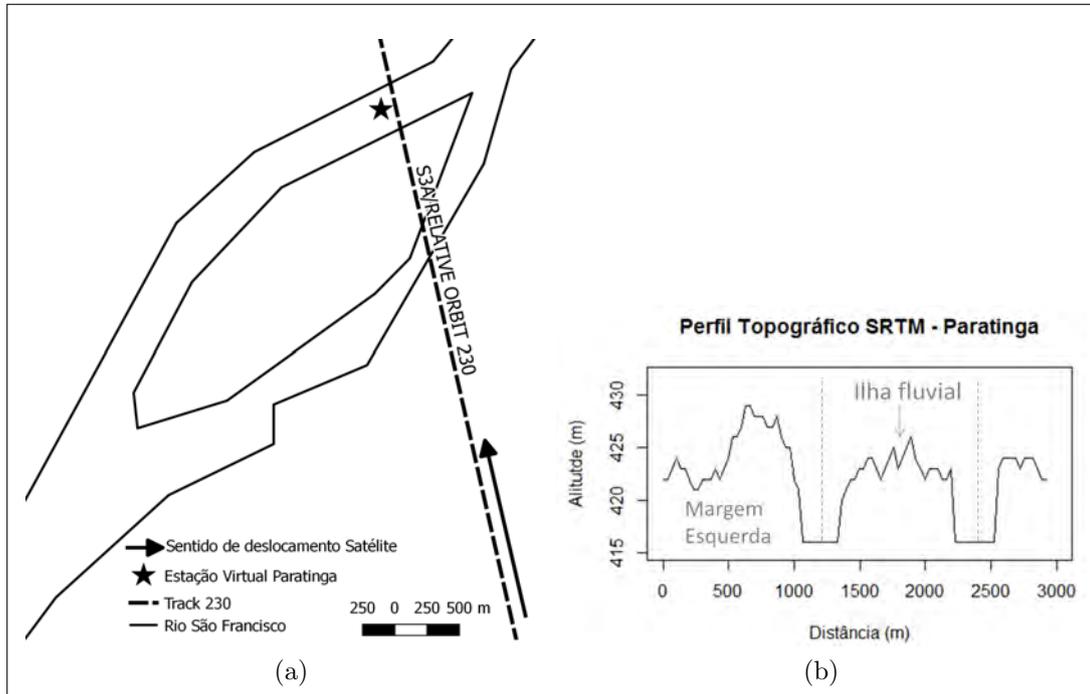


Figura 4.50: Estação virtual de Paratinga. (a) a linha tracejada é o *track* nominal 230 do Sentinel-3A, que é ascendente. Em (b) está o perfil topográfico gerado a partir do modelo digital SRTM de 1-Arc-Sec no alinhamento e sentido do *track* nominal.

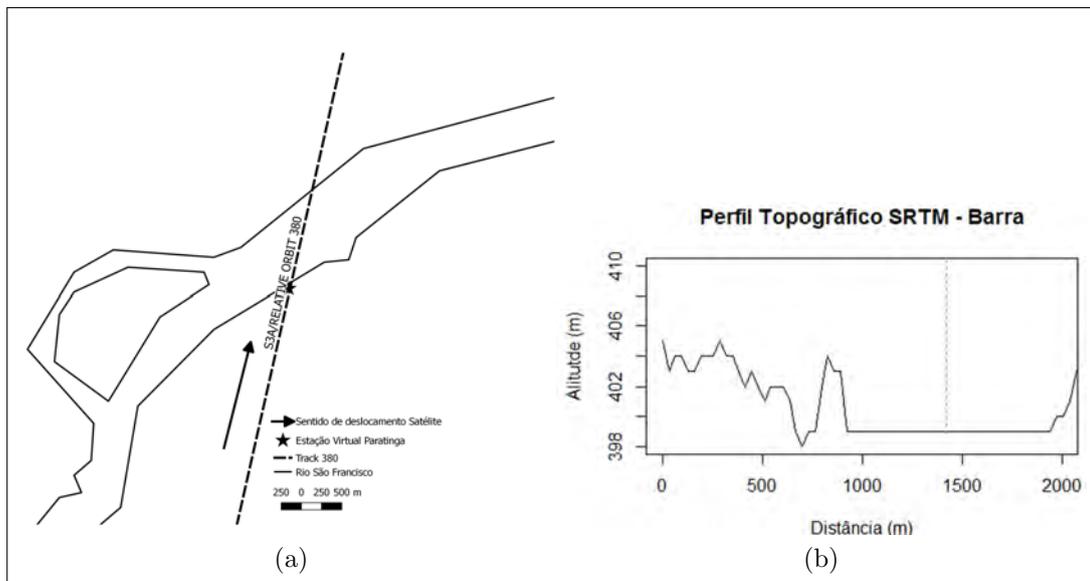


Figura 4.51: Estação virtual de Barra. (a) a linha tracejada é o *track* nominal 380 do Sentinel-3A, que é ascendente. Em (b) está o perfil topográfico gerado a partir do modelo digital de elevação SRTM de 1-Arc-Sec no alinhamento e sentido do *track* nominal.

Tabela 4.11: Diferença entre o Erro Médio Quadrático (EMQR) calculado para os três satélites nas estações virtuais criadas. O resultado dos três satélites foram comparados entre si tanto com o uso do ICE-1 quanto com o RANSAC.

| Estação | SaralxEnvisat ^{††} | | SaralxSentinel-3A ^{††} | | EnvisatxSentinel-3A [‡] | |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------|--------|----------------------------------|--------|
| | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC |
| Pirapora [*] | 0,21 | 0,88 | 0,11 | 0,29 | 0,10 | 0,59 |
| Cachoeira da Manteiga [*] | 0,15 | -0,27 | - | - | - | - |
| São Romão [*] | 0,09 | -0,45 | 0,16 | -0,26 | -0,07 | -0,19 |
| Manga [*] | 0,44 | 0,26 | 0,15 | -0,01 | 0,30 | 0,27 |
| Morpará [*] | -0,37 | - | - | - | - | - |
| Orocó [†] | -0,06 | -0,13 | -0,95 | -0,70 | 0,89 | 0,57 |
| Belém do São Francisco [*] | - | - | - | - | - | - |
| Ibó [*] | 0,72 | 0,45 | - | - | - | - |
| Santa Maria da Boa Vista [*] | 1,05 | 0,75 | - | - | - | - |
| Penedo [*] | 0,87 | - | - | - | - | - |

^{††} Valores negativos indicam que o Saral foi mais preciso

[‡] Valores negativos indicam que o Sentinel-3A foi mais preciso

* Estações Virtuais (EV) criadas a partir dos satélites Envisat e Saral

^{*} EV criadas para os três satélites, mas a do Sentinel-3A não possui a mesma localização espacial

[†] EV criada para os três satélites e que estão na mesma posição no rio

para todas as EVs em comum por ocuparem o mesmo lugar no espaço.

Para as quatro EVs comuns aos três satélites, com o uso do *retracker* ICE-1, o Saral obteve maior acurácia que o Sentinel-3A somente na EV de Orocó (0,95 m). Nas EVs de Pirapora, São Romão e Manga o Sentinel-3A obteve valores 0,11 m, 0,16 m e 0,15 m mais acurados, respectivamente. Já com o RANSAC, o Saral obteve melhores resultados em três das quatro EVs, porém em Manga ele foi apenas 0,01 m mais acurado. Esse valor não é significativo, pois está abaixo da precisão dos instrumentos, que é de $\approx 0,035$ m.

Nas estações de São Romão e Orocó a diferença entre Saral e Seintinel-3A foi de 0,26 m e 0,70 m, valores estes que conferem ao Saral uma melhor performance em relação ao Sentinel-3A. Em Pirapora, o RANSAC resultou em medidas 0,29 m mais acuradas para o Sentinel-3A do que para o Saral. Estes resultados permitem dizer que o RANSAC foi mais eficiente para o Saral do que para o Sentinel-3A e que o *retracker* ICE-1 foi melhor para os dados do Sentinel-3A.

Na comparação entre Envisat e Sentinel-3A, o primeiro foi mais acurado nas EVs de Pirapora, Manga e Orocó, tanto com o ICE-1 quanto com o RANSAC (Tabela 4.11). Ao utilizar o *retracker* ICE-1 nas EVs de Manga e Orocó, o Envisat foi 0,30 m e 0,89 m

melhor que o Sentinel-3A, respectivamente. Em Pirapora, também com o ICE-1, a superioridade do Envisat foi de 0,10 m. Com o uso do RANSAC a diferença entre as medições em Pirapora, Manga e Orocó foram de 0,59 m, 0,27 m e 0,57 m, respectivamente. Ao utilizar o RANSAC a diferença da acurácia entre Envisat e Sentinel-3A foi reduzida nas EVs de Manga e Orocó, mas não o suficiente para que o Sentinel-3A obtivesse medidas mais acuradas.

Na comparação entre Saral e Envisat, o primeiro foi mais acurado em 30% das estações, com uso do ICE-1 e em 40%, com o uso do RANSAC (Tabela 4.11). Nas EVs de Morpará, Orocó e Belém do São Francisco o Saral foi 0,37 m, 0,06 m e 0,55 m mais acurado que o Envisat com o uso do ICE-1. Já com o Envisat, com o mesmo algoritmo, a acurácia foi melhor que aquela do Saral em Pirapora, Cachoeira da Manteiga, São Romão, Manga, Ibó, Santa Maria da Boa Vista e Penedo, o que mostra a superioridade do Envisat em relação ao Saral com o uso do *retracker* ICE-1.

Com o RANSAC, o Saral foi melhor que o Envisat em Cachoeira da Manteiga, São Romão, Orocó e Belém do São Francisco com acurácias 0,27 m, 0,45 m, 0,13 m e 0,51 m melhores que as do Envisat, respectivamente. Já nas EVs de Pirapora, Manga, Ibó e Santa Maria da Boa Vista os resultados do Saral foram piores que os do Envisat 0,88 m, 0,26 m, 0,45 m e 0,75 m, respectivamente. Dessa forma, apesar da melhoria da acurácia dos dados com o uso do RANSAC para o satélite Saral, o Envisat foi mais eficiente em metade das EVs.

A melhor precisão do Saral nas EVs de Morpará, Orocó e Belém do São Francisco (Tabela 4.11) está relacionada ao seu sensor que opera na banda Ka, enquanto que o Envisat e o Sentinel-3A operam na banda Ku. Uma consequência disso é a mudança da largura de banda da antena, que no Envisat varia entre 30, 80 e 320 Mhz⁹. No Saral esse valor é fixado em 480 Mhz, valor superior ao mais comumente utilizado no Envisat (320 Mhz), o que gerou um aumento da resolução espacial do satélite (Rémy *et al.*, 1999; Phalippou *et al.*, 1999; Schwatke *et al.*, 2015).

A área *do footprint* na banda Ka é cerca de dez vezes menor que a gerada com a banda Ku, o que contribui na redução das respostas vindas de outras superfícies que não são água. Outra consequência é que, ao longo do *track* do satélite, o número de medições é cerca de duas vezes maior para o Saral quando comparado ao Envisat e ao Sentinel-3A (Blarel *et al.*, 2016), como pode ser visto na Figura 4.52. Como o número de amostras para uma mesma seção do rio é maior para o Saral, a precisão das medidas extraídas a partir do conjunto de pontos é, em tese, maior que aquela encontrada para Envisat e Sentinel-3A. Ressalva-se que este último opera no modo SAR, assim, a análise em relação à precisão pode ter explicações que vão além da abordagem deste trabalho,

⁹A frequência nas EVs criadas neste trabalho é a de 320 Mhz. Essa escolha é feita de forma automática através do algoritmo de *tracker*

que levou em consideração a banda de operação e a distância entre os pontos ao longo do *track*.

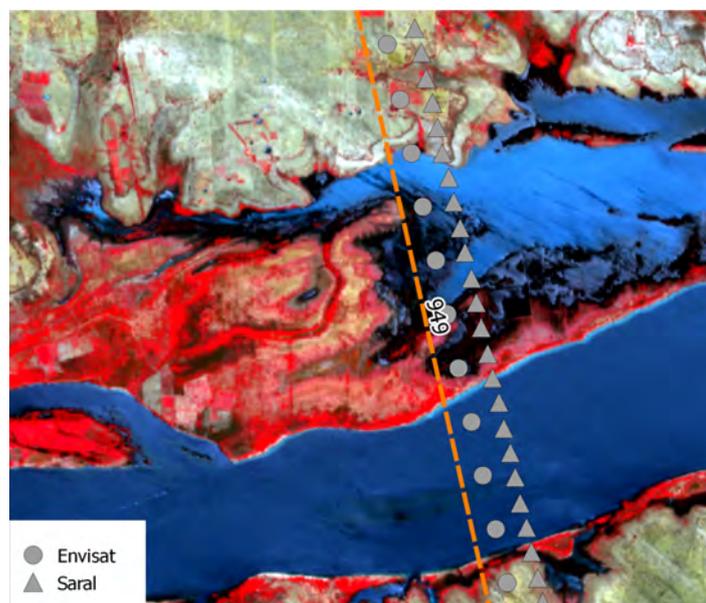


Figura 4.52: Pontos extraídos com o uso do Saral (triângulos) e com o Envisat (círculos), observa-se que a quantidade de pontos sobre a água com o uso do Saral é superior a do Envisat.

Deslocamento de órbita - Problemas Operacionais

O satélite Saral passou por problemas operacionais que geraram deslocamentos excessivos de suas órbitas durante o tempo de operação, o que comprometeu seus resultados em grande parte das EVs. Os satélites Envisat e Sentinel-3A mantiveram o deslocamento dentro do esperado.

A oscilação de cerca de um quilômetro em relação ao *track* nominal é esperada para o satélite Saral (Richard *et al.*, 2008). Porém, em Manga o satélite passou por deslocamentos de até 10 quilômetros em várias datas/ciclos (Figura 4.53). Esse tipo de situação gerou medições de nível em regiões diferentes e, por vezes, perda do sinal retornado ao satélite.

O deslocamento da órbita detectado para a estação de Manga pode ser explicado por falhas de funcionamento do satélite relacionados falhas em mecanismos internos. Tais problemas foram reportados aos usuários cadastrados no portal Aviso+ através de correio eletrônico, o qual também informou que o Saral encerrou sua operação com o uso das órbitas nominais devido à impossibilidade de restabelecimento das mesmas¹⁰.

¹⁰Os problemas de operação foram reportados aos usuários cadastrados no portal: www.aviso.altimetry.fr

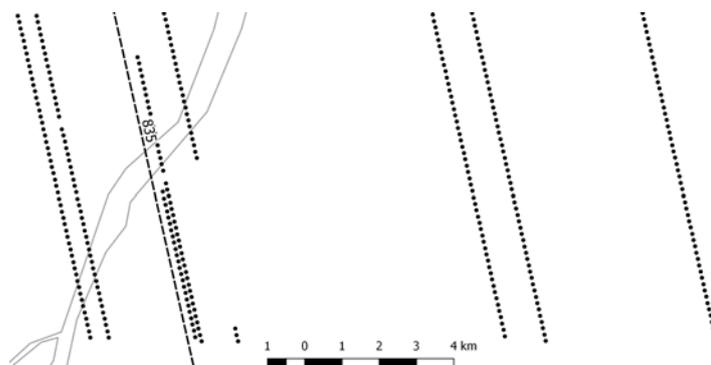


Figura 4.53: Na imagem estão representados alguns dos ciclos do satélite Saral próximos a estação virtual de Manga. Cada alinhamento de pontos pretos representa um ciclo e a linha tracejada é o *track* nominal. Em alguns casos a distância entre o *track* nominal e os pontos extraídos é superior a quatro quilômetros.

Um exemplo comparativo entre os dados extraídos para Saral e Envisat, em termos de deslocamento da órbita, pode ser visto na Figura 4.54. Na EV de Belém do São Francisco os pontos obtidos por altimetria para os dois sensores estão a uma distância próxima de um quilômetro em relação ao *track* nominal. Por outro lado, ao observar a extração realizada para a EV de Santa Maria da Boa Vista, percebe-se que para o Envisat a distância em relação ao *track* 276 está dentro do esperado, mas para o Saral apresentou problema semelhante ao registrado em Manga, com deslocamentos superiores a 10 quilômetros e falhas ao longo do *track*.

Nivelamento das Estações *in situ* - Erro Médio Quadrático Relativo e Absoluto

Nos locais em que há nivelamento global das referências de nível foi possível realizar o ajuste das régua limnimétrica em relação ao elipsoide de referência. Assim, os dados *in situ* e os de AS puderam ser comparados de maneira direta. No caso das estações de São Romão e Cachoeira da Manteiga o nivelamento foi feito pela CPRM. Na EI de Pedras de Maria da Cruz o nivelamento geométrico foi realizado em um trabalho de campo durante a execução desta pesquisa. Para isso foram utilizados receptores GPS L1/L2. Isso viabilizou o nivelamento global (RNG) desta EV, semelhante ao que foi feito pela CPRM para as outras EVs citadas (Figura 4.55).

A comparação com o uso da RNG foi feita apenas para os dados gerados com os satélites Envisat e Saral, pois para o Sentinel-3A as EVs estavam em posições diferentes das dos dois primeiros o que dificultou o uso ajustado das medidas.

O EMQA foi superior ao EMQR na estação de São Romão, tanto com o Envisat quanto com o Saral (Tabela 4.12). Partindo-se do pressuposto que a comparação direta dos valores é mais exata que a comparação feita de forma relativa, contata-se que há

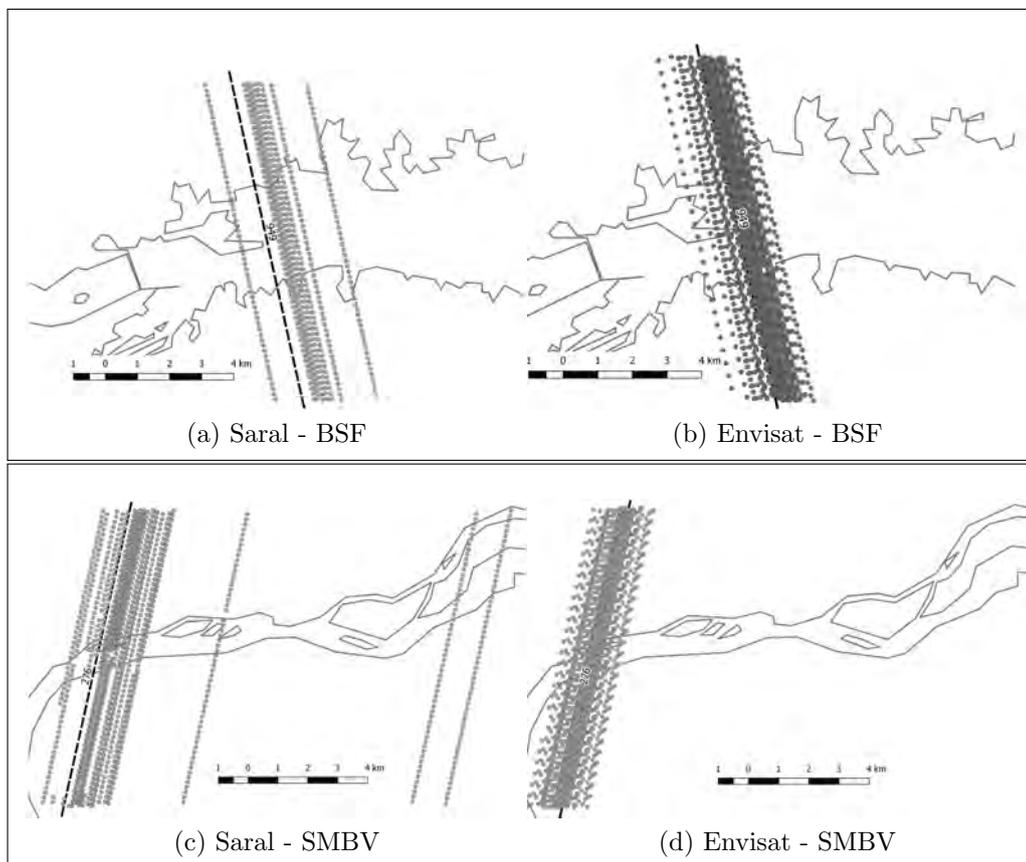


Figura 4.54: As figuras representam os pontos extraídos para diversos ciclos dos satélites Saral e Envisat nas estações virtuais de Belém do São Francisco(BSF) e Santa Maria da Boa Vista (SMBV), a linha tracejada representa o *track* dos satélites e o polígono em cinza corresponde ao contorno aproximado do Rio São Francisco.

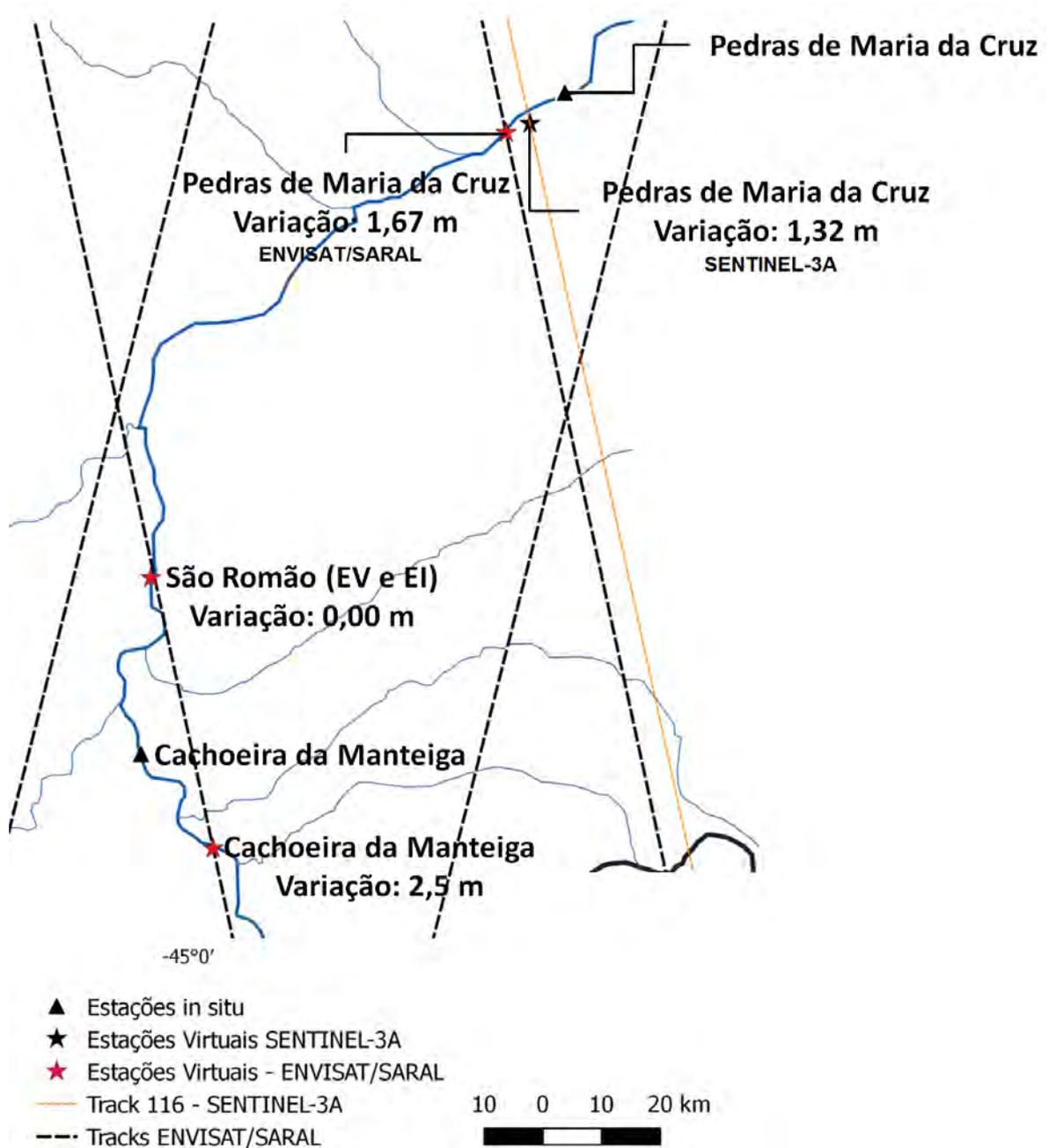


Figura 4.55: Estações *in situ* (EI) niveladas e as estações virtuais (EV) correspondentes. Para cada uma das estações ilustradas foi inserido o valor de diferença entre a altitude medida na EI e na EV.

Tabela 4.12: Erro Médio Quadrático Absoluto e Relativo (EMQA e EMQR) calculados para três estações virtuais ao longo do Rio São Francisco. Os erros estão apresentados tanto para o ICE-1 quanto para o RANSAC.

| Estação | Erros | Envisat | | Saral | |
|-------------------------|-------|---------|--------|-------|--------|
| | | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC |
| Cachoeira da Manteiga | EMQA | 1,38 | 1,42 | 8,00 | 7,74 |
| | EMQR | 0,54 | 0,56 | 0,69 | 0,29 |
| São Romão | EMQA | 0,98 | 1,07 | 0,81 | 0,59 |
| | EMQR | 0,43 | 0,54 | 0,52 | 0,09 |
| Pedras de Maria da Cruz | EMQA | 2,02 | 2,05 | - | - |
| | EMQR | 0,46 | 0,49 | - | - |

uma subestimação do erro quando da comparação feita por EMQR. A EV de São Romão foi utilizada pra essa comparação, entre EMQR e EMQA, porque a EI e a EV ocupam a mesma posição no RSF.

As outras duas estações, que também possuem nivelamento global, precisaram de uma correção adicional, pois EI e EV não estão na mesma posição no rio. Na Figura 4.55 estão inseridos os valores que devem ser somados às cotas ajustadas para o elipsoide na EI. Portanto, antes de realizar o cálculo do EMQA, foi feito o ajuste das medidas *in situ* através dos valores obtidos em campo.

Nas EVs de Cachoeira da Manteiga e Pedras de Maria da Cruz o EMQA também foi bastante superior ao EMQR, tanto com ICE-1 quanto com o RANSAC (Tabela 4.12). O EMQA calculado para o Envisat está relacionado à diferença de precisão dos instrumentos e também à distância entre EI e EV, que pode embutir erros no momento de validação dos dados. Porém, a acurácia dos níveis do Saral não está relacionada somente a esses dois fatores, mas também aos problemas de ajuste do *tracker* do satélite, que superestimou a altitude da superfície de água.

A partir dos dados obtidos nessas três EVs constata-se que os erros absolutos são superiores aos obtidos de forma relativa. Cabe aqui a ressalva que, nos casos em que a EI e a EV estão em posições diferentes, apesar de conhecida a diferença entre a altitude nos dois pontos, fatores como forma e largura do canal interferem na validação dos resultados. O fato do nível variar de maneira diferente em dois pontos separados por uma distância faz com que os erros sejam incrementados.

Comparação entre ICE-1 e RANSAC

O satélite Envisat, gerou resultados mais precisos com o uso do ICE-1, como pode ser visto nas tabelas 4.7 e 4.13. As maiores diferenças entre ICE-1 e RANSAC ocorreram nas EVs de São Romão, Santa Maria da Boa Vista e Ibó. A performance do ICE-1 no

caso do Envisat está diretamente relacionada à consistência de seus dados, que incorreram em poucos erros de medição ao longo de seu tempo de operação. O RANSAC eliminou medições, estimadas com o ICE-1, de forma equivocada que gerou até mesmo o aumento do EMQR em alguns casos.

No caso do Saral o RANSAC gerou melhoria nos resultados obtidos com o ICE-1 em $\approx 77\%$ das EVs criadas (Tabela 4.13). A diferença entre ICE-1 e RANSAC foi superior a 0,30 m nas EVs de Cachoeira da Manteiga, São Romão e Penedo, o que consiste em um incremento significativo da acurácia dos dados obtidos por AS. O ganho gerado com o uso do RANSAC se deve ao fato das medições de nível obtidas de um ponto para outro, no mesmo ciclo, apresentarem valores muito discrepantes, devido ao mal funcionamento do *tracker* do Saral.

Para o satélite Sentinel-3A o RANSAC foi melhor que o ICE-1 em metade dos casos (Tabela 4.13). Nas EVs de Bom Jesus da Lapa e Paratinga, a diferença foi de 0,01 m, valor este insignificante diante da precisão do instrumento, que está na ordem dos 0,035 m (Sentinel-3, 2013). Já na EV de Orocó, a melhoria da acurácia chegou a 0,23 m, valor expressivo e que contribuiu para a melhoria da acurácia das medições de nível. Na EV de Manga, ICE-1 e RANSAC obtiveram a mesma acurácia (EMQR = 0,83 m) e nas estações de Pirapara, Gameleira e Bom Jesus da Lapa, o ICE-1 foi 0,52 m, 0,13 m e 0,01 m melhor que o RANSAC, respectivamente.

Diferente dos resultados obtidos por Saral e Envisat, não se pode dizer que há um predomínio do ICE-1 sobre o RANSAC ou vice-versa. As razões para o RANSAC gerar bons resultados em algumas EVs do Sentinel-3A estão relacionadas às diferenças entre as medições realizadas para uma sequência de pontos do mesmo ciclo, o que facilita a identificação e eliminação dos erros com o uso do RANSAC.

Tabela 4.13: Diferença entre o Erro Médio Quadrático (EMQR) calculado com o ICE-1 e com o RANSAC a partir dos dados dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. Os valores negativos indicam que o ICE-1 foi mais preciso que o RANSAC.

| Estação | Envisat | | Saral | | Sentinel-3A | |
|---------------------------|---------|--------|-------|--------|-------------|--------|
| | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC | ICE-1 | RANSAC |
| Iguatama* | -0,07 | | - | | - | |
| Pirapora* | -0,03 | | -0,70 | | -0,52 | |
| Cachoeira da Manteiga* | -0,02 | | 0,40 | | - | |
| São Romão* | -0,11 | | 0,43 | | 0,01 | |
| Pedras de Maria da Cruz* | -0,03 | | - | | - | |
| Manga* | -0,03 | | 0,15 | | 0,00 | |
| Morpará* | -0,07 | | - | | - | |
| Orocó† | -0,06 | | 0,01 | | 0,26 | |
| Belém do São Francisco* | -0,04 | | -0,08 | | - | |
| Ibó* | -0,10 | | 0,17 | | - | |
| Santa Maria da Boa Vista* | -0,13 | | 0,17 | | - | |
| Penedo* | - | | 0,34 | | - | |
| Gameleira● | - | | - | | -0,13 | |
| Bom Jesus da Lapa● | - | | - | | -0,01 | |
| Paratinga● | - | | - | | 0,01 | |
| Barra● | - | | - | | 0,06 | |

Valores negativos indicam que o ICE-1 foi mais preciso que o RANSAC

* Estações Virtuais (EV) criadas a partir dos satélites Envisat e Saral

● EV criadas a partir do satélite Sentinel-3A

★ EV criadas para os três satélites, mas a do Sentinel-3A não possui a mesma localização espacial.

† EV criada para os três satélites e que estão na mesma posição no rio.

Capítulo 5

Comportamento do sinal radar dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A

Diferentes fatores podem influenciar nas respostas capturadas pelos radares altimétricos e podem ser relacionados à área iluminada pelo satélite (Roux *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2017). Devido à área de abrangência dos *footprints*, os retornos médios registrados podem ser influenciados pelas diversas superfícies às margens dos rios, tais como vegetação, pastagens, solo exposto, áreas urbanas, corpos hídricos próximos ao curso d'água, entre outras (Maillard e Calmant, 2013; Pereira e Maillard, 2014; Biancamaria *et al.*, 2017). A pegada ou *footprint* dos três satélites utilizados neste trabalho estão ilustrados na Figura 5.1.

Além das superfícies às margens do curso d'água, características tais como a forma e a largura do rio, presença ou ausência de corredeiras, ondas, bancos de areia e ilhas fluviais podem influenciar na qualidade do sinal. Um exemplo de influência está na ocorrência de ilhas fluviais, compostas por solo exposto e arenoso, que tem comportamento espectral similar ao da água nas bandas ka e ku. Outro exemplo é o tipo de canal (Figura 5.2), quando este é meandrante, podem ser geradas múltiplas respostas que retornam ao sensor.

Os resultados obtidos no **Capítulo 4** deste trabalho mostraram a viabilidade da AS para medição do nível de água ao longo do Rio São Francisco. Com o uso do Envisat os resultados foram consistentes na maioria das EVs criadas, já para o Saral os erros variaram muito de uma EV para outra e também para uma mesma EV, de um ciclo (data) para outro. O Sentinel-3A retornou bons resultados, apesar da baixa quantidade de dados disponíveis.

A necessidade de compreender como os sensores envolvidos registram as respostas

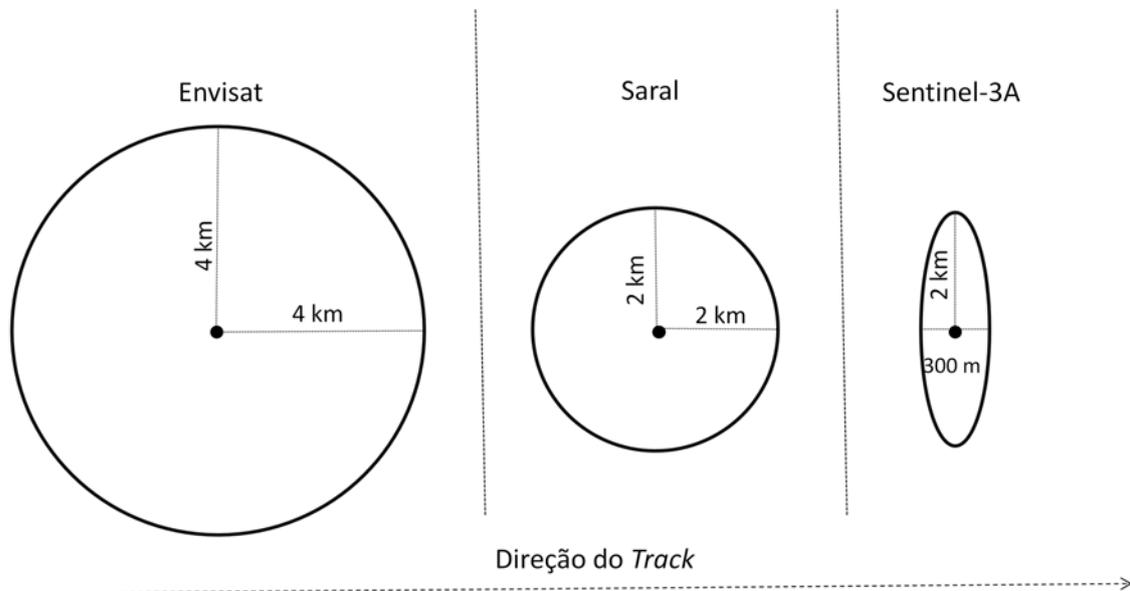


Figura 5.1: *Footprint* aproximado dos satélites Envisat, Saral e Sentinel-3A. O Envisat e o Saral são satélites que operam no modo de baixa resolução (*Low Resolution Mode* - LRM) enquanto que o Sentinel-3A opera como um satélite de abertura sintética (*Sythetic Apperture Radar* - SAR). Assim, os dois primeiros geram *footprints* circulares enquanto que o Sentinel-3A gera um *footprint* elíptico.

vindas das superfícies conduziu ao desenvolvimento de um procedimento metodológico para a extração das formas de onda (FO), o que gerou material para a análise da evolução espaço-temporal do sinal radar ao longo da superfície (Figura 5.3).

Neste capítulo foram utilizados os dados de altitude e das formas de onda. Além disso, para subsidiar a análise dos dados, os *footprints* teóricos, indicados nos manuais de cada um dos satélites, foram utilizados para serem relacionados às formas de onda (Baker *et al.*, 2002; Bronner *et al.*, 2013; Sentinel-3, 2013).

5.1 Abordagem Metodológica

5.1.1 Seleção e extração das formas de onda

Os dados dos satélites altimétricos utilizados neste capítulo são os mesmos do **Capítulo 4**. Caso haja alguma dúvida sobre o tipo e o conteúdo destes dados, sugere-se a consulta à Seção (3.2). Dentre as doze estações criadas para Envisat e Saral e as nove para o Sentinel-3A, foram selecionadas duas EVs para esta etapa: Pedras de Maria da Cruz e Manga. Essa escolha foi baseada no fato das duas EVs terem obtido resultados discrepantes entre si, mas possuírem ângulo de interseção e sentido do *track* semelhantes.

Devido à variação das órbitas dos satélites foi necessário avaliar quais ciclos estavam

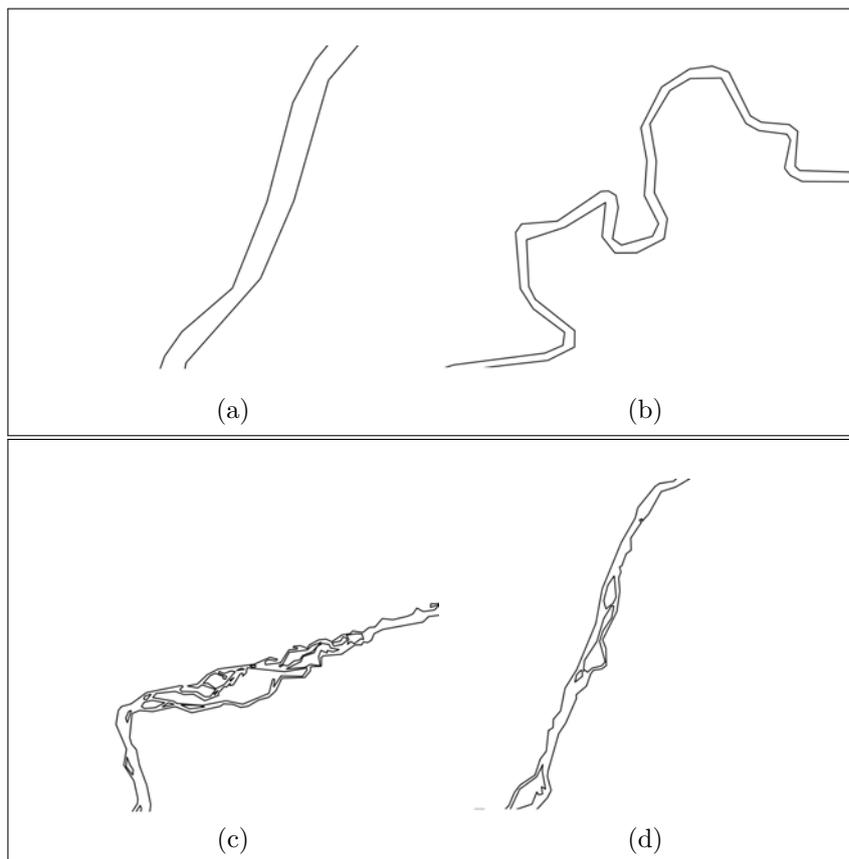


Figura 5.2: Tipos de canais fluviais que ocorrem ao longo do Rio São Francisco. (a) canal fluvial retilíneo; (b) canal fluvial meandrante; (c) canal fluvial com presença de ilhas; (d) canal fluvial anastomosado.

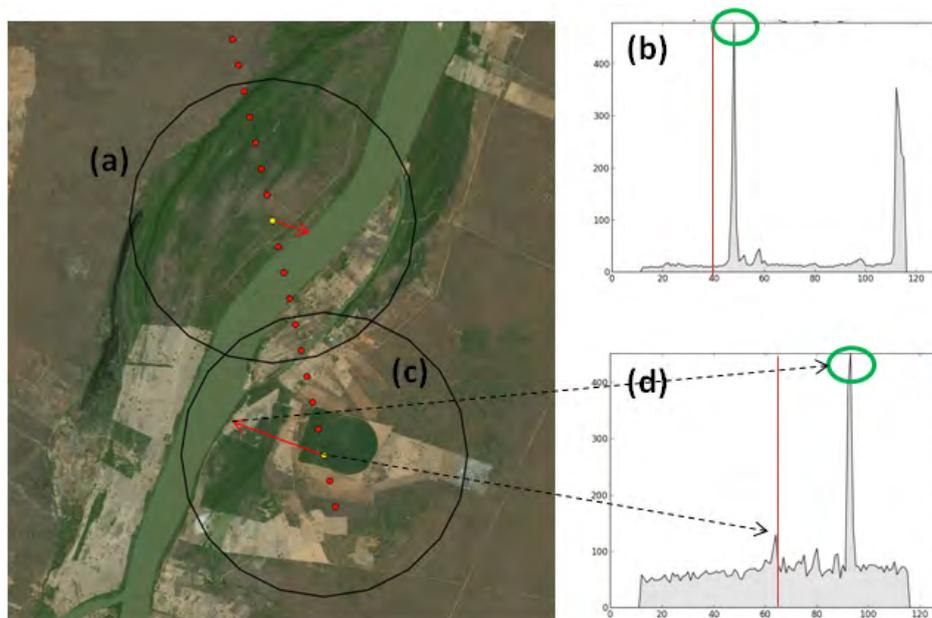


Figura 5.3: Relação entre o *footprint* do satélite, a presença de água e a forma de onda. Os círculos pretos representam o *footprint* do satélite, nesse exemplo os *footprints* dos pontos destacados em amarelo estão sobrepostos à imagem. O *footprint* identificado por (a) está relacionado a forma de onda em (b), onde o círculo verde indica a provável resposta da água vinda do rio indicado pela seta vermelha. O *footprint* (c) relaciona-se a forma de onda (d) e o círculo verde indica a possível resposta da água do rio indicado pela seta vermelha. As setas tracejadas do *footprint* (c) indicam as prováveis respostas na forma de onda (d).

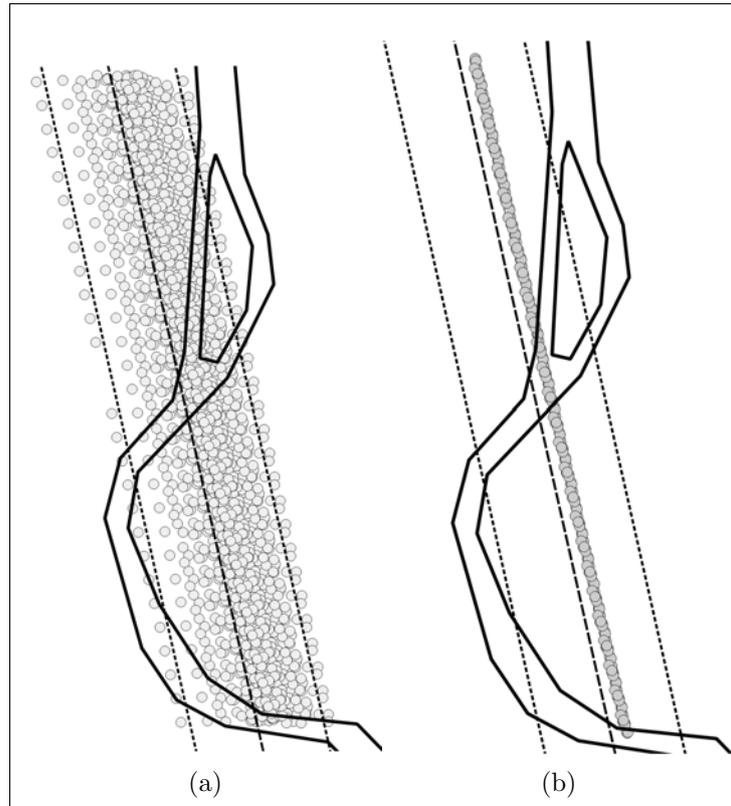


Figura 5.4: Os círculos em cinza representam os pontos de cada um dos ciclos, a linha tracejada em preto é o *track* nominal do satélite, o polígono em preto é o limite do rio e o polígono tracejado representa a distância de um quilômetro em relação ao *track*. (a) Representação de todos os ciclos extraídos dos dados Envisat; (b) Representação de 10 ciclos que tem seus pontos praticamente sobrepostos.

especialmente próximos um dos outros, para que as FOs extraídas correspondessem às mesmas superfícies. A seleção dos ciclos de interesse foi feita com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), no qual os pontos extraídos foram sobrepostos a uma imagem (RapidEye, Sentinel-2A ou GoogleEarth). Os ciclos foram inseridos no código desenvolvido para a extração das FOs de interesse (Figura 5.4 (b)). O mesmo procedimento foi adotado para os três satélites (Exemplo: Figura 5.4).

Os dados altimétricos dos satélites foram extraídos para as duas EVs com uma distância de cinco quilômetros a partir da coordenada central do rio (Figura 5.5 (a)). A distância foi escolhida para que a análise da evolução espaço-temporal do sinal radar e sua relação com o curso d'água fosse feita de maneira mais clara, pois assim é possível acompanhar o momento em que o satélite inicia a captura de respostas oriundas da água.

O procedimento para extração dos dados está sintetizado no fluxograma da Figura 5.6, que começa com a definição da coordenada central, da distância em relação à EV

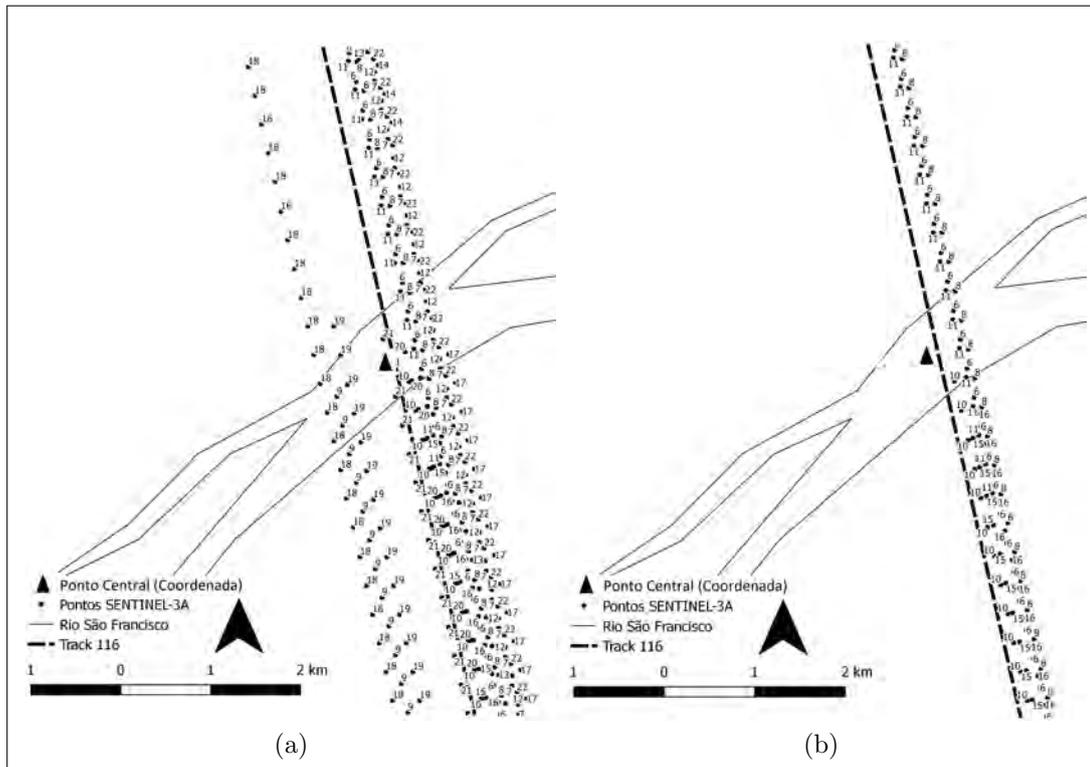


Figura 5.5: (a) Pontos extraídos a partir dos dados Sentinel-3A para a estação virtual (EV) de Pedras de Maria da Cruz no Rio São Francisco. A distância é de cinco quilômetros em relação a coordenada central (triângulo preto). Cada um dos pontos está rotulado com o número correspondente ao seu ciclo; (b) A partir da análise visual, com o uso de um Sistema de Informação Geográfica, foram identificados os ciclos que estavam mais próximos uns dos outros para analisar as respostas registradas nas formas de onda para o mesmo local e sua variação espaço-temporal.

e ao *track* do satélite. O conjunto de pontos é selecionado e extraído e inserido no SIG para que sejam identificados os ciclos das FOs de interesse. Em um novo processo de extração apenas os ciclos de interesse são selecionados e como saída são salvas suas FOs em formas de texto, *shapefile* e figuras.

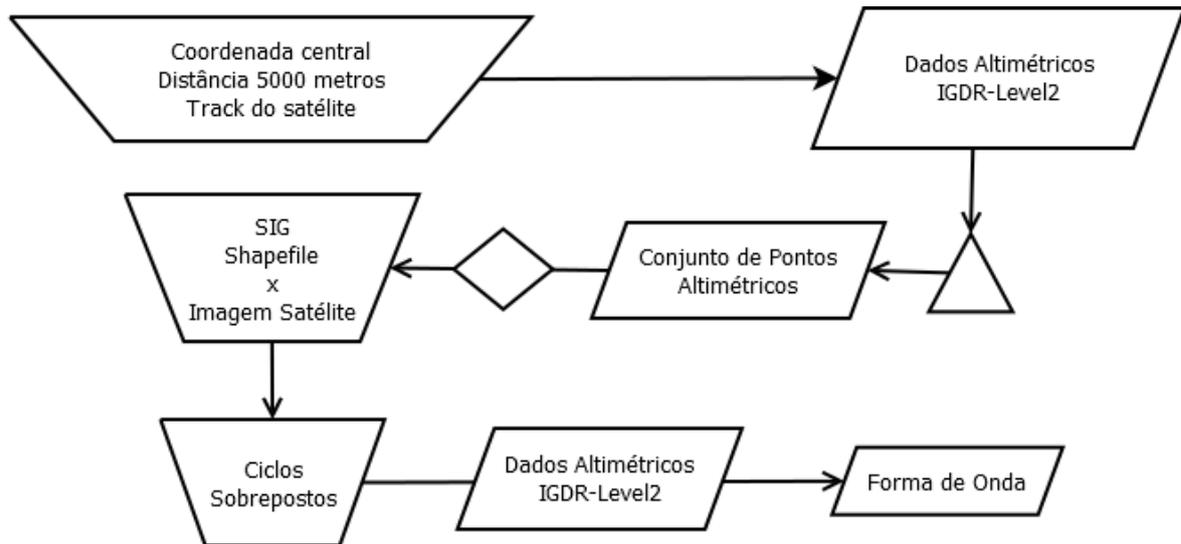


Figura 5.6: Processo de extração das formas de onda a partir dos dados dos satélites radar altimétrico. O losângulo representa um momento de decisão (sim ou não), já o triângulo representa a ação de extração de informações. No primeiro momento todos os ciclos disponíveis para os satélites são extraídos, em seguida estes são sobrepostos a uma imagem de satélite para que sejam identificados os ciclos espacialmente mais próximos. Um novo processamento é realizado e as formas de onda dos ciclos de interesse são extraídas.

Além das FOs foram criados arquivos vetoriais do tipo *shapefile* que tem correspondência direta com as FOs. O *shapefile* foi sobreposto à imagem de satélite de modo que fosse possível analisar a relação entre a FO, a superfície e a distância entre os pontos e o rio. A partir disso foi observada a evolução espaço-temporal do sinal radar, fundamentada no modo como os pulsos enviados pelo satélite se comportam ao longo do tempo. É possível relacionar as respostas registradas na FO com a distância em relação ao rio e com a área de entorno (Figura 5.7). O mesmo procedimento de análise foi feito com o uso do modelo de *footprint* gerado para o Sentinel-3A, contudo a sua forma não é circular e sim elipsoidal.

5.1.2 Ajuste do *Tracker* dos satélites

O *tracker* é um processo que acompanha a variação topográfica ao longo do traço do satélite e estima a janela de gravação dos retornos com base no tempo que o sinal gasta para percorrer a distância entre o sensor e a superfície. Para uma janela de

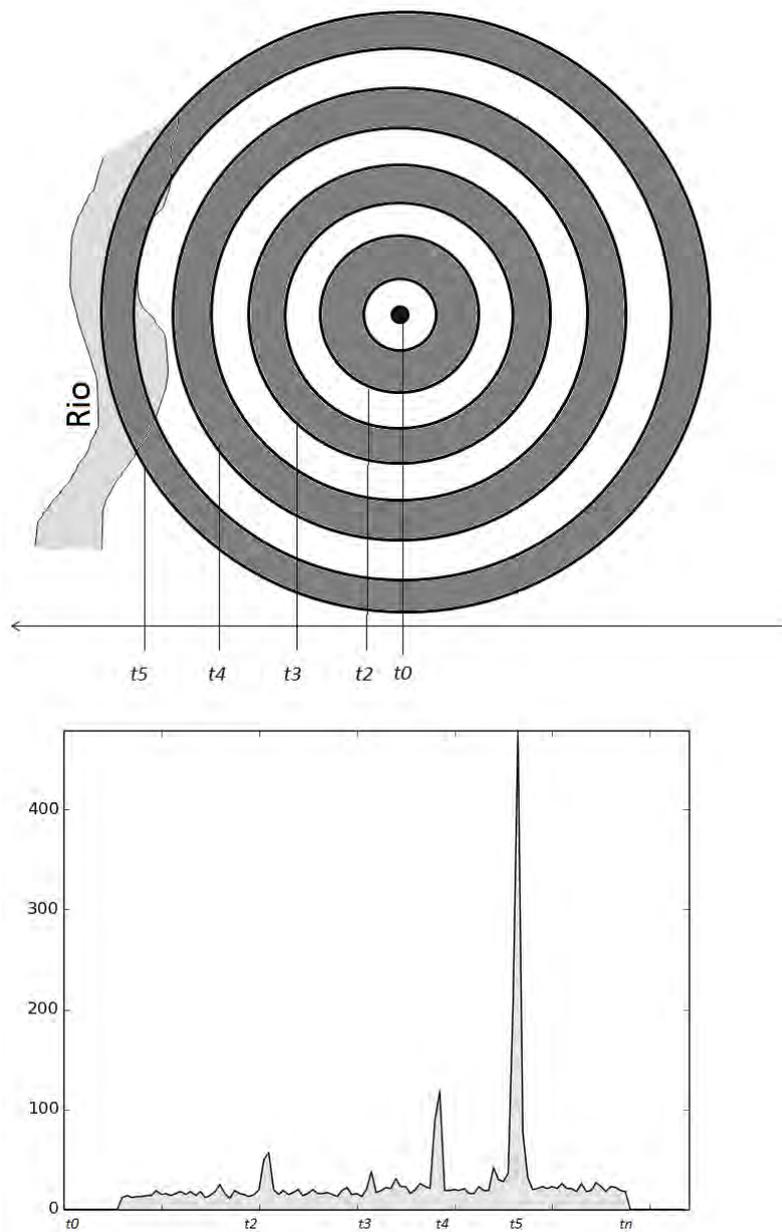


Figura 5.7: Modelo teórico da expansão do sinal radar no modo de baixa resolução (*Low Resolution Mode* - LRM). Os pulsos são gerados em forma de anéis concêntricos, para cada um (em cinza), as repostas são sumarizadas dentro da forma de onda. Há uma relação entre a expansão dos anéis, as repostas registradas e a distância até o rio. No tempo t_5 é registrado o maior pico na forma de onda, que corresponde ao anel que atingiu de forma mais efetiva o rio.

gravação a variação da distância é de ≈ 60 metros para Envisat e Sentinel-3A, e de ≈ 40 metros para o Saral. Assim, caso uma mudança topográfica seja detectada acima destes valores, o *tracker* de referência é reajustado ao longo do traço do satélite.

O sinal radar varia de acordo com o *tracker* que reflete diretamente nos dados exibidos nas FOs, devido à variação do tempo de abertura da janela de gravação. Para viabilizar a comparação entre uma FO e outra é necessário manter uma referência única de *tracker* para todas as medições realizadas em uma mesma data (ciclo) na EV (Figura 5.8). Caso esse ajuste não seja feito e o *tracker* tenha variado de um ponto para outro na sequência extraída, a interpretação da evolução espaço-temporal do sinal radar pode ser feita de forma equivocada.

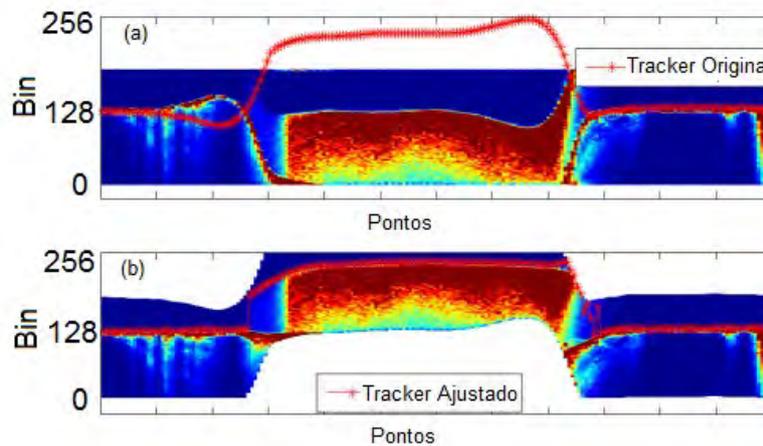


Figura 5.8: Formas de onda (FO) de uma sequência de pontos. No eixo y estão representados os *bins* de cada uma das FOs. Em (a) a linha vermelha corresponde ao *tracker* original e em (b) corresponde ao *tracker* ajustado. O ajuste permite que todas as respostas registradas nas formas de onda de uma sequência tenham a mesma referência. Fonte: Adptado de Tournadre (1999).

Os dados extraídos para a geração da FO em cada um dos ciclos foram corrigidos para as EVs. O espaço ocupado pelas respostas registradas na forma de onda foi alterado de 128 para 256 posições no eixo x (*bins*), o que viabilizou a realização do ajuste das respostas em função do *tracker*. A FO original é copiada para a nova lista criada e em seguida é calculado o deslocamento em relação aos *bins*. O valor do *tracker* do primeiro ponto extraído é utilizado como referência para ajustar os pontos da sequência.

A lógica para realizar o deslocamento da FO segue a seguinte condição: ao considerar uma lista de pontos $[X_n]$ se o *tracker* do ponto X_{n+1} é diferente do *tracker* do ponto X_n , calcula-se a diferença entre eles, que é arredondada e em seguida dividida pela distância entre dois *bins* consecutivos, que é de $\approx 0,46$ m (Envisat e Sentinel-3A) e $\approx 0,32$ m (Saral). O resultado corresponde ao número de posições que a FO deve

ser deslocada no eixo x . Caso o valor calculado seja igual a zero, a posição da FO é mantida. O código utilizado para este procedimento está exposto e comentado no Apêndice G.

5.2 Análise das formas de onda

5.2.1 Análise comparativa dos dados de Pedras de Maria da Cruz

A análise das FOs foi feita a partir da seleção de quatro pontos dos ciclos 17, 32, 68 e 71 da EV de Pedras de Maria da Cruz. A escolha dos ciclos foi feita de modo a selecionar aqueles que possuíam sobreposição, devido a chance das respostas terem como origem as mesmas superfícies (Figura 5.9).

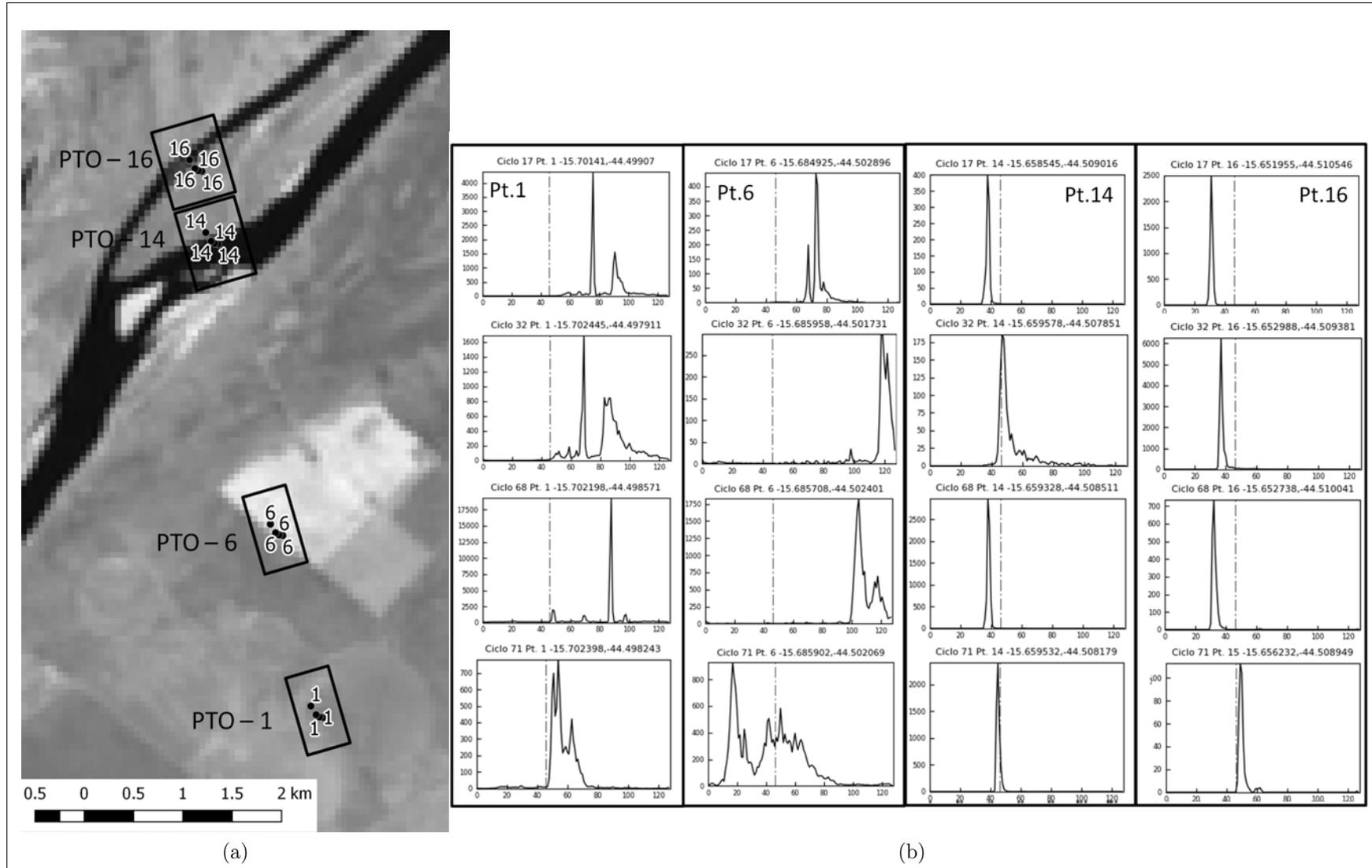


Figura 5.9: Formas de onda para os ciclos 17 (Junho-2003), 32 (Dezembro-2004), 68 (Abril-2008) e 71 (Agosto-2008) na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com uso dos dados do satélite Envisat.

Para o ponto 1 (Pt. 1) existem dois picos para o ciclo 17, sendo o primeiro deles mais alto, com amplitude de cerca de 4.000, já no ciclo 32 ocorrem três picos mais fortes e alguns picos relativamente mais baixos. Dessa forma constata-se que pontos sobrepostos ou muito próximos, de ciclos distintos, podem conter pequenas diferenças. Isso ocorre devido à variação das características da região em função da estação do ano, que pode resultar em uma vegetação com maior ou menor quantidade de água, por exemplo. Outra razão para isso pode estar na pequena diferença de localização dos pontos entre os ciclos, conseqüentemente o satélite recebe respostas de superfícies ligeiramente diferentes.

No ciclo 68 a FO tem forma diferente da dos outros dois ciclos, com um pico único e muito forte, registrado no *bin* ≈ 85 , com valor de amplitude de 17.500. No último ciclo ilustrado (71) três picos são registrados, contudo possuem uma intensidade mais baixa e uma maior proximidade com o *bin* nominal para o pico mais forte, o que seria esperado em uma FO que contivesse água no ponto nadir. A razão para que este primeiro ponto não tenha um padrão definido está relacionado principalmente com a distância em relação ao rio e com as variações topográficas das superfícies.

Para o ponto 6 (Pt. 6) a situação é semelhante à ocorrida no Pt. 1, porém há uma maior similaridade entre as FOs dos ciclos 17, 32 e 68, apesar dos picos estarem localizados em posições relativamente diferentes para os três ciclos. A distância do Pt. 6 até a água é de aproximadamente três quilômetros, o que favorece o surgimento de um padrão nas FOs entre os pontos de diferentes ciclos. Este fato está relacionado aos tipos dos sensores, que foram desenvolvidos para captar as respostas vindas da água e não de outras superfícies. Desse modo, identifica-se uma relação entre a manutenção de um padrão entre os ciclos e a distância em relação à água.

Os outros dois pontos extraídos (Pt. 14 e Pt. 16) estão sobrepostos à água, nestes percebe-se uma maior similaridade tanto inter-ciclo quanto entre os ciclos. O Pt. 14 está sobre o rio e próximo à ilha fluvial, assim a água é detectada próxima ao nadir do sensor altimétrico, o que favorece a identificação visual de um pico único. Esse tipo de situação favorece FOs que mantêm um padrão entre um ciclo e outro. Essa situação pode ser vista nos gráficos dos quatro ciclos extraídos. A diferença mais marcante está relacionada com a posição do pico dentro da FO, que ocorre antes do *bin* 40 para os ciclos 17 e 68 e próximo ao *bin* nominal (46) nos ciclos 32 e 68.

O Pt. 16 tem comportamento semelhante ao do Pt. 14, mas os picos são ainda mais evidentes quando comparados ao restante da FO, em virtude da água estar muito próxima do ponto nadir do sensor. Outra observação é que há uma grande similaridade entre as repostas registradas nas FOs dos pontos 14 e 16. Apesar destes não estarem sobrepostos, a influência da água em suas respostas tem uma característica marcante que é o pico único resultante da forte reflexão dos pulsos no nadir. Esse tipo de

observação permite dizer que os picos em pontos consecutivos ou em FOs de ciclos diferentes indicam a presença de água no ponto nadir, o que pode facilitar a seleção de pontos a serem utilizados na estimativa do nível d'água.

Os resultados obtidos nas medições de nível em Pedras de Maria da Cruz com o uso do Envisat tiveram EMQR de 0,46 m, com erros em medições individuais que variaram de 0,007 m a 1,87 m (Tabela 5.1). A manutenção do padrão das FOs em distâncias inferiores a três quilômetros favorecem a obtenção do nível de água com erros relativamente baixos, como os estimados no **Capítulo 4** para a estação de Pedras de Maria da Cruz.

Tabela 5.1: Diferença entre o nível *in situ* e o obtido por altimetria radar na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com o uso do satélite Envisat. Os erros variam de 0,007 m a 1,87 m, com erro médio quadrático relativo de 0,46 m.

| Ano | Dia | Track | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x virtual | Ano | Dia | Track | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x virtual |
|------|-----|-------|-------|---------------------------------------|------|-----|-------|-------|---------------------------------------|
| 2002 | 287 | 377 | 10 | -0,007 | 2006 | 156 | 377 | 48 | -0,6764 |
| 2003 | 97 | 377 | 15 | -0,039 | 2006 | 191 | 377 | 49 | -0,20 |
| 2003 | 167 | 377 | 17 | -0,2577 | 2006 | 226 | 377 | 50 | -0,2463 |
| 2003 | 202 | 377 | 18 | 0,3688 | 2007 | 106 | 377 | 57 | -0,0501 |
| 2003 | 237 | 377 | 19 | -0,1208 | 2007 | 141 | 377 | 58 | -0,305 |
| 2003 | 272 | 377 | 20 | -0,3546 | 2007 | 176 | 377 | 59 | -0,5876 |
| 2004 | 12 | 377 | 23 | 0,2802 | 2007 | 211 | 377 | 60 | -0,2027 |
| 2004 | 117 | 377 | 26 | -0,2563 | 2007 | 246 | 377 | 61 | 1,4242 |
| 2004 | 152 | 377 | 27 | -0,5497 | 2007 | 281 | 377 | 62 | -0,5181 |
| 2004 | 222 | 377 | 29 | 0,4777 | 2007 | 316 | 377 | 63 | -0,2303 |
| 2004 | 257 | 377 | 30 | 1,026 | 2007 | 351 | 377 | 64 | -0,6116 |
| 2004 | 292 | 377 | 31 | 0,285 | 2008 | 21 | 377 | 65 | -0,5891 |
| 2004 | 327 | 377 | 32 | -0,1385 | 2008 | 56 | 377 | 66 | -0,3896 |
| 2005 | 101 | 377 | 36 | -0,2545 | 2008 | 91 | 377 | 67 | -0,1344 |
| 2005 | 136 | 377 | 37 | -0,6259 | 2009 | 250 | 377 | 82 | -0,4605 |
| 2005 | 171 | 377 | 38 | -0,3691 | 2009 | 285 | 377 | 83 | 1,3195 |
| 2005 | 206 | 377 | 39 | -0,2626 | 2009 | 320 | 377 | 84 | 0,3782 |
| 2005 | 241 | 377 | 40 | 0,9533 | 2010 | 25 | 377 | 86 | -0,5122 |
| 2005 | 276 | 377 | 41 | 0,1875 | 2010 | 60 | 377 | 87 | -0,594 |
| 2006 | 16 | 377 | 44 | -1,878 | 2010 | 130 | 377 | 89 | -0,4702 |
| 2006 | 51 | 377 | 45 | -0,3027 | 2010 | 165 | 377 | 90 | -0,3865 |
| 2006 | 86 | 377 | 46 | -0,7756 | 2010 | 200 | 377 | 91 | 0,9905 |
| 2006 | 121 | 377 | 47 | -0,2828 | 2010 | 235 | 377 | 92 | -0,2216 |

Na EV de Pedras de Maria da Cruz também foram extraídas as FOs a partir dos dados do Saral. Neste caso, apenas dois ciclos possuem seus pontos localizados próximos uns dos outros, os quais foram utilizados para realizar o mesmo tipo de extração e análise aplicado para o Envisat (Figura 5.10).

Para o primeiro ponto (Pt.1) a FO do ciclo nove apresenta quatro picos mais fortes, sendo que o de maior amplitude está distante do *bin* nominal. Esse tipo de situação pode ter relação com respostas vindas de superfícies inclinadas ou de áreas alagadas

e que são registradas em tempo inferior àquelas vindas do curso d'água. O ciclo 11 apresenta dois picos de maior amplitude, mas neste caso o retorno de maior intensidade está mais próximo do *bin* 51. Em ambos os casos a FO não apresenta características para que possam ser submetidas ao algoritmo de *retracking*, porém estes pontos estão a cerca de cinco quilômetros do rio. Como o *footprint* deste satélite tem em média dois quilômetros de raio, as respostas retornadas podem não ter nenhuma relação com a água.

Outro fator observado é que a amplitude representada no eixo y é muito baixa, o que indica ausência de respostas vindas da água no ponto nadir. Para o ponto 18 (Pt. 18) não há uma repetição de padrão entre os ciclos nove e onze. Para o ciclo nove são registrados vários picos e a FO apresenta muitas oscilações, já para o onze é registrado um pico único, com retorno relativamente mais alto, mas que está distante do *bin* nominal. Neste último caso, o atraso temporal da resposta vinda da água está relacionado à distância entre o ponto e o rio, que é de cerca aproximadamente 2,5 quilômetros. Assim, a resposta vinda da água está no anel mais distante do ponto central e não tem origem no ponto nadir.

O ponto 27 (Pt. 27) está bem próximo da água e tem FO bastante irregular e a amplitude dos retornos é muito baixa para os ciclos nove e onze. Esse tipo de FO não contribui para a obtenção do nível de água, apesar de ser identificado um padrão entre as respostas em diferentes ciclos. O último ponto inserido na Figura 5.10 está sobre a água, com alta amplitude do retorno, como se espera neste tipo de situação. Contudo, o padrão da FO é muito irregular, o que também prejudica a aplicação do *retracker* para a obtenção do nível d'água.

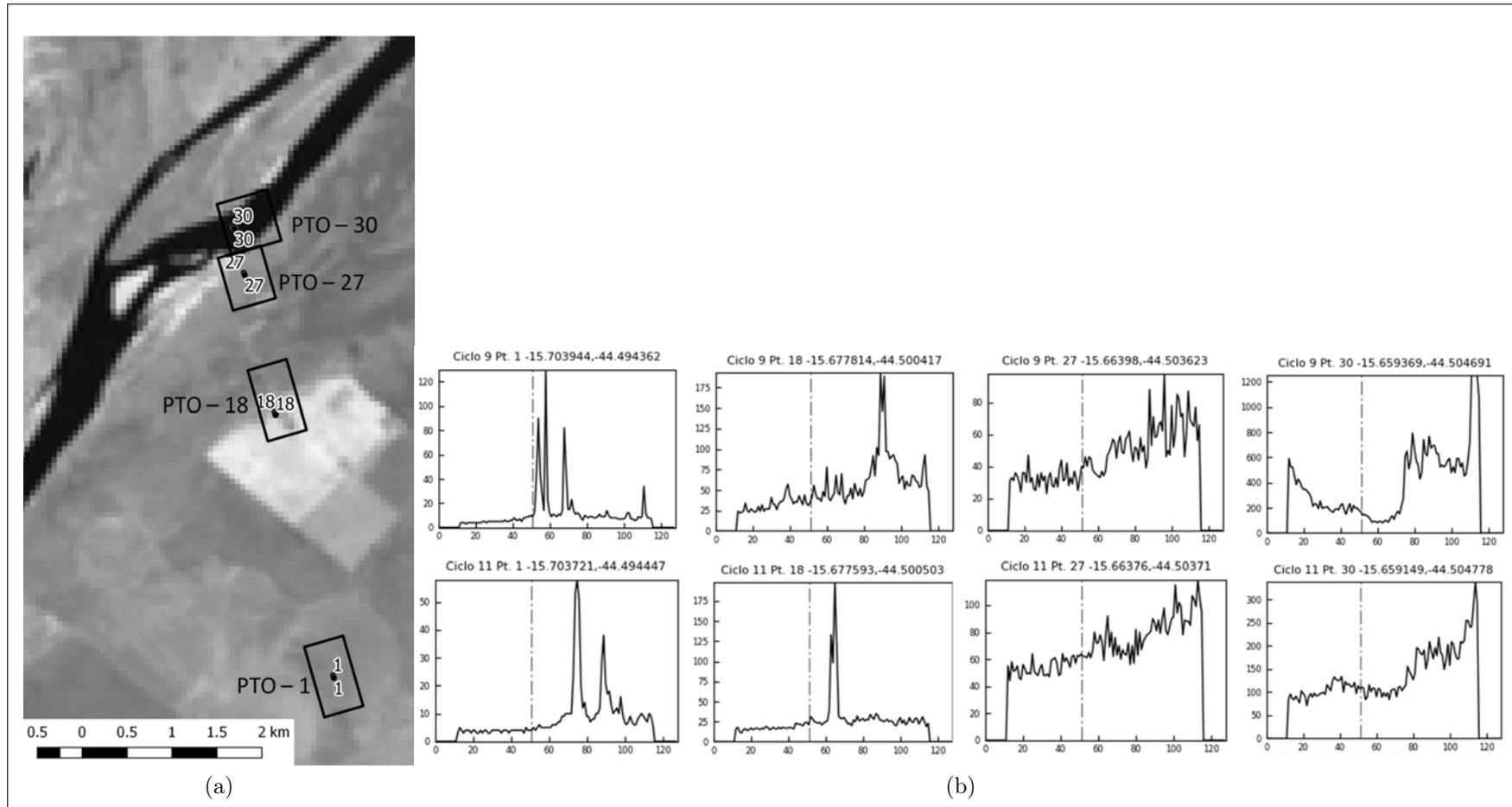


Figura 5.10: Formas de onda para os ciclos nove (Janeiro-2014) e onze (Março-2014) na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com uso dos dados do satélite Saral.

Na EV de Pedras de Maria da Cruz não foi possível estimar a altitude a partir do ICE-1 com os dados do Saral. Isso se deveu a falta de padrão das FOs nesta EV. Contudo, foi utilizado um algoritmo customizado para estimar a altitude da superfície de água, baseado no OCOG (**Apêndice H**). O cálculo das medições individuais dos erros para cada ciclo variaram de ≈ 48 m (ciclo 6) a 0,16 m (ciclo 10). Ao eliminar os *outliers* o resultado do EMQR foi de 1,04 m (Tabela 5.1).

Tabela 5.2: Diferença entre o nível *in situ* e o obtido por altimetria radar na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com o uso do satélite Saral para cada um dos ciclos disponíveis.

| Ano | Dia | Track | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x virtual |
|------|-----|-------|-------|------------------------------------|
| 2013 | 121 | 377 | 2 | 1,5514 |
| 2013 | 226 | 377 | 5 | 0,144 |
| 2013 | 261 | 377 | 6 | -48,5578 |
| 2013 | 296 | 377 | 7 | -1,3407 |
| 2013 | 331 | 377 | 8 | 1,2465 |
| 2014 | 1 | 377 | 9 | -1,8372 |
| 2014 | 36 | 377 | 10 | 0,161 |
| 2014 | 71 | 377 | 11 | -5,0269 |
| 2015 | 301 | 377 | 28 | -3,5495 |
| 2015 | 336 | 377 | 29 | 1,5883 |

O Sentinel-3A também forneceu dados para a EV de Pedras de Maria da Cruz. A expectativa era a de que este sensor gerasse valores mais acurados que aqueles obtidos pelo Envisat e pelo Saral e suas FOs tivessem um padrão mais bem definido. Entretanto, assim como no Saral, o algoritmo de *retracker* não gerou valores consistentes do nível d'água. Ao analisar as FOs de ciclos sobrepostos percebe-se que não há um padrão de FO entre um ciclo e outro (Figura 5.11).

O Pt. 1 do ciclo 11, apesar de alinhado com os obtidos em outras datas, está mais próximo da água. Na FO deste ponto ocorrem dois picos bem definidos e o mais forte deles está próximo ao *bin* nominal (46). A resposta mais forte tem probabilidade de ter como origem a água, uma vez que o Pt. 1 está a cerca de dois quilômetros do centro do rio. Para o ciclo seis, o Pt. 1 apresentou um pico bem definido, mas a distância em relação ao **bin** 46 é grande. Já no ciclo oito existem ao menos três picos bem definidos e que não estão próximos do *bin* nominal. Para o ciclo 16 a FO é irregular no Pt. 1, o que torna difícil a estimativa do nível d'água.

Para o ponto seis (Pt. 6), dos ciclos seis, oito e onze, a FO apresenta uma maior similaridade inter-ciclos, com um pico bem definido apesar deste aparecer em posições diferentes em relação ao *bin* nominal. No ciclo seis, o Pt. 6 está mais distante da água e por isso o retorno mais forte é registrado tardiamente na FO.

Ao aproximar da água, com os pontos nove e onze (Pt. 9 e Pt. 11), as FOs passam a

ser mais bem definidas e apresentam um padrão. O Pt. 11 é o que tem FOs com maior similaridade entre um ciclo e outro, mas os retornos aparecem de forma bem atrasada em relação ao *bin* nominal, o que pode prejudicar a estimativa da altitude. Já para o ciclo 16 os pontos nove e onze não produziram FOs devido a falhas do satélite. Isso está relacionado à perda do sinal radar devido às falhas de estimativa do *tracker*.

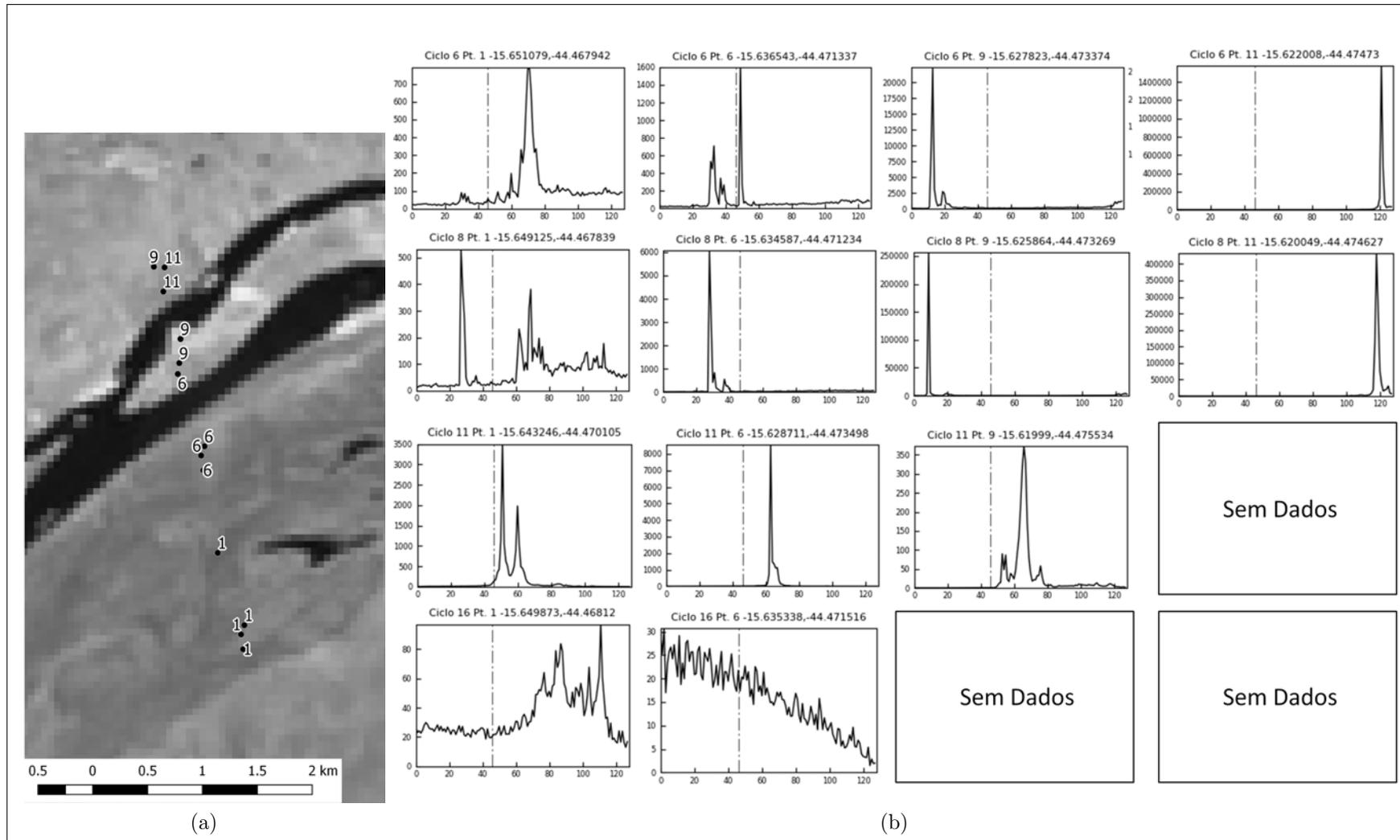


Figura 5.11: Formas de onda para os ciclos 6 (Junho-2016), 8 (Maio-2016), 11 (Novembro-2016) e 16 (Abril-2017) na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com uso dos dados do satélite Sentinel-3A.

Na Tabela 5.3 estão apresentadas as diferenças de medição entre o valor *in situ* e os valores obtidos pelo sensor do Sentinel-3A. Conforme pode ser visto, os erros variaram entre ≈ 44 m e $\approx 1,86$ m, valores estes considerados muito altos pra a altimetria radar por satélite. Os erros estão diretamente relacionados às formas de onda que são irregulares e não apresentam um padrão bem definido. Para a região de Pedras de Maria da Cruz o Sentinel-3A não pode ser utilizado, mesmo com a aplicação do algoritmo customizado com base no OCOG (**Apêndice H**).

Tabela 5.3: Diferença entre o nível *in situ* e o obtido por altimetria radar na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz com o uso do satélite Sentinel-3A.

| Ano | Dia | Track | Ciclo | Diferença <i>in situ</i> x virtual |
|------|-----|-------|-------|------------------------------------|
| 2016 | 189 | 116 | 6 | 4,58055 |
| 2016 | 216 | 116 | 7 | -44,47335 |
| 2016 | 243 | 116 | 8 | 1,86545 |
| 2016 | 270 | 116 | 9 | 8,66115 |
| 2016 | 324 | 116 | 11 | -45,73045 |
| 2016 | 351 | 116 | 12 | -5,15545 |
| 2017 | 93 | 116 | 16 | 6,90915 |
| 2017 | 147 | 116 | 18 | -46,44935 |
| 2017 | 201 | 116 | 20 | 14,22935 |
| 2017 | 255 | 116 | 22 | -46,71905 |

5.2.2 Análise comparativa dos dados de Manga

Os resultados na EV de Manga, em termos de acurácia, são relativamente melhores que aqueles apresentados para Pedras de Maria da Cruz. Apesar da similaridade com Pedras de Maria da Cruz quando se considera o ângulo de cruzamento dos *tracks* dos satélites com o RSF e a largura do curso d'água (Figura 5.12). Esta estação foi escolhida com o objetivo de fazer a comparação entre as EVs de Pedras de Maria da Cruz e Manga de modo a entender o porque da discrepância entre o resultados obtidos em ambas.

Para o satélite Envisat foram extraídos quatro pontos dos ciclos 57, 68, 76 e 85 (Figura 5.13). O ponto 1 (Pt. 1) está localizado a cerca de cinco quilômetros do cruzamento entre o *track* e o RSF. Mesmo os pontos mais distantes contêm respostas relativamente fortes, o que pode ser explicado pelo tamanho do *footprint* do Envisat. Para os ciclos 57, 68 e 76 as FOs apresentam um padrão com a presença de dois picos, sendo o mais forte localizado próximo do *bin* nominal, o que facilita a aplicação do *retracker* ICE-1 mesmo que o ponto esteja a uma distância maior do rio. Apenas no ciclo 85 houve uma mudança no padrão e o pico mais forte apresentou menor amplitude que os outros três ciclos com registro antes do *bin* nominal.

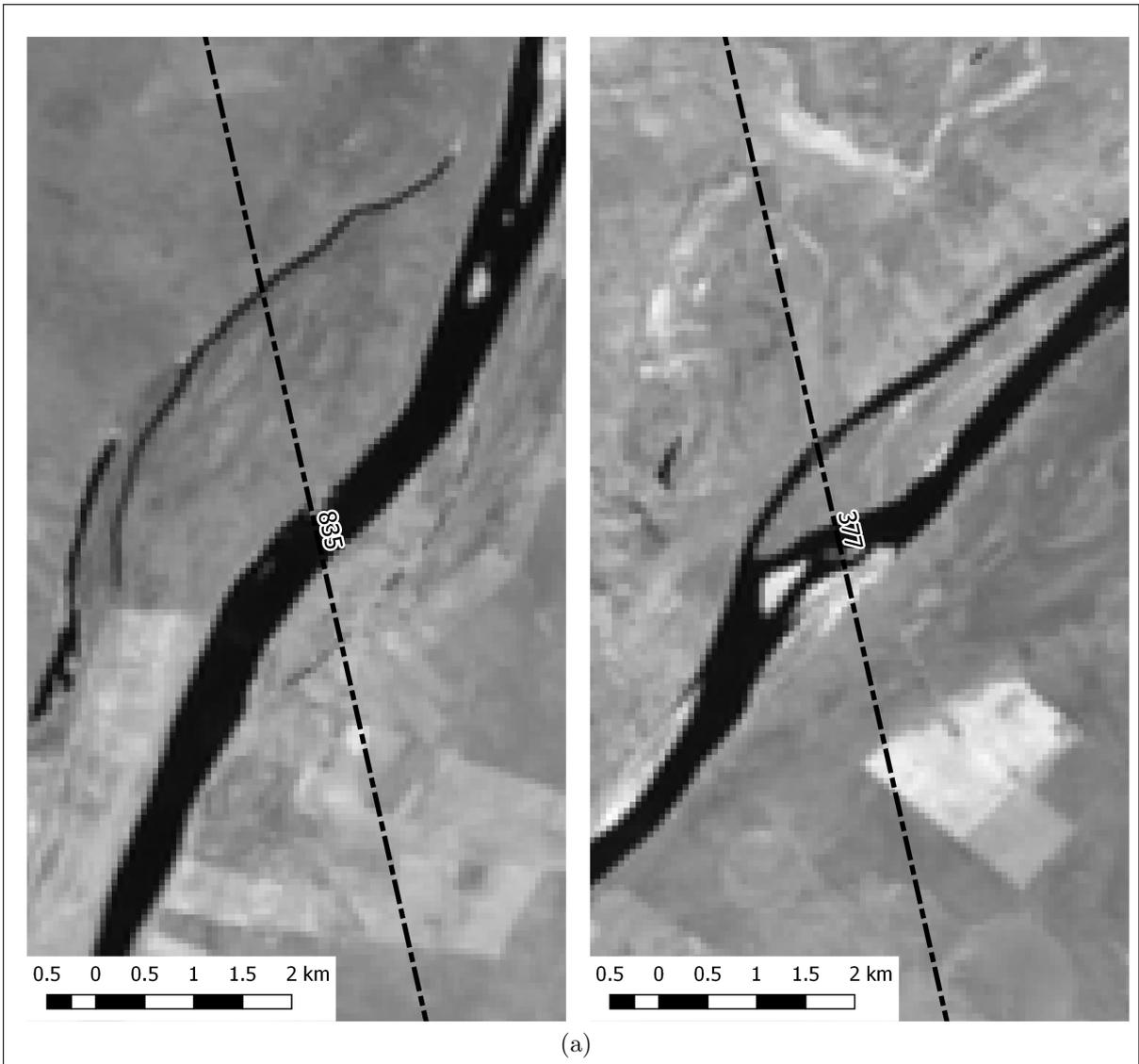


Figura 5.12: As linhas tracejadas em preto representam os *tracks* 835 em Manga e 377, em Pedras de Maria da Cruz. O ângulo entre os dois *tracks* e o Rio São Francisco é similar.

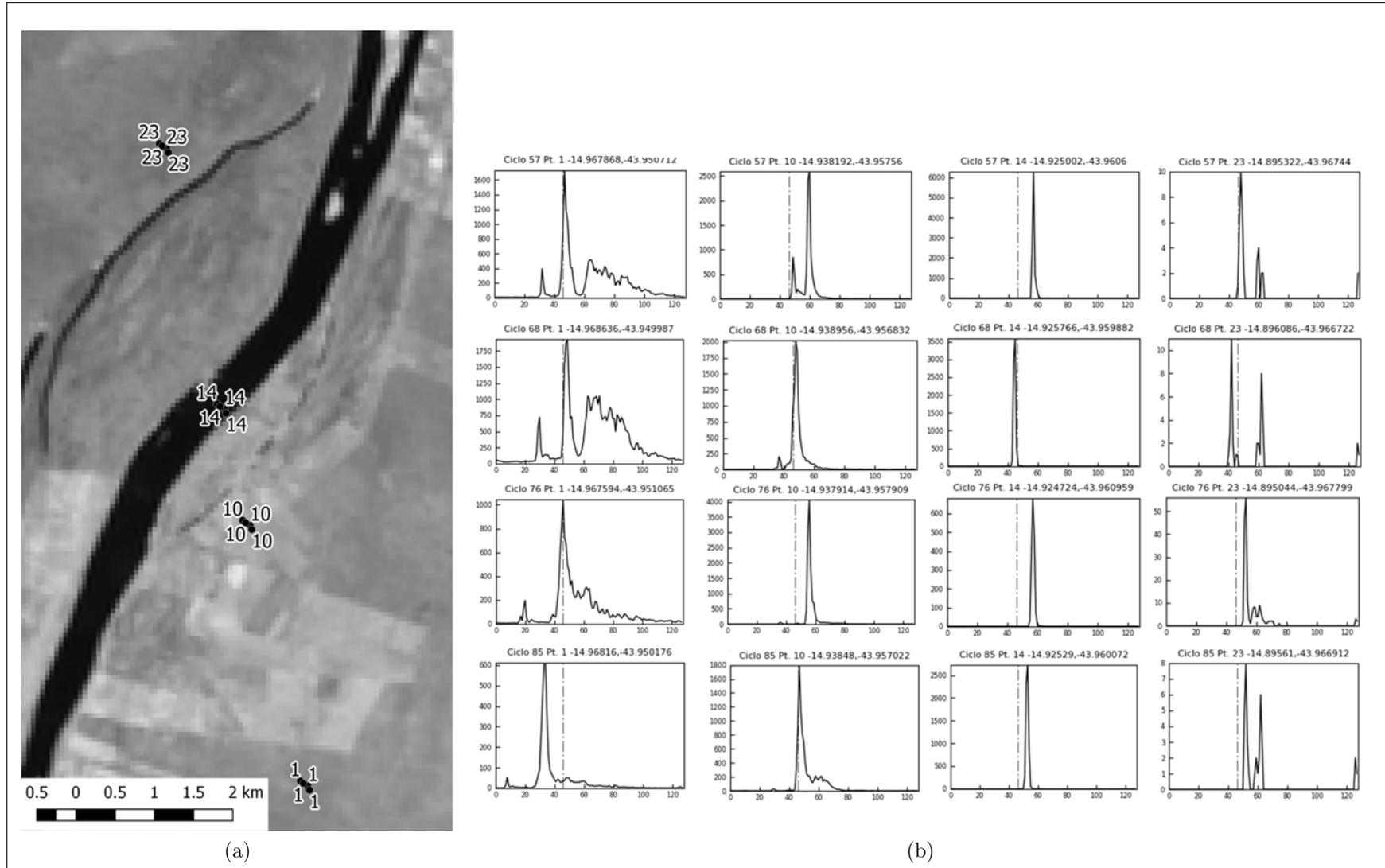


Figura 5.13: Formas de onda (FOs) para os ciclos 57 (Maio-2007), 68 (Abril-2008), 76 (Fevereiro-2009) e 85 (Janeiro-2010) na estação virtual de Manga com os dados do Envisat. (a) Espacialização dos pontos relacionados as FOs representadas em (b).

No ponto 10 (Pt. 10) há um padrão em relação à intensidade dos retornos para os quatro ciclos e também a existência de um pico que se destaca dentro do conjunto de dados, porém este varia no tempo (eixo x). Isso se deve à variação do nível ao longo do tempo neste ponto, uma vez que o Pt. 10 está localizado em uma área de inundação na margem direita do RSF (Figura 5.13 (a)). Apesar disso, pode-se dizer que há um padrão nas FOs no Pt. 10 localizado a cerca de um quilômetro do leito principal do RSF.

O ponto 14 (Pt. 14) está localizado sobre o leito principal do RSF. Neste caso as respostas são mais intensas, já que a água está no ponto nadir do satélite e reflete muito fortemente as micro-ondas da banda Ku, à exceção do ciclo 76 em que houve uma reflexão mais fraca. O padrão da FO fica mais claro quando o ponto está sobre a água, com um pico muito forte.

O último ponto da sequência é o 23 (Pt. 23) que está localizado a cerca de cinco quilômetros da margem esquerda do rio e fora da área de inundação. Suas respostas são muito fracas como pode ser visto no eixo y dos gráficos dos quatro ciclos. Os picos podem ser visualmente identificados, mas a baixa intensidade dos retornos indica que estes podem não ter origem na água ou a direção de reflexão está fora do nadir.

As respostas para o Envisat corroboram com os resultados encontrados na primeira parte deste trabalho, em que o EMQR foi de 0,23 m com o uso do ICE-1. Ao observar os erros individuais das medições em Manga constata-se que foram inferiores a 0,10 m nos ciclos 61, 64, 68, e 90, por exemplo. Esses resultados têm relação direta com a consistência das FOs nesta região e com a presença de um padrão entre as respostas registradas em vários ciclos (Figura 5.13 (b)).

Com o uso do Saral as FOs foram menos uniformes do que aquelas computadas com o uso dos dados do Envisat. Foram selecionados os ciclos 6, 7, 8 e 33, para os quais os pontos estavam espacialmente mais próximos. Devido aos problemas operacionais do Saral, a variação do *track* foi alta e por isso não há muitos casos de sobreposição entre os pontos de diferentes ciclos. Para os pontos três e dezenove (Pt. 3 e Pt. 19) as FOs apresentaram uma grande variação entre os ciclos e a amplitude das respostas foi muito baixa (eixo y), apesar de ocorrerem bem próximas ao *bin* nominal (51). O ponto 33 (Pt. 33) apresenta um pico mais forte devido à reflexão da água no ponto nadir e nos quatro ciclos há um padrão, o que facilita a aplicação da altimetria (Figura 5.13 (a)).

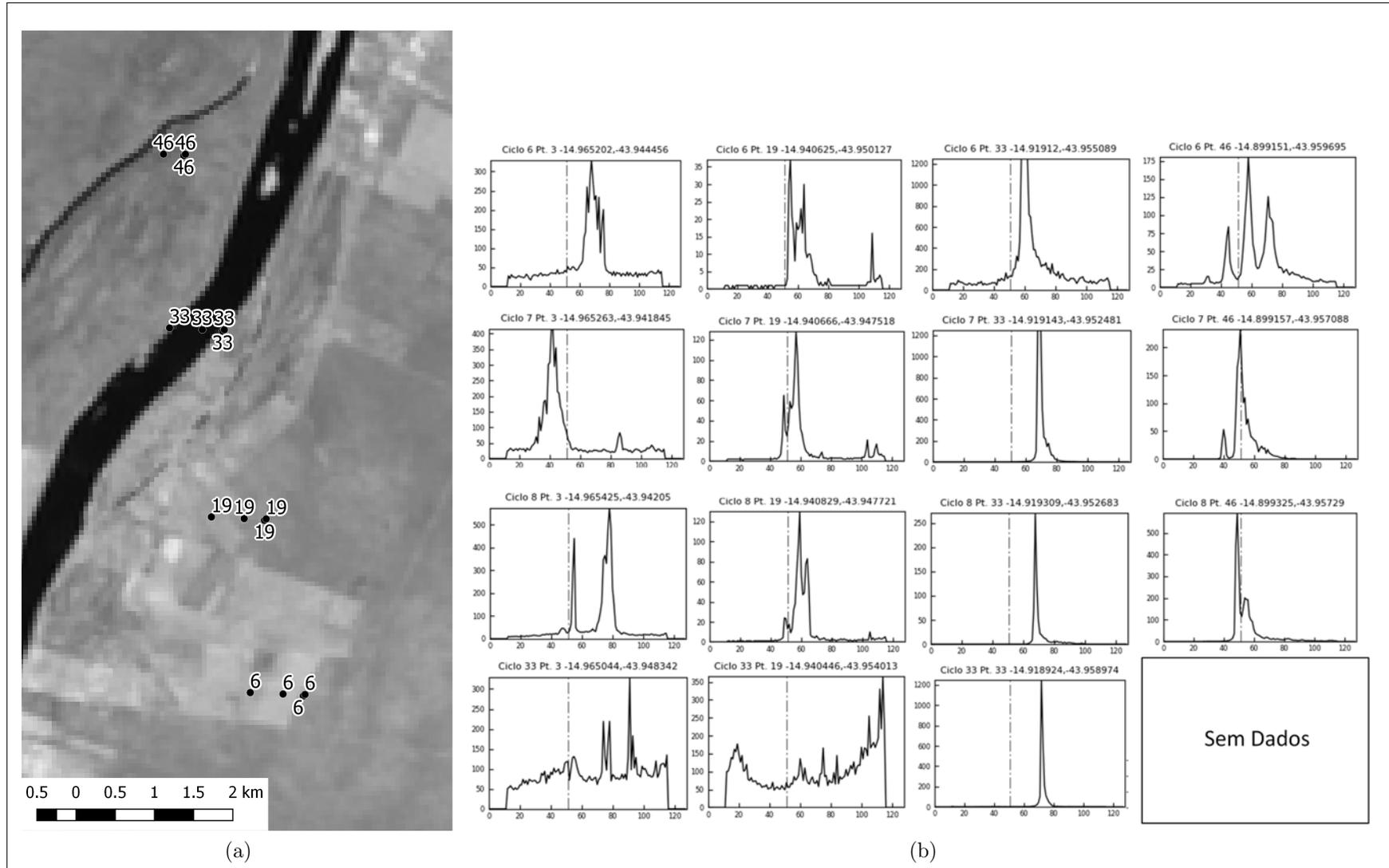


Figura 5.14: Formas de onda para os ciclos 6 (Outubro-2013), 7 (Novembro-2013), 8 (Dezembro-2013) e 33 (Maio-2016) na estação virtual de Manga com uso dos dados do satélite Saral.

O Sentinel-3A tem a sua EV em local diferente da dos outros dois satélites. Os ciclos 6, 11, 13 e 16 foram utilizados devido à grande proximidade dos pontos entre um ciclo e outro (Figura 5.15). O ponto 1 (Pt. 1) está a cerca de um quilômetros do leito principal e apresentou retornos similares para os ciclos 11 e 16. Para os ciclos 6 e 13 foi observada a presença de dois picos mais fortes entre os *bins* 60 e 70. Nesta área está localizada a planície de inundação e um pequeno canal com água derivado da calha principal do rio, logo um dos picos pode corresponder às respostas vindas do canal menor e o outro do leito do RSF. Elas podem ter sido detectadas na direção perpendicular ao *track*, uma vez que o *footprint* do Sentinel-3A recebe respostas vindas de até dois quilômetros de distância.

O ponto quatro (Pt. 4) está localizado a cerca de 300 metros do curso principal do RSF e retornou picos bem claros e com grande amplitude para os quatro ciclos. Esses picos estão localizados entre os *bins* 50 e 60, o que indica a presença de um padrão nas FOs. O mesmo ocorreu para o ponto 8 (Pt. 8), porém o pico das FOs estão ainda mais próximos do *bin* nominal, já que o ponto está exatamente sobre a água. O ponto 12 está localizado na margem esquerda do RSF, quando o satélite se afasta do leito do rio.

O EMQR obtido na primeira parte do trabalho para a EV de Manga, com o uso do Sentinel-3A, foi de 0,53 m. Apesar das FOs possuírem um padrão, a acurácia das medidas foi classificada com intermediária. Esses resultados podem ser relacionados à baixa quantidade de água no RSF no período de operação do Sentinel-3A, o que prejudicou as medições de nível com a altimetria radar por satélite. Além disso, o modo de operação do sensor (SAR) parece ser muito sensível às mudanças topográficas, o que pode ter contribuído para a redução da acurácia.

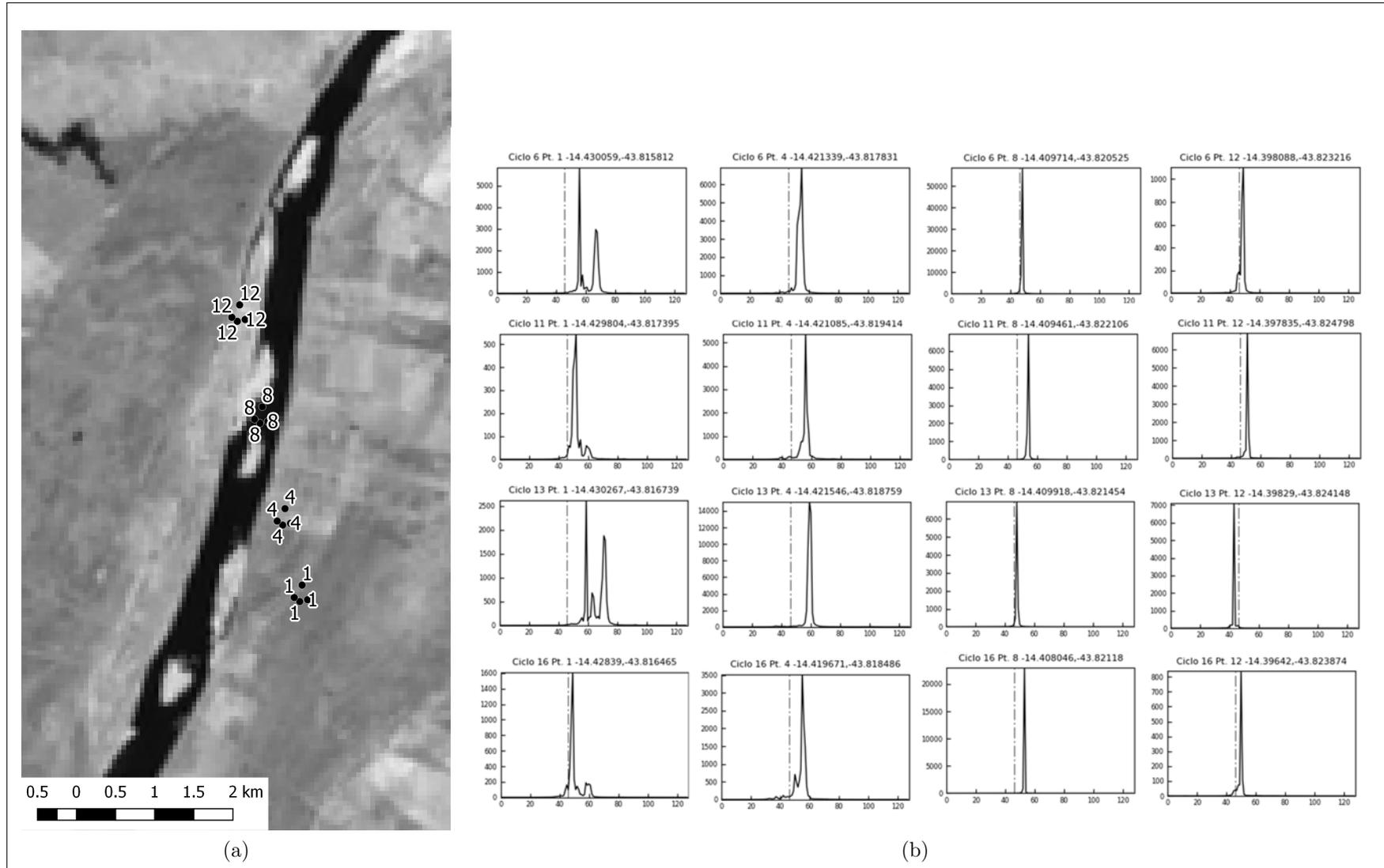


Figura 5.15: Formas de onda para os ciclos 6 (Junho-2016), 11 (Novembro-2016), 13 (Janeiro-2017) e 16 (Abril-2017) na estação virtual de Manga com uso dos dados do satélite Sentinel-3A.

O uso de ciclos sobrepostos para as duas EVs aqui analisadas nos permitiu observar o comportamento espaço-temporal do sinal radar. Quando há um padrão interpretável pelo *retracker* os resultados tendem a ser melhores, como foi o caso da EV de Manga para os três satélites. No caso de Pedras de Maria da Cruz a inexistência de um padrão interpretável gerou erros maiores e por vezes não foi possível sequer estimar a altitude. Assim, a utilização das FOs pode contribuir para o desenvolvimento de filtros que selecionem as estações virtuais de um determinado ponto do rio, seja o São Francisco ou qualquer outro em que haja cruzamento dos *tracks* destes satélites. O satélite Sentinel-3A precisa ser mais explorado, quando da existência de mais dados para o mesmo, já que sua tecnologia é diferente daquela empregada em seus predecessores e consiste em uma novidade nesta área do conhecimento.

5.3 Correção do *Tracker*

O valor do *tracker* pode ser ajustado de um ponto para outro a depender das variações topográficas da superfície. Por isso, para uma correta observação da variação das FOs de uma sequência de pontos de uma mesma data é importante que se faça o ajuste do *tracker*. Para isso foi fixado que a medição do primeiro ponto da sequência extraída seria utilizado como referência, sendo os pontos seguintes ajustados em função deste primeiro (Figura 5.16). Foi possível perceber que na maioria dos casos a diferença entre um ponto e outro é muito baixa, mesmo assim a correção foi aplicada a fim de padronizar as FOs e fazer a comparação de modo mais criterioso. As formas de onda analisadas na Seção 5.4 estão corrigidas em função do *tracker* e possuem 256 *bins* ao invés dos 128 originais.

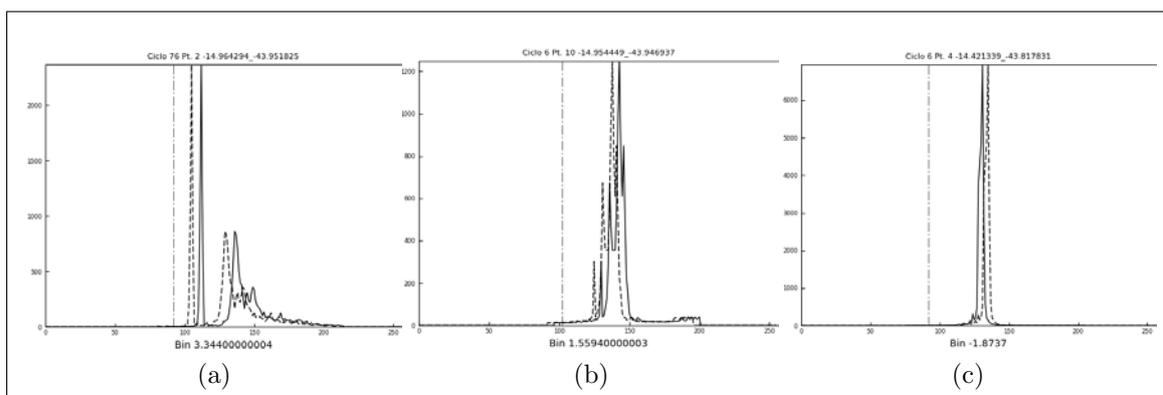


Figura 5.16: Formas de onda (FOs) dos satélites Envisat (a), Saral (b) e Sentinel-3A (c). A linha tracejada corresponde a FO original e a contínua à FO corrigida em função do *tracker*, abaixo do eixo x está o valor da diferença, em *bins*, que foi utilizada no ajuste das FOs.

Devido à realização da correção das FOs em função do *tracker*, o sinal, antes regis-

trado na origem do gráfico, passou a ter início no *bin* 80 da FO de 256 posições. Isso implicou no deslocamento do *bin* nominal dos satélites. Para Envisat e Sentinel-3A o *bin* nominal que ocupava a posição 46 passou para a posição 126 e para o Saral passou de 51 para 131. Cabe ressaltar que as respostas não foram modificadas, apenas a sua posição de registro no eixo x precisou ser alterada.

5.4 Relação entre *footprint* e a forma de onda: evolução espaço-temporal do sinal radar

Os pontos de medição são obtidos na direção nadir do satélite em relação à superfície ao longo do *track*, com intervalos regulares de ≈ 365 metros para Envisat e Sentinel-3A e ≈ 165 metros para o Saral. As formas de onda geradas pra cada ponto ao longo do *track* podem ser analisadas e relacionadas à distância ao curso d'água. A Figura 5.17 mostra os pontos extraídos para cada um dos três satélites na EV de Pedras de Maria da Cruz.

Para cada um dos satélites foi selecionado um ciclo para que servissem de exemplo ilustrativo da análise da evolução espaço-temporal do sinal registrado. Para realizar a análise foi construída uma série com seis pontos para cada um dos sensores, extraídos na direção do deslocamento dos satélites, sendo os pontos mais distantes localizados a cerca de cinco quilômetros do centro do rio. Quatro características principais foram observadas nas FOs: 1 - presença de picos; 2 - relação entre o(s) pico(s) e o *bin* nominal indicado na FO; 3 - amplitude da resposta representada no eixo y ; e 4 - distância em relação à água. Deste modo, foi feito o acompanhamento da evolução espaço-temporal a partir do ponto mais distante até a sobreposição com o rio e o seu posterior afastamento na margem oposta. Em todos os exemplos analisados a órbita do satélite é ascendente e o primeiro ponto sempre estará localizado na margem direita do rio e o último na margem esquerda.

Estação virtual de Pedras de Maria da Cruz: Envisat

A Figura 5.18 mostra os seis pontos extraídos para o ciclo 10 do Envisat na estação de Pedras de Maria da Cruz. Nesta Figura estão representadas as FOs e o *footprint* teórico, que está sobreposto à imagem de satélite. O primeiro ponto (Figura 5.18 (a)) está a cerca de quatro quilômetros do RSF e a FO apresenta dois picos que se destacam. Como a distância em relação à água é de aproximadamente cinco quilômetros, a força do retorno (eixo y) é relativamente baixa. Além disso, o pico mais forte é registrado de maneira atrasada em relação ao *bin* nominal.

O ponto representado na Figura 5.18 (b) está cerca de um quilômetro mais próximo do RSF que o anterior. A intensidade do pico é maior que do ponto anterior e este é

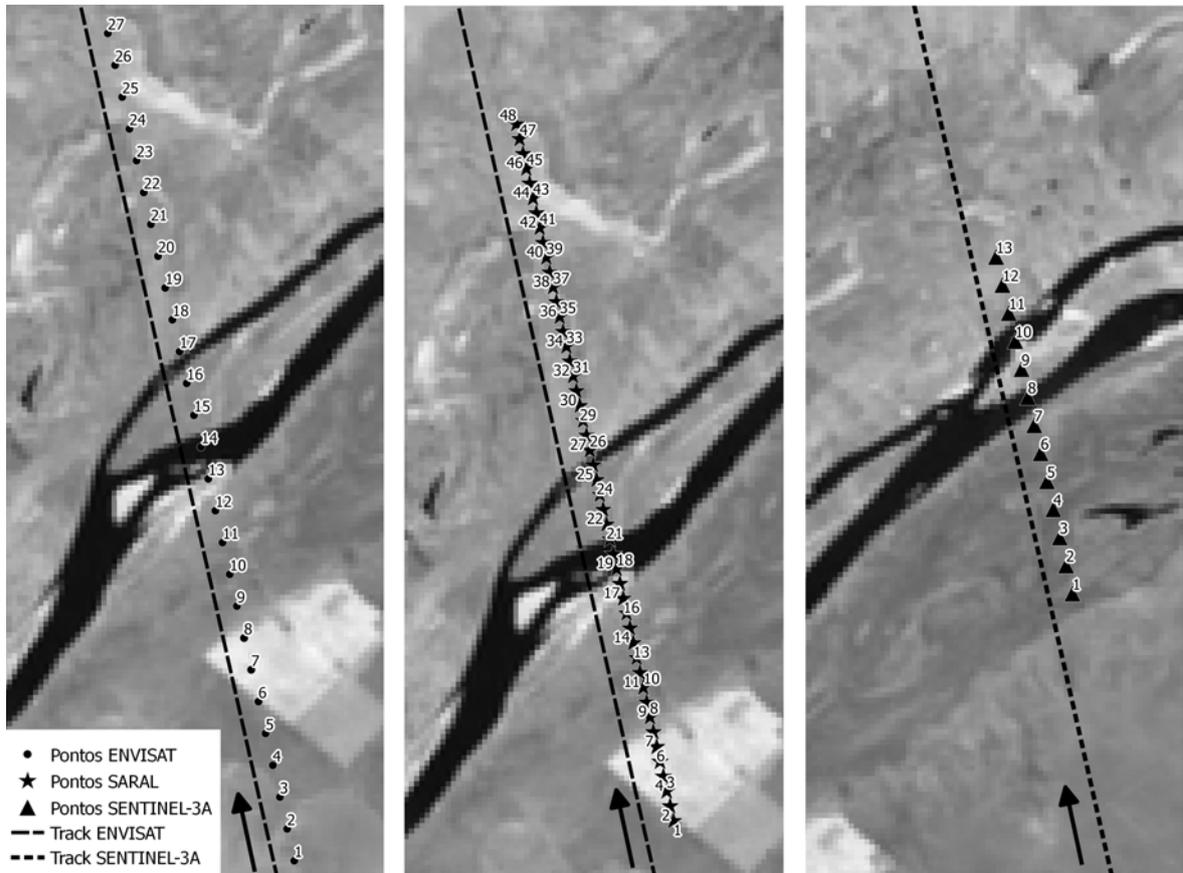


Figura 5.17: Pontos dos quais foram extraídas as formas de onda na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz para os satélites Envisat (círculos), Saral (estrelas) e Sentinel-3A (triângulos). Para os três satélites as órbitas são ascendentes conforme indicado pela seta preta.

registrado mais próximo do *bin* nominal (126)¹. Outra observação sobre este ponto é a baixa interferência registrada na FO devido ao contraste entre a água e a cobertura do solo nesta EV.

O ponto seguinte, Figura 5.18 (c), representa uma FO muito próxima ao modelo ideal para o *retracking* ICE-1, baseado no centro de gravidade (Sub-seção 2.2.5). Isso se deve à proximidade deste ponto com a água, que resulta em uma grande sobreposição dos anéis do *footprint* com o curso d'água. Entretanto, as amplitudes não são muito altas e possivelmente estão relacionadas às respostas *off-nadir*.

O Pt. 13 está praticamente sobre a água e a intensidade do retorno é extremamente alta quando comparada com a dos pontos vizinhos. A resposta mais forte está registrada antes do *bin* nominal e está relacionada ao menor tempo gasto para o sinal retornar ao satélite, o que indica proximidade com a água. Esta resposta está diretamente relacionada à presença de água em posição próxima do nadir.

Na Figura 5.18 (e) também há o registro de um pico único, porém este tem amplitude relativamente menor que a do ponto anterior. O seu pico está registrado próximo ao *bin* 105 e relaciona-se à proximidade com a água. Apesar de estar localizado sobre uma ilha fluvial o *footprint* do satélite abrange parte do curso d'água, razão pela qual ocorre o pico na FO. O último ponto da sequência está representado na Figura 5.18 (f) e está localizado a cerca de cinco quilômetros do RSF, resultando em uma FO complexa, com a presença de vários picos e baixa amplitude dos retornos.

Estação virtual de Pedras de Maria da Cruz: Saral

A análise do comportamento espaço-temporal foi feita para o ciclo 6 do satélite Saral, também em Pedras de Maria da Cruz (Figura 5.19). O primeiro ponto (Pt. 1) tem um pico próximo ao *bin* nominal (131)² e uma queda do sinal após o registro deste. O sensor Altika obteve respostas da água já no primeiro ponto. No eixo *y* constata-se que as amplitudes são baixas, o que é um indício de que as respostas não vieram do ponto nadir.

No ponto 17 (Pt. 17), quando comparado ao ponto anterior, nota-se que a amplitude do retorno é relativamente maior devido à captura das respostas especulares da água. Contudo, o pico foi registrado de maneira atrasada em relação ao *bin* nominal, na posição 140, o que pode estar relacionado com a interferência causada pela ilha fluvial e pelo banco de areia que ambos sobrepostos à pegada do satélite.

No ponto representado na Figura 5.19 (c), localizado sobre o canal mais estreito do rio nesta EV, a FO é muito parecida com a do ponto Pt. 17. Porém, a sua amplitude é ligeiramente menor devido à proporção da área de água recoberta pelo *footprint*. O

¹Originalmente o *bin* nominal do Envisat é o 46, mas foi deslocado para a posição 126 devido à criação da forma de onda de 256 *bins*.

²Originalmente o *bin* nominal do Saral é o 51, mas foi deslocado para a posição 131 devido a criação da forma de onda de 256 *bins*.

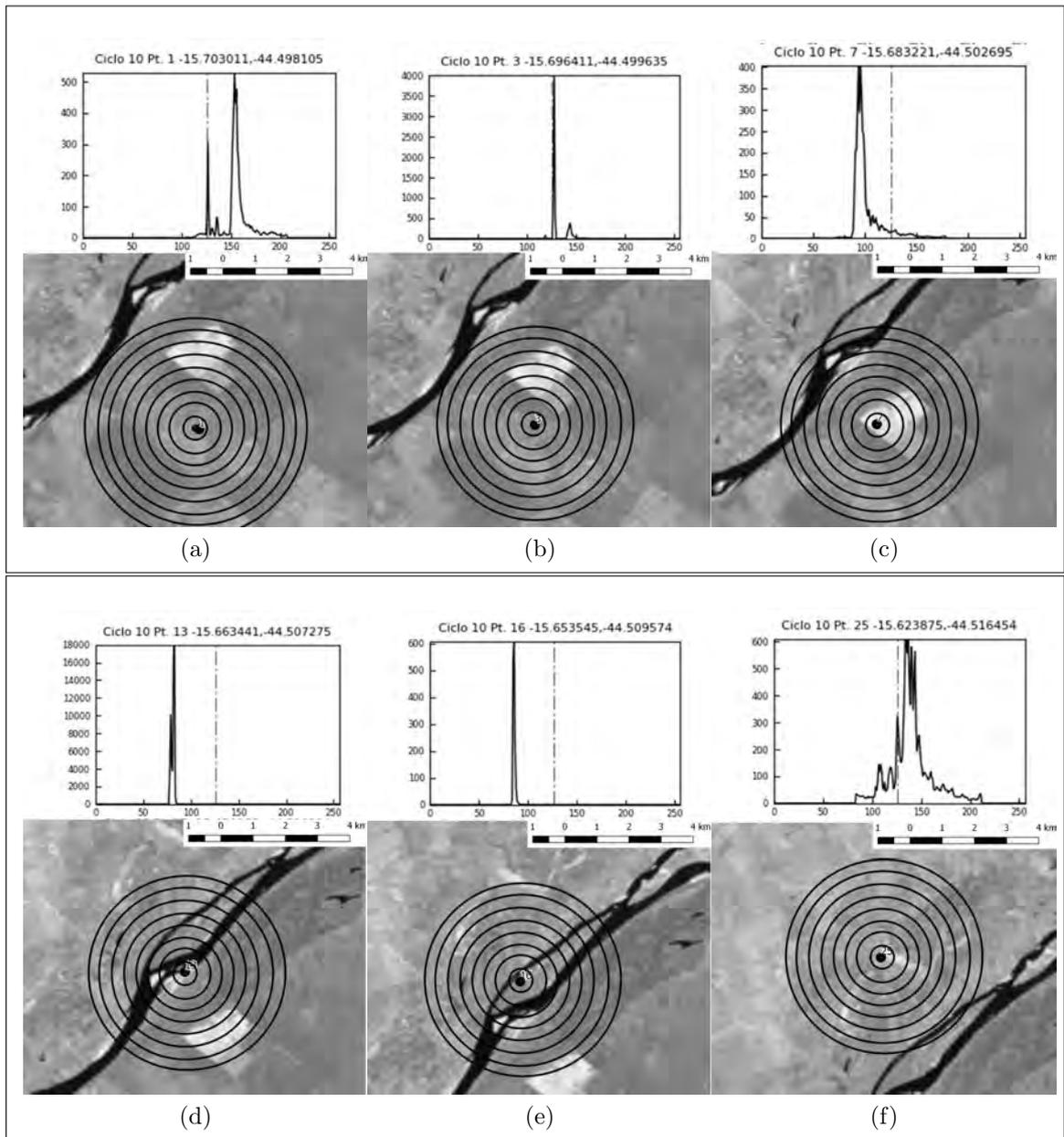


Figura 5.18: Evolução espaço-temporal na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz. Pontos extraídos do ciclo 10 do satélite Envisat, sobrepostos a banda do infravermelho da imagem Sentinel-2A e o *footprint* teórico. A forma de onda acima da imagem corresponde ao ponto extraído, e mostra a amplitude da resposta no eixo y e os *bins* no eixo x . A linha tracejada indica o *bin* nominal para este satélite.

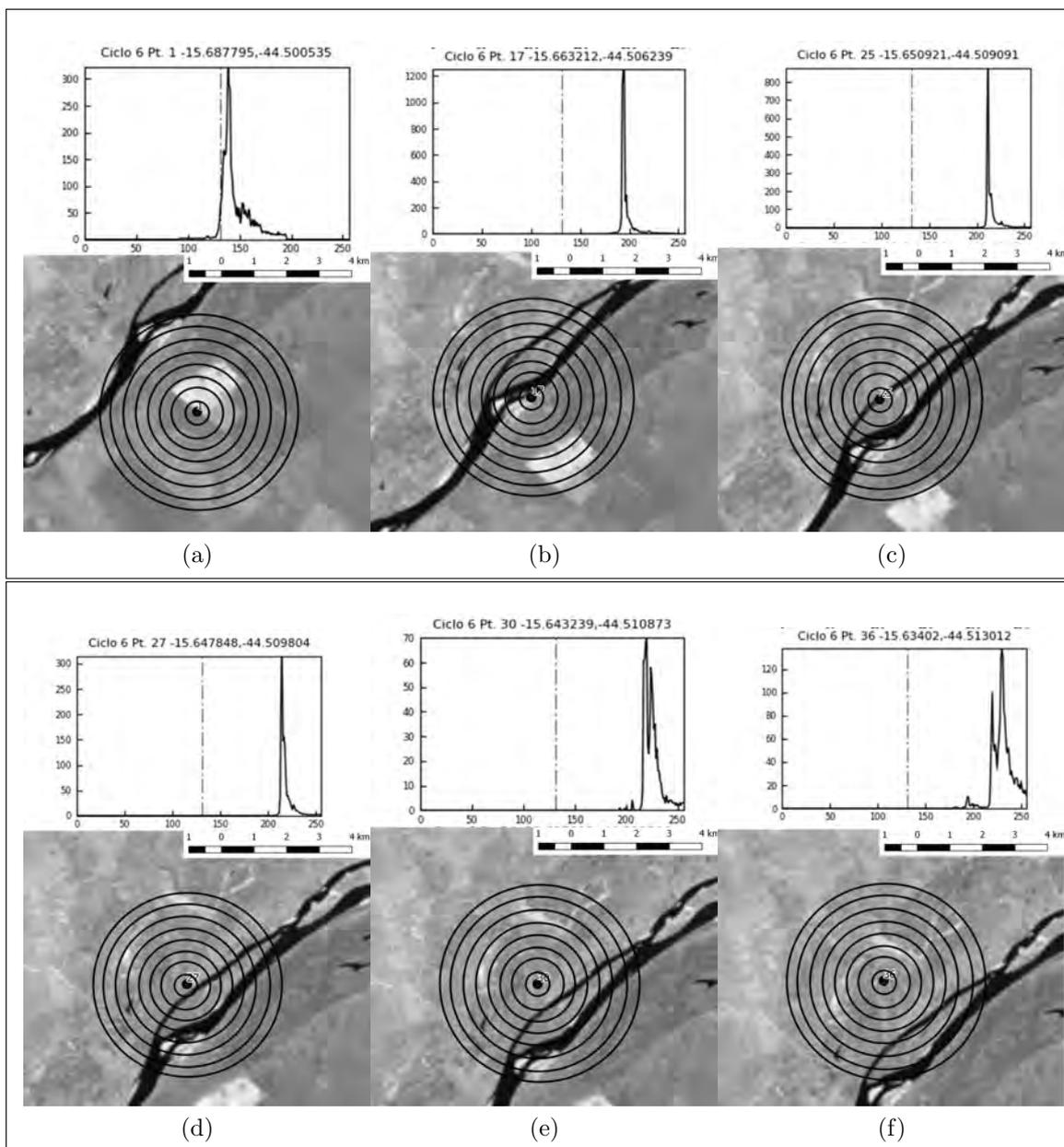


Figura 5.19: Evolução espaço-temporal na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz. Pontos extraídos para acompanhamento da evolução do sinal do radar altimétrico a bordo do Saral, sobrepostos a banda do infra-vermelho da imagem Sentinel-2A e o *footprint* teórico. A forma de onda acima da imagem corresponde ao ponto extraído, com amplitude no eixo y e os *bins* no eixo x . A linha tracejada indica o *bin* nominal para este satélite (131).

ponto seguinte, mais afastado do leito do rio (Figura 5.19 (d)) registra uma queda na amplitude do sinal, mas ainda assim mantém o padrão da FO. O sinal perde força na medida em que o satélite se afasta do rio e a FO passa a ter forma muito irregular, com a presença de mais de um pico. O mais forte destes foi registrado próximo ao *bin* (160) para o Pt. 36, relacionado ao tempo gasto para que as respostas vindas da água atinjam a antena do radar.

Estação virtual de Pedras de Maria da Cruz: Sentinel-3A

Os dados do Sentinel-3A também foram analisados na EV de Pedras de Maria da Cruz, porém o seu sensor é do tipo SAR nadir, que tem funcionamento diferente dos outros dois satélites. Além disso, a EV está em outra posição no rio, apesar de próxima daquela criada para Envisat/Saral. Para este satélite também foram selecionados e extraídos seis pontos na região da EV de Pedras de Maria da Cruz.

O ponto 1 (Pt. 1) está a cerca de três quilômetros do RSF, em uma área que pode conter água em alguns períodos do ano, por consistir na planície de inundação (Figura 5.20 (a)). Neste primeiro ponto a amplitude das respostas é relativamente baixa quando comparada aos outros pontos, o que sugere que a resposta da água veio da direção perpendicular ao deslocamento do satélite. O ponto 3 (Pt. 3) está mais próximo de algumas ocorrências de água relacionadas às áreas de inundação, nele foram registrados três picos na FO, um deles próximo ao *bin* nominal³ e o mais forte no *bin* 140 (Figura 5.20 (b)). A amplitude dos retornos no Pt. 3 foi relativamente superior à do Pt. 1 devido à maior proximidade com água na planície de inundação.

A FO do ponto seguinte (Pt. 3) tem um pico bem destacado antes do *bin* nominal (Figura 5.20 (c)). Na região de Pedras de Maria da Cruz a margem esquerda do RSF é bastante íngreme, além disso existem duas grandes ilhas fluviais. Como o satélite se desloca da margem direita para a esquerda a topografia é uma das causas do pico registrado prematuramente, fator ocasionado pela natureza do sensor SAR que sumariza e comprime os retornos com o auxílio do efeito *doppler*. O registro da FO da Figura 5.20 (c) ilustra esse efeito, o qual também pode ser verificado nos pontos oito e nove. O último ponto (Pt. 11), ilustrado na Figura 5.20 (f), tem o registro do pico bastante atrasado em relação ao *bin* nominal, efeito esse causado pelo afastamento do satélite em relação ao RSF e à captura de respostas vindas da água e da margem direita.

As margens com maior inclinação parecem intensificar as respostas retornadas para o satélite, com força superior à daquelas registradas por pontos vindos da água. Portanto, antes da utilização do Sentinel-3A é importante verificar as características da região da EV, a fim de evitar casos como os de Pedras de Maria da Cruz.

³Originalmente o *bin* nominal do Sentinel-3A é o 46, mas foi deslocado para a posição 126 devido a criação da forma de onda de 256 *bins*.

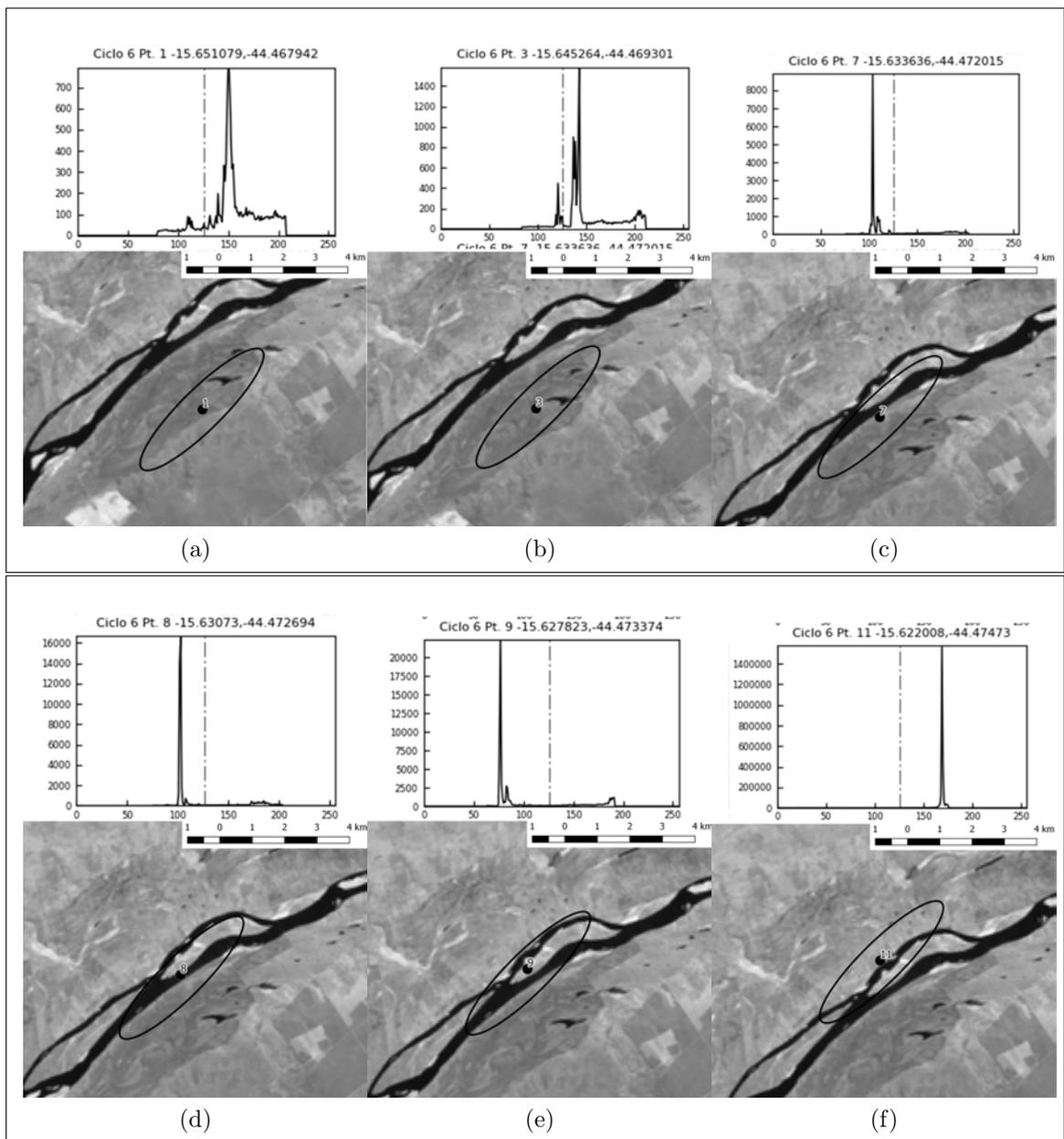


Figura 5.20: Evolução espaço-temporal na estação virtual de Pedras de Maria da Cruz. Pontos extraídos para acompanhamento da evolução do sinal do radar altimétrico a bordo do Sentinel-3A, sobrepostos a banda do infra-vermelho da imagem Sentinel-2A e o *footprint* teórico. A forma de onda acima da imagem corresponde ao ponto extraído, com amplitude no eixo y e os *bins* no eixo x . A linha tracejada indica o *bin* nominal para este satélite (126).

A Figura 5.21 representa os pontos extraídos para a realização das análises das FOs para a EV de Manga, para a qual também foi feita a análise da evolução espaço-temporal das FOs com o uso dos três satélites.

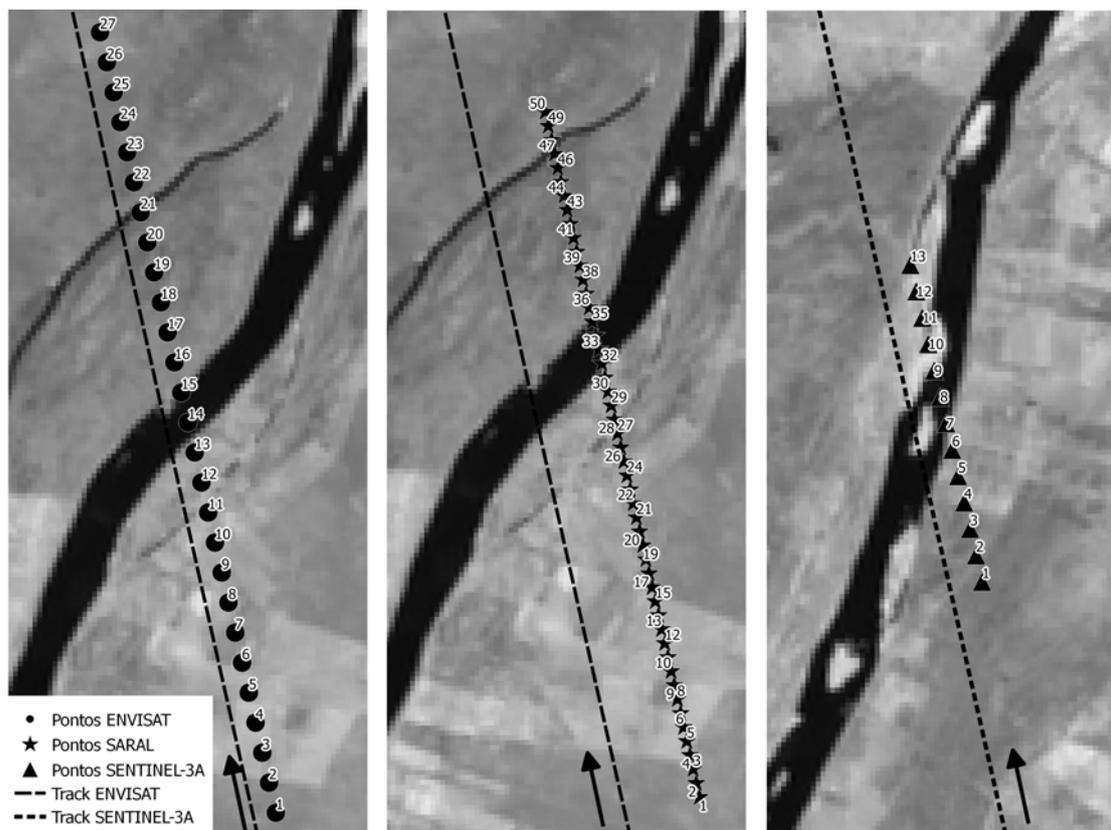


Figura 5.21: Pontos dos quais foram extraídas as formas de onda na estação virtual de Manga para os satélites Envisat (círculos), Saral (estrelas) e Sentinel-3A (triângulos). A seta preta indica o sentido de deslocamento dos satélites.

Estação virtual de Manga: Envisat

A Figura 5.22 contém seis pontos do ciclo 16 do satélite Envisat, sendo que o primeiro deles está a cerca de cinco quilômetros do curso d'água (Pt. 1). Apesar da distância ser grande, houve registro de respostas fortes localizadas no *bin* 140, que podem ser relacionadas à água, que foi registrada com um atraso em relação ao *bin* nominal. Isso indica que a resposta da água foi captada nos anéis mais externos do *footprint* gerado pelo sensor, o que é esperado nesta situação.

O ponto três (Pt. 3) está localizado ainda na margem esquerda do RSF, mas a uma distância mais próximo que o Pt. 1. Neste é possível identificar que a resposta mais forte está mais próxima do *bin* nominal do satélite. Outros picos menores podem ser observados na FO do Pt. 3 devido às interferências da superfície, contudo são menos significativos que os ocorridos na FO do Pt. 1.

Para o ponto sete (Pt. 7), localizado a cerca de dois quilômetros do RSF, o pico na

FO está à esquerda do *bin* nominal e a força dos retornos foi mais baixa do que aquela registrada no Pt. 3. A presença de uma ilha fluvial e de um banco de areia podem ter reduzido a intensidade das respostas que retornaram ao satélite. Além disso, este ciclo pode estar relacionado a um período de seca, o que pode influenciar no aumento da área do banco de areia e da exposição da ilha fluvial, o que também prejudica a qualidade do sinal.

O único ponto que está exatamente sobre a água é o 14 (Pt. 14), seus retornos têm maior intensidade quando comparados aos outros pontos, há um pico único que se destaca na FO (Figura 5.22 (d)). O satélite estava exatamente acima da superfície de água no momento de envio e captura dos pulsos, o que fez com que ele recebesse respostas da direção nadir. Essa situação é ideal para que se identifique a presença de água dentro do sinal registrado pelo satélite, uma vez que o retorno especular da água sobressai em relação às outras superfícies na banda Ku, quando vindo do nadir.

O ponto 21 (Pt. 21) também ocorre sobre a água, em um pequeno canal separado da calha principal do RSF por uma ilha fluvial. Mesmo para o canal mais estreito o sinal retornado é relativamente forte. Essa situação indica que, mesmo em um canal estreito, quando o satélite está exatamente acima da superfície, o sinal radar é capturado e o pico relacionado à água é visualmente identificado na FO.

O último ponto exposto no exemplo da EV de Manga é o Pt. 27, que está a cerca de três quilômetros do canal principal. Percebe-se que no sinal são registrados vários picos, os quais parecem se relacionar com os vários trechos do corpo d'água abrangidos pela FO em anéis diferentes. Porém, como estão distantes do centro do *footprint*, os retornos são relativamente fracos quando comparados com o dos outros pontos.

Estação virtual de Manga: Saral

Ao acompanhar a evolução espaço-temporal do sinal radar do primeiro ponto (Pt. 1) do Saral, observa-se que a FO apresenta três picos que se destacam, sendo um antes do *bin* nominal, seguido de um mais forte que se aproxima do *bin* nominal e um mais distante e menos intenso (Figura 5.23). Isso indica que respostas vindas da água chegaram a antena em tempos distintos. O segundo ponto ilustrado (Pt. 17) está mais próximo da água e nele são identificados três picos próximos ao *bin* nominal. Contudo a intensidade destes retornos é muito baixa, o que é um indício de que as respostas gravadas podem não ser da água ou que tem origem fora do nadir.

O ponto que ocorre exatamente sobre a água tem um pico bem claro (Pt. 35), mas não muito próximo do *bin* nominal (131). A resposta tem intensidade muito baixa, diferente do esperado nessa situação. Para o ponto 48 (Pt. 48), que ocorre sobre um canal mais estreito no RSF, a FO tem características próximas da esperada para medições feitas no ponto nadir, apesar de não ser possível afirmar que o pico registrado seja exatamente deste canal, em razão da área de abrangência do *footprint*. Este foi

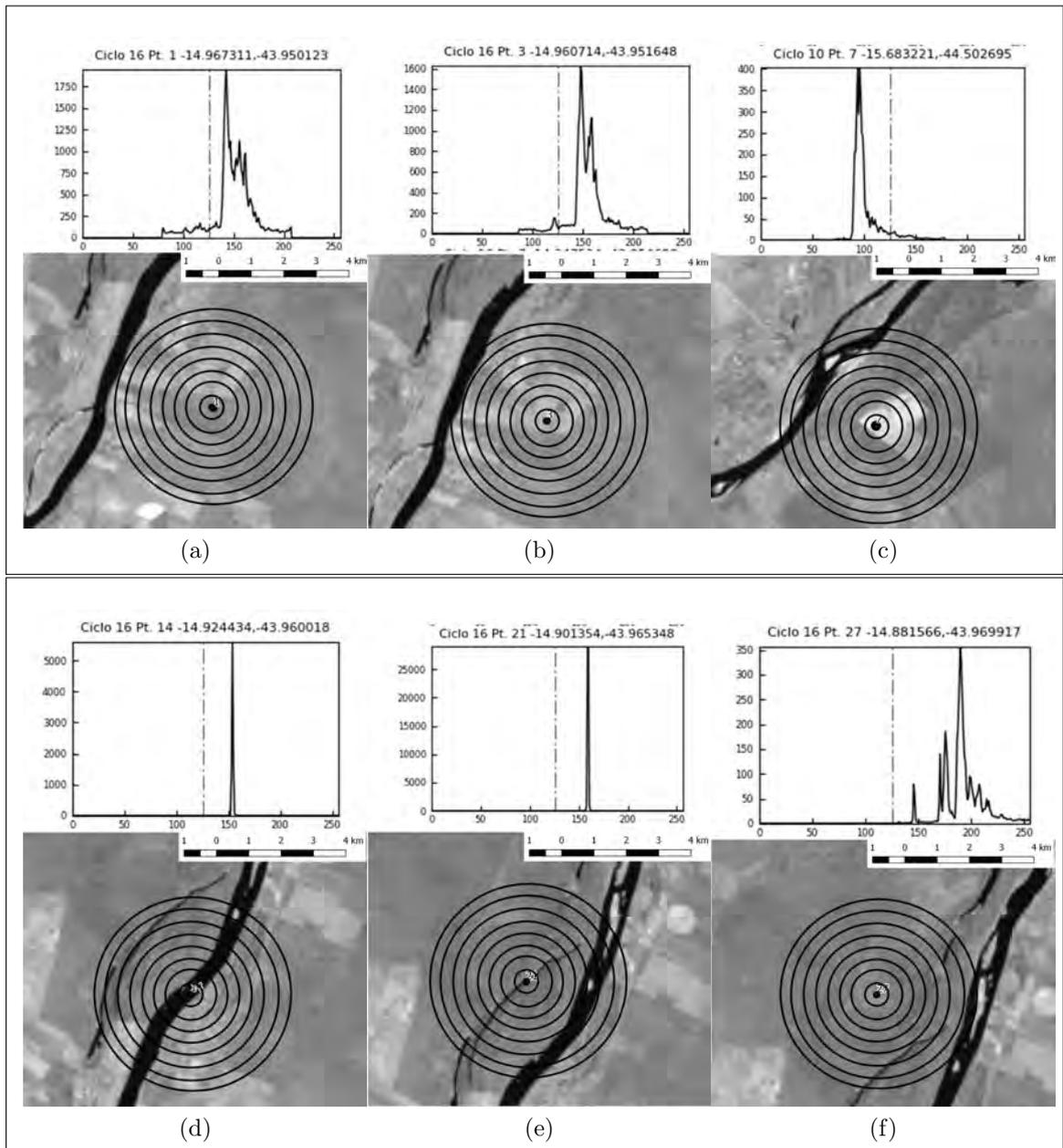


Figura 5.22: Evolução espaço-temporal na estação virtual de Manga. Pontos do Envisat, sobrepostos a banda do infra-vermelho da imagem Sentinel-2A e o *footprint* teórico. A forma de onda acima da imagem corresponde ao ponto extraído, com amplitude no eixo y e os *bins* no eixo x . A linha tracejada indica o *bin* nominal para este satélite (126).

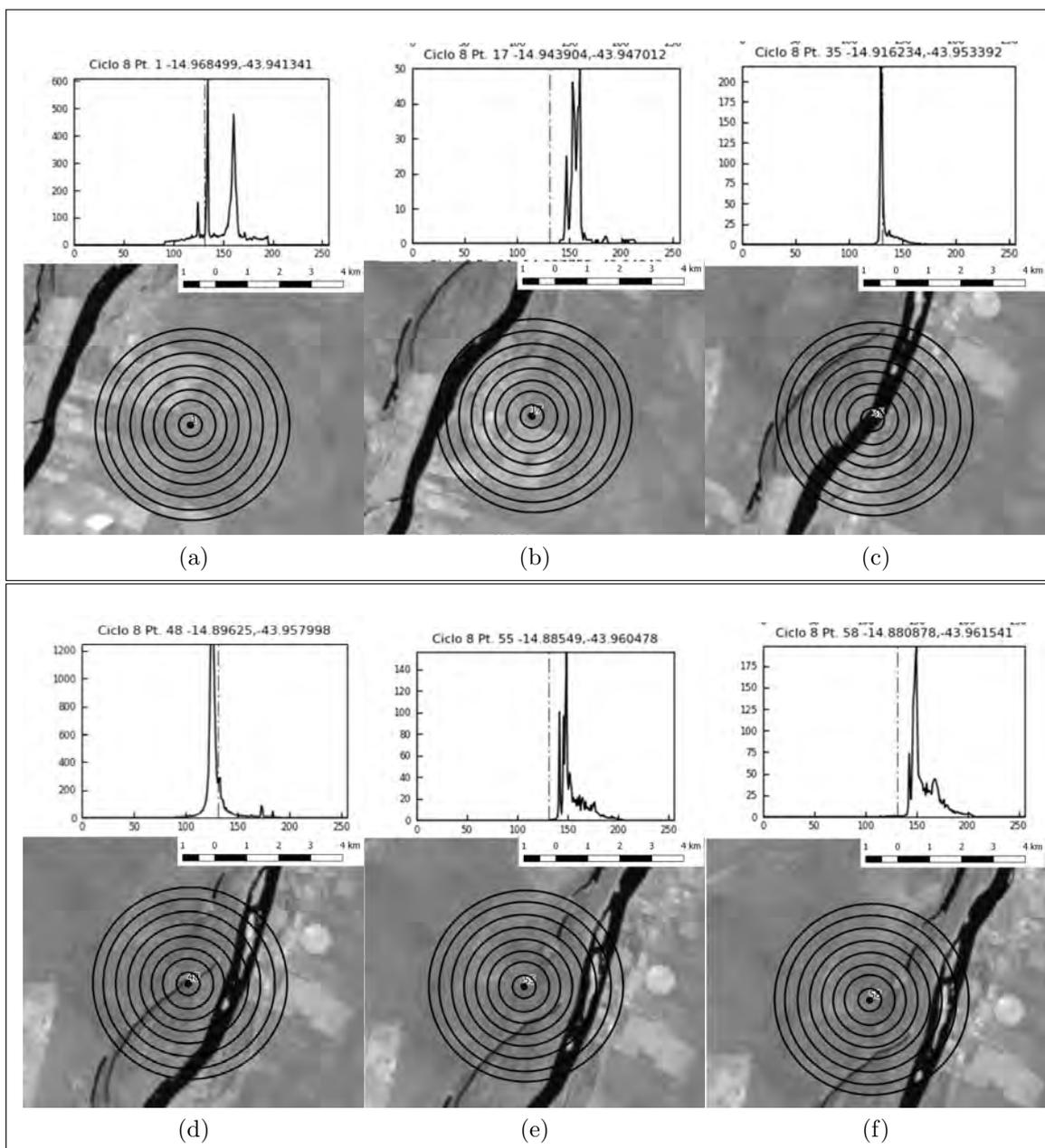


Figura 5.23: Evolução espaço-temporal na estação virtual de Manga. Pontos extraídos do Saral, sobrepostos a banda do infra-vermelho da imagem Sentinel-2A e o *footprint* teórico. A forma de onda acima da imagem corresponde ao ponto extraído, com amplitude no eixo y e os *bins* no eixo x . A linha tracejada indica o *bin* nominal deste satélite (131).

o único ponto dessa sequência que apresentou respostas condizentes com o esperado para áreas recobertas com água. Os dois últimos pontos ilustrados para o Saral na EV de Manga estão distantes da água e as respostas registradas foram de amplitude relativamente baixa, mas foram registrados alguns picos em suas FOs.

Com o uso do Saral há uma dificuldade em se analisar como o sinal radar se comportou na evolução espaço-temporal devido à não manutenção das características esperadas na FO. Como exposto em outras partes deste trabalho, o satélite Saral apresentou diversas falhas operacionais, o que comprometeu a qualidade de seus dados. Mesmo assim, é possível perceber em alguns pontos que, quando os problemas operacionais não afetaram o sistema, as repostas da FOs ficam dentro do esperado (Ex.: Pt. 48 da Figura 5.23 (d)).

Estação virtual de Manga: Sentinel-3A

A posição da EV de Manga para o Sentinel-3A é diferente daquela ocupada pelas EVs de Envisat e Saral (Figura 5.24). O primeiro dos seis pontos selecionados (Pt. 1) está a cerca de um quilômetro do RSF e a sua FO possui dois picos, sendo o mais forte deles localizado próximo ao *bin* 130. Isso indica um atraso no recebimento da resposta vinda da água em relação ao *bin* nominal, o que é esperado devido à distância do ponto em relação à água. Os valores de amplitude de respostas dos sinais são relativamente fortes e podem ser observados no eixo *y* do gráfico. A intensidade das respostas está relacionada às respostas vindas da água, dadas pela sobreposição da pegada do satélite com um dos trechos do rio.

O ponto seguinte (Pt. 3) tem seu pico mais próximo do *bin* nominal, isso devido a distância dele para o curso d'água ser menor. A amplitude do sinal é semelhante a do ponto anterior e condizente com as características do ambiente (Figura 5.24 (b)). Os pontos seis e sete (Pt. 6 e Pt. 7) estão sobre a água e ambos apresentam respostas muito fortes quando comparados aos demais pontos da sequência. Ademais, o pico mais forte dos Pts. 6 e 7, resultado da reflexão das micro-ondas da banda Ku pela água, está muito próximo do *bin* nominal (126), um indicativo de que as respostas mais fortes vieram, quase que em sua totalidade, do ponto nadir. Observa-se ainda, que há uma pequena diferença entre a localização dos picos da FOs dos Pt. 6 e Pt. 7, já que este último está mais próximo do *bin* nominal devido à sua maior sobreposição com a água.

Os dois últimos pontos estão fora da água (Pt. 11 e Pt. 13), mas o *footprint* do satélite está sobreposto à alguns trechos do rio (Figura 5.24 (e) e (f)), tanto na direção perpendicular como na direção de deslocamento do satélite. Para o ponto 13 isso fica evidente, como pode ser observado nas manchas mais escuras presentes na imagem, que correspondem à água e podem gerar reflexão forte, registradas na FO.

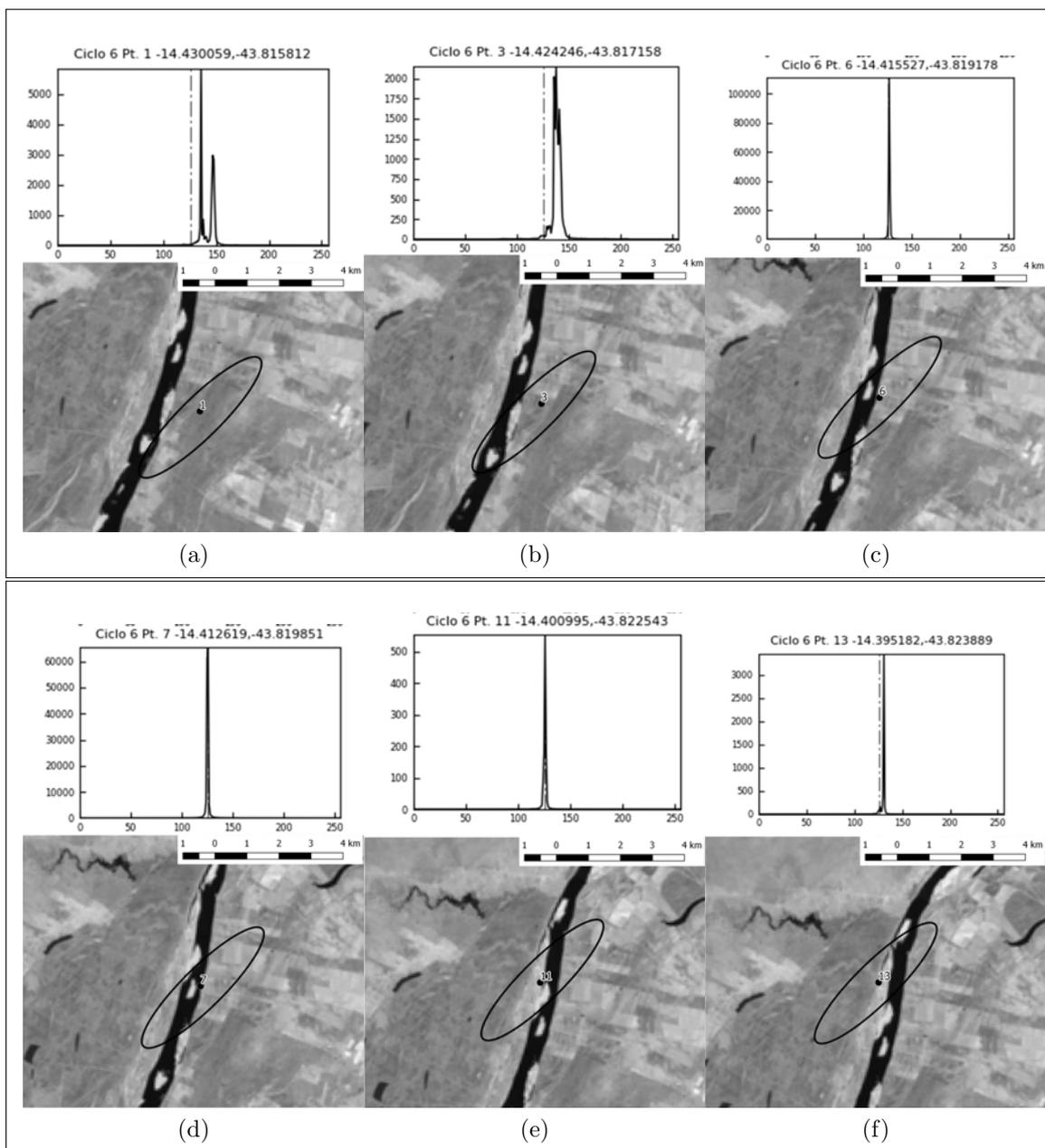


Figura 5.24: Evolução espaço-temporal na estação virtual de Manga. Pontos do Sentinel-3A, sobrepostos a banda do infra-vermelho da imagem Sentinel-2A e o *foot-print* teórico. A forma de onda acima da imagem corresponde ao ponto extraído, com amplitude no eixo y e os *bins* no eixo x . A linha tracejada indica o *bin* nominal para este satélite (126).

5.5 Tipos de formas de onda: síntese da relação entre forma de onda e distância ao centro do rio

Para sintetizar a relação entre a distância ao centro do rio e as FOs, foi feita a seleção dos pontos extraídos nos intervalos de um, dois, três e quatro quilômetros a partir da coordenada central do rio. Esse procedimento foi realizado para quatro EVs dos satélites Envisat e Saral. Para o Sentinel-3A essa análise foi desconsiderada pois os seus pontos só puderam ser extraídos no intervalo de um quilômetro em relação ao centro do rio.

A Figura 5.25 mostra as feições dos *buffers* utilizados para selecionar os pontos dos *shapefiles* de um dos ciclos do Envisat, na EV de Manga. Os pontos sobrepostos a cada um dos *buffers* foram identificados através do número do ponto. As suas respectivas FOs foram selecionadas e analisadas em relação ao número de picos. Esse processo foi feito para cerca de 35% do total de dados disponíveis para este trabalho (Tabela 5.4).

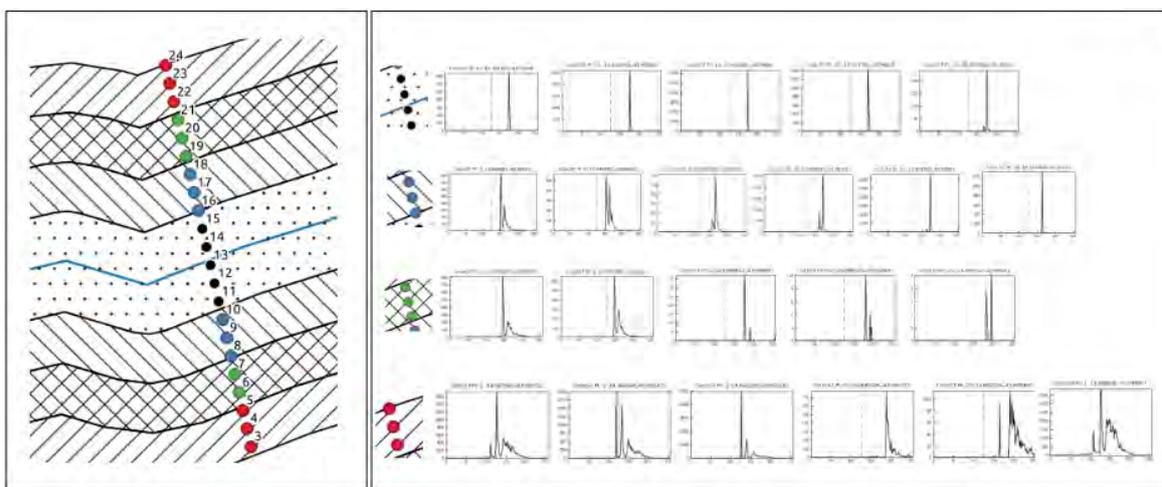


Figura 5.25: Pontos extraídos e suas formas de onda (FOs) de acordo com a distância em relação ao centro do rio. Os pontos estão dentro dos anéis de um quilômetro (preto), dois quilômetros (azul), três quilômetros (verde) e quatro quilômetros (vermelho). À direita estão as FOs correspondentes a cada um dos pontos extraídos para cada anel.

As FOs foram classificadas de acordo com a quantidade de picos presentes. Para isso foram criadas quatro categorias que são: 1 - pico único; 2 - dois picos; 3 - três picos; e 4 - quatro ou mais picos. A figuras 5.26 e 5.27 trazem o gabarito que serviu de base para a classificação das FOs, de cada um dos satélites, nas categorias propostas.

Tabela 5.4: Estações virtuais selecionadas para categorização do número de picos para cada faixa de distância e os respectivos ciclos amostrados.

| Satélite | Estação Virtual | Ciclos |
|-----------------|-------------------------|----------------|
| Envisat | Iguatama | 10, 14, 47, 71 |
| | Manga | 57, 68, 76, 85 |
| | Pedras de Maria da Cruz | 17, 32, 68, 71 |
| | Orocó | 12, 13, 54, 82 |
| Saral | São Romão | 2, 10, 12, 17 |
| | Pedras de Maria da Cruz | 6, 9, 10, 11 |
| | Manga | 6, 8, 10, 33 |
| | Orocó | 2, 6, 9, 11 |

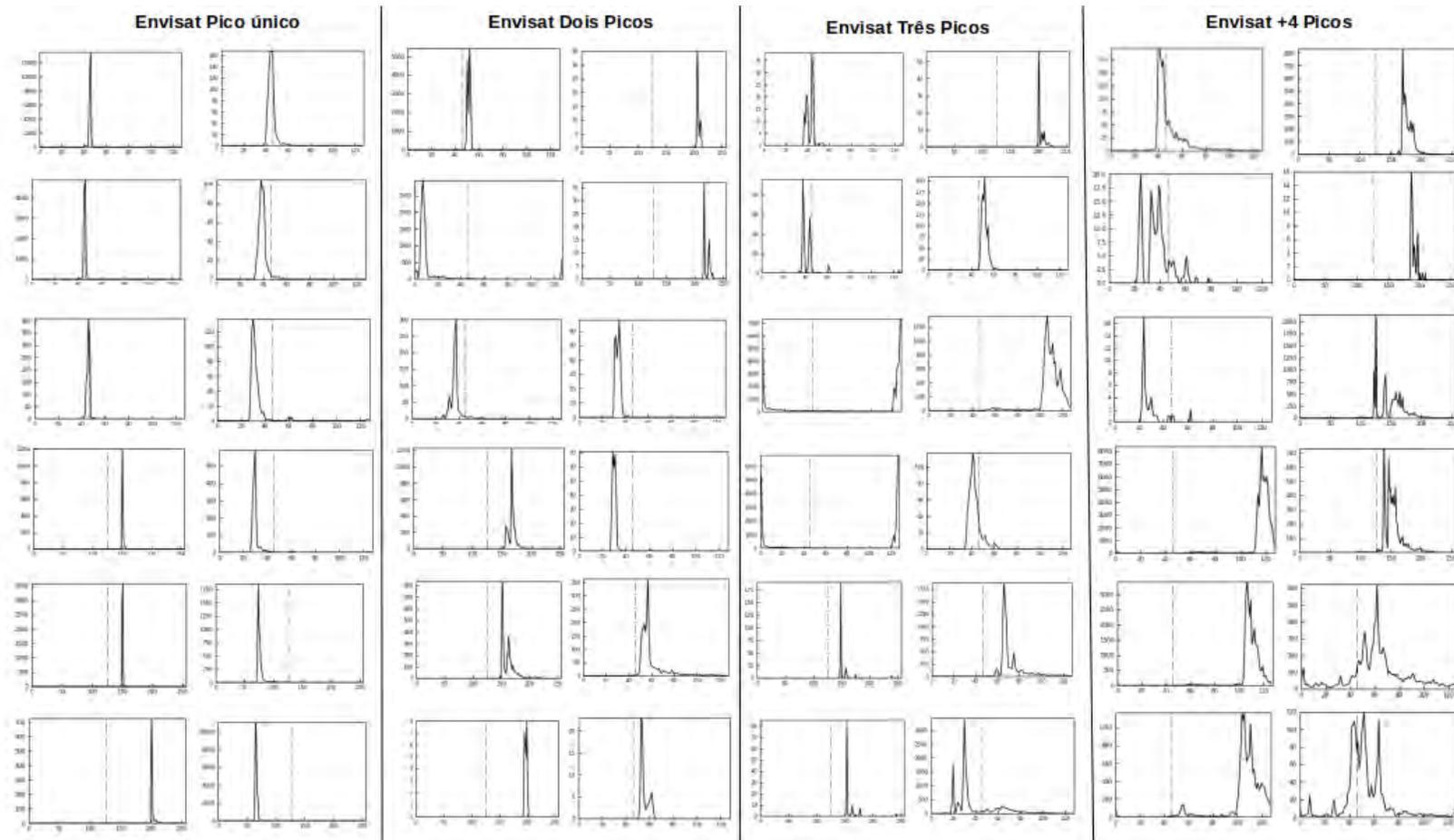


Figura 5.26: Gabarito para classificação das formas de onda (FOs) do Envisat em função do número de picos. Nesta figura estão apresentados diversos exemplos de FOs para as quatro categorias criadas: pico único, dois picos, três picos, quatro ou mais picos.

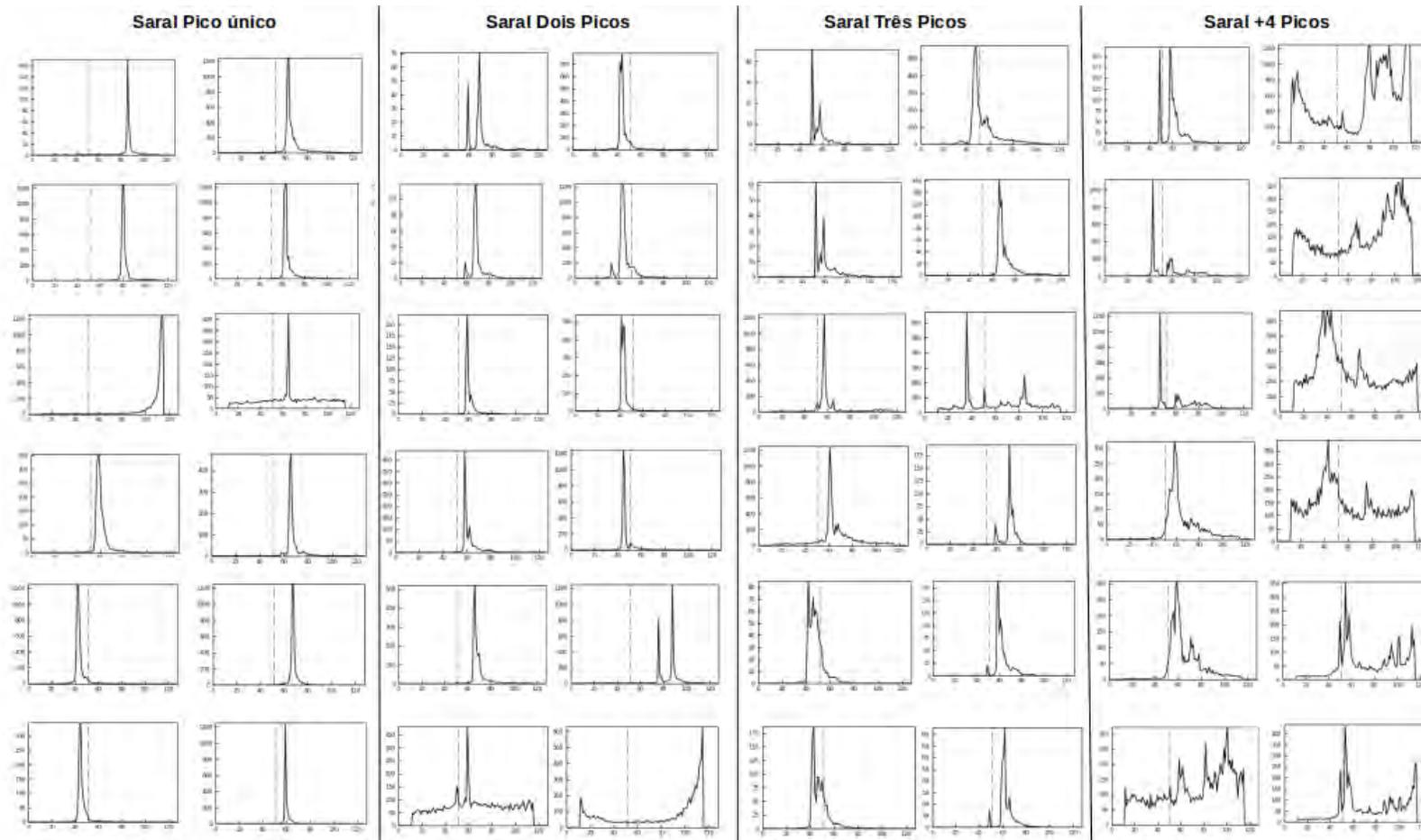


Figura 5.27: Gabarito para classificação das formas de onda (FOs) do Saral em função do número de picos. Nesta figura estão apresentados diversos exemplos de FOs para as quatro categorias criadas: pico único, dois picos, três picos, quatro ou mais picos.

As FOs selecionadas foram analisadas individualmente e sumarizadas em tabelas organizadas por EV e ciclo e suas FOs foram enquadradas em suas respectivas categorias (ex.: Tabela 5.5). Em seguida, para uma mesma EV todos os ciclos foram analisados de maneira conjunta e o percentual de pontos em cada uma destas categorias foi calculado (tabelas 5.6 e 5.8).

Tabela 5.5: Fragmento de um dos ciclos extraídos para a estação virtual de Pedras de Maria da Cruz, classificados em função do número de picos na faixa de um quilômetro em relação ao centro do rio.

| Ciclo | Pto | Único | Dois | Três | Quatro ou mais |
|-------|-----|-------|------|------|----------------|
| 6 | 15 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 6 | 16 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 17 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 18 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 27 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 28 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 29 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 30 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 9 | 31 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 9 | 32 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 24 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 25 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 26 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 27 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 28 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 29 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 30 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 27 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 28 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 29 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 30 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 31 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 11 | 32 | 0 | 0 | 0 | 1 |

5.5.1 Análise dos picos em função da distância para o satélite Envisat

A Tabela 5.6 contém as porcentagens de formas de onda classificadas em cada uma das categorias criadas. Esses resultados são dados para cada anel estabelecido, que variam de um a quatro quilômetros. Os dados estão dispostos para cada uma das EVs amostradas (Tabela 5.4).

Para as EVs amostradas, na faixa de um quilômetro predominam as FOs de pico

Tabela 5.6: Envisat

| Estação Virtual de Iguatama | | | | |
|------------------------------------|---------------|--------------|--------------|------------------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 52,00 | 40,00 | 8,00 | 0,00 |
| 2000 | 30,43 | 43,48 | 0,00 | 26,09 |
| 3000 | 14,29 | 28,57 | 0,00 | 52,38 |
| 4000 | 35,00 | 10,00 | 10,00 | 45,00 |

| Estação Virtual de Manga | | | | |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|------------------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 88,00 | 12,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2000 | 63,64 | 27,27 | 9,09 | 0,00 |
| 3000 | 9,68 | 16,13 | 48,39 | 25,81 |
| 4000 | 0,00 | 19,05 | 19,05 | 61,90 |

| Estação Virtual de Pedras de Maria da Cruz | | | | |
|---|---------------|--------------|--------------|------------------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 72,00 | 20,00 | 4,00 | 4,00 |
| 2000 | 28,57 | 17,86 | 14,29 | 39,29 |
| 3000 | 3,57 | 25,00 | 14,29 | 57,14 |
| 4000 | 7,69 | 23,08 | 11,54 | 57,69 |

| Estação Virtual de Orocó | | | | |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|------------------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 28,57 | 57,14 | 14,29 | 0,00 |
| 2000 | 23,81 | 19,05 | 23,81 | 33,33 |
| 3000 | 0,00 | 9,09 | 36,36 | 54,55 |
| 4000 | 0,00 | 0,00 | 4,76 | 95,24 |

único, a exceção de Orocó. Nesta última $\approx 57\%$ das FOs apresentaram dois picos. Em Iguatama, cerca de $\approx 40\%$ das FOs estão classificadas na categoria de dois picos, fato relacionado ao rio meandrante que pode gerar retornos de várias partes simultaneamente.

No anel com respostas na faixa dos dois quilômetros surgem FOs com repostas mais complexas, compostas por quatro ou mais picos, contudo predominam as mais simples. Em Iguatama e Manga, FOs com um ou dois picos correspondem, respectivamente, a $\approx 73\%$ e $\approx 90\%$ das FOs registradas. Pedras de Maria da Cruz e Orocó tiveram predomínio de quatro ou mais picos em suas FOs, porém ao somar as categorias de um e dois picos tiveram percentual de $\approx 43\%$ e $\approx 45\%$, respectivamente.

A partir do anel de três quilômetros predominam as FOs com quatro ou mais picos. Iguatama, mesmo nessa distância, possui $\approx 42\%$ das FOs com um ou dois picos. Em Manga, a única exceção neste conjunto de dados, o predomínio é das FOs de três picos, com $\approx 48\%$. Pedras de Maria da Cruz e Orocó tiveram, respectivamente, $\approx 57\%$ e 54% de suas FOs com quatro ou mais picos.

Para a maior distância em relação ao centro do rio, que foi de quatro quilômetros, o predomínio é das FOs com quatro ou mais picos. Contudo, Iguatama tem $\approx 45\%$ das suas FOs na categoria composta pela soma dos percentuais das categorias de um e dois picos. Nas EVs de Manga, Pedras de Maria da Cruz e Orocó os percentuais de FOs com quatro ou mais picos foi de $\approx 62\%$, $\approx 57\%$, $\approx 55\%$, respectivamente.

A Tabela 5.7 é o resultado da compilação dos dados de todas as EVs analisadas anteriormente. Foi mantida a mesma categorização das FOs: 1 - pico único; 2 - dois picos; 3 - três picos; e 4 - quatro ou mais picos. Assim, foi possível fazer uma avaliação global das respostas obtidas nas FOs amostradas para as EVs. O gráfico da Figura 5.28 mostra, de forma sintética as respostas obtidas para as quatro faixas de distância propostas, classificados de acordo com as categorias de FOs.

Tabela 5.7: Síntese das amostras dos dados gerados para as quatro estações do Envisat.

| Síntese das amostras nas EVs - Envisat. | | | | |
|--|---------------|--------------|--------------|------------------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 61,05 | 31,58 | 6,32 | 1,05 |
| 2000 | 38,68 | 26,42 | 11,32 | 23,58 |
| 3000 | 7,84 | 19,61 | 26,47 | 46,08 |
| 4000 | 10,23 | 13,64 | 11,36 | 64,77 |

Conforme pode ser visto na Tabela 5.7 e no Gráfico 5.28 os resultados globais foram similares aos obtidos nas análises individuais das EVs amostradas para o Envisat. Na faixa de um quilômetro predominam as FOs com um pico ($\approx 61\%$). Há também grande proporção de FOs de dois picos, sendo que a soma das duas categorias atinge $\approx 92\%$.

Com o aumento da distância para dois quilômetros ainda há o predomínio das FOs de pico único, $\approx 38\%$, e ao somar com as de dois picos a proporção atinge $\approx 64\%$. Assim, para extração de dados entre um e dois quilômetros, a maior parte das FOs terá de um a dois picos, o que é um bom indicativo da presença da água nas repostas capturadas pelo satélite e pode facilitar o uso da AS na estimativa da altitude dos corpos d'água.

Nos intervalos de três e quatro quilômetros de distância em relação ao centro do rio há o predomínio das repostas com quatro ou mais picos, com cerca de 64% das FOs classificadas nessa categoria para o anel mais distante. Há três quilômetros a proporção de FOs com três picos é de $\approx 26\%$ do total amostrado. Dessa forma, percebe-se que nas distâncias superiores a dois quilômetros a probabilidade se encontrar FOs com pico único, dois picos ou até mesmo três é baixa, fator que pode ser limitante a detecção da água na FO e, conseqüentemente, dificultador no processo de aplicação da AS.

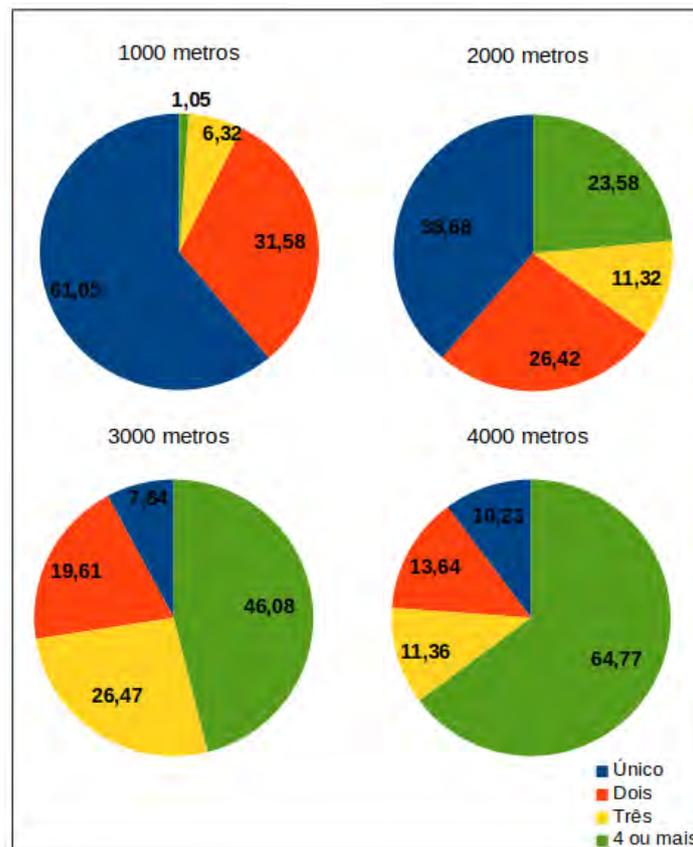


Figura 5.28: Gráfico com o percentual de FOs de acordo com a distância e o número de picos para o satélite Envisat.

5.5.2 Análise dos picos em função da distância para o satélite Saral

A Tabela 5.8 contém as porcentagens de FOs classificadas em cada uma das categorias criadas. Esses resultados são dados para cada anel estabelecido, que variam de um a quatro quilômetros, assim como foi feito para o Envisat. Os dados estão dispostos para cada uma das EVs amostradas (Tabela 5.4).

Tabela 5.8: Saral

| Estação Virtual de São Romão | | | | |
|------------------------------|--------|-------|-------|-----------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 69,74 | 23,68 | 6,58 | 0,00 |
| 2000 | 25,00 | 37,50 | 30,36 | 7,14 |
| 3000 | 10,20 | 53,06 | 14,29 | 22,45 |
| 4000 | 11,11 | 30,56 | 16,67 | 41,67 |

| Estação Virtual de Pedras de Maria da Cruz | | | | |
|--|--------|-------|-------|-----------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 11,11 | 16,67 | 3,70 | 68,52 |
| 2000 | 4,55 | 0,00 | 9,09 | 86,36 |
| 3000 | 6,82 | 27,27 | 6,82 | 63,64 |
| 4000 | 18,18 | 3,03 | 9,09 | 69,70 |

| Estação Virtual de Manga | | | | |
|--------------------------|--------|-------|-------|-----------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 45,45 | 12,73 | 9,09 | 32,73 |
| 2000 | 5,45 | 23,64 | 21,82 | 49,09 |
| 3000 | 2,13 | 10,64 | 10,64 | 76,60 |
| 4000 | 0,00 | 11,11 | 16,67 | 72,22 |

| Estação Virtual de Orocó | | | | |
|--------------------------|--------|-------|-------|-----------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 44,68 | 34,04 | 4,26 | 17,02 |
| 2000 | 14,89 | 25,53 | 21,28 | 38,30 |
| 3000 | 4,55 | 4,55 | 4,55 | 86,36 |
| 4000 | 2,17 | 2,17 | 8,70 | 86,96 |

Na faixa que dista um quilômetro em relação ao centro do rio predominam as FOs com pico único. A exceção neste caso foi a EV de Pedras de Maria da Cruz, em que $\approx 68\%$ das FOs têm quatro ou mais picos. Apesar do predomínio de FOs de pico único para a maior parte das EVs, há grande presença de FOs com quatro ou mais picos, como no caso de Manga, com $\approx 32\%$.

No anel de dois quilômetros há o predomínio de FOs com quatro ou mais picos. Apenas a EV de São Romão não se enquadra, nela $\approx 38\%$ das FOs possuem dois picos.

Manga e Orocó possuem, na soma das porcentagens de FOs de um e dois picos, $\approx 28\%$ e $\approx 39\%$, respectivamente.

Ao atingir três quilômetros predominam, também, FOs com quatro ou mais picos. Neste caso a EV de Orocó, por exemplo, $\approx 86\%$ das FOs estão nesta categoria. Em São Romão predominam FOs de dois picos, o que consiste em uma exceção nesta faixa de distância. Por fim, à quatro quilômetros de distância predominam FOs com quatro ou mais picos. Apesar disso, São Romão ainda tem cerca de 41% de suas respostas com um e dois picos.

A Tabela 5.9 é o resultado da compilação dos dados de todas as EVs analisadas anteriormente. Foi mantida a mesma categorização das FOs: 1 - pico único; 2 - dois picos; 3 - três picos; e 4 - quatro ou mais picos. Assim, foi possível fazer uma avaliação global das respostas obtidas nas FOs amostradas para as EVs. O gráfico da Figura 5.28 mostra, de forma sintética as respostas obtidas para as quatro faixas de distância propostas, classificados de acordo com as categorias de FOs.

Tabela 5.9: Síntese das amostras dos dados gerados para as quatro estações do Saral.

| Síntese das amostras nas EVs - Saral. | | | | |
|--|---------------|--------------|--------------|------------------------|
| Distância (m) | Único% | Dois% | Três% | Quatro ou mais% |
| 1000 | 45,26 | 21,55 | 6,03 | 27,16 |
| 2000 | 12,87 | 22,77 | 21,29 | 43,07 |
| 3000 | 5,91 | 24,19 | 9,14 | 60,75 |
| 4000 | 7,28 | 11,26 | 12,58 | 68,87 |

Para o Saral o resultado da análise global dos dados mostra que predomina o pico único ($\approx 45\%$) nas FOs na faixa de um quilômetro de distância em relação ao rio. Porém, nesta faixa a quantidade de FOs que possui quatro ou mais picos é de $\approx 27\%$, valor relativamente alto para esta distância. Na faixa dos dois quilômetros FOs com maior número de picos são mais frequentes, porém a soma das FOs com um e dois picos está próxima dos $\approx 35\%$ do total de FOs. Com três quilômetros de distância, as FOs com um ou dois picos somam cerca de 30% do total.

As FOs do Saral, a partir da distância de dois quilômetros, possuem grande domínio de FOs de quatro ou mais picos. Na distância de três quilômetros são $\approx 60\%$, já para a maior distância a proporção aumenta e atinge cerca 70% do total. Esse tipo de FO prejudica a aplicação da AS, por isso trabalhar com dados do Saral exige critérios mais complexos para filtrar os dados para a estimativa das altitudes do corpo d'água.

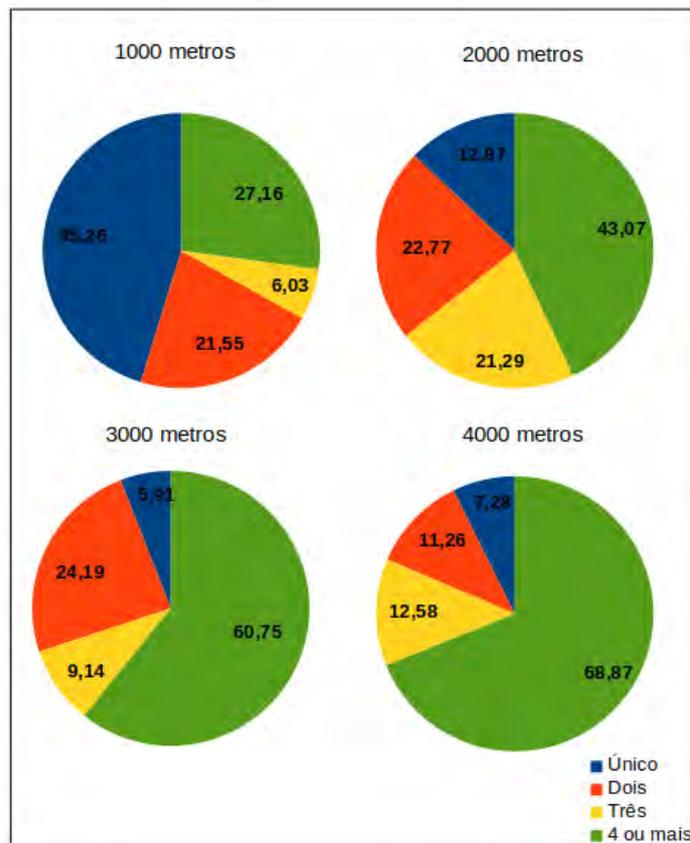


Figura 5.29: Gráfico com o percentual de FOs de acordo com a distância e o número de picos para o satélite Envisat.

Capítulo 6

Considerações Finais

A altimetria por satélite radar é bastante promissora, por ser ainda uma área pouco explorada e com perspectivas de crescimento, com o desenvolvimento de novas tecnologias e os lançamentos de satélites programados para os próximos anos. Uma das grandes vantagens dessa tecnologia está no baixo custo para o usuário da altimetria por satélite radar (AS) em relação ao método convencional de obtenção do nível de água, uma vez que os dados são fornecidos de forma gratuita pelas organizações envolvidas. Ademais, o tempo entre a obtenção do dado e a sua disponibilização para o público pode acontecer, para os dados com menor processamento, em questão de poucas horas. Outra vantagem da AS está na geração de dados de nível referenciados ao elipsoide, o que facilita a comparação entre diferentes pontos ao longo de um rio. Os dados podem, ainda, ser inseridos e comparados com dados globais de monitoramento de nível, devido a utilização de dados referenciados a um elipsoide.

Neste trabalho foi desenvolvido um método próprio que permitiu monitorar o Rio São Francisco através da criação de estações virtuais de monitoramento nos locais que atendiam aos critérios estabelecidos. Os resultados mostraram que a AS pode ser utilizada para a medição do nível em diversos contextos, que variam de acordo com a forma e largura do canal, topografia e cobertura do solo das margens do rio. Assim, o método desenvolvido pode ser replicados em outros trabalhos que tenham por objetivo medir o nível de cursos d'água ou até mesmo como um processo inicial de melhoria dos métodos de obtenção e tratamento dos dados de AS.

A validação dos dados é uma outra questão relevante e que foi tratada neste trabalho. Foram realizados três tipos de validação, uma a partir da correlação, outra com o cálculo do Erro Médio Quadrático Relativo a terceira com o Absoluto (EMQR e EMQA). A correlação foi utilizada para analisar se os dados das EIs e das EVs variam em proporções similares. Já o EMQR viabilizou a comparação dos dados *in situ* e dos obtidos por AS através do ajuste das medições, uma vez que para a grande maioria das EI não existe referência de nível global (RNG). Esta forma de validação é a mais

comumente utilizada nos trabalhos deste tipo. Uma alternativa a essa forma de validar os dados é o uso do EMQA, que permite comparar diretamente as medidas das EI e EV, mas necessita da RNG nas EVs.

O uso do EMQA para a validação seria o mais interessante por permitir a comparação direta dos dados. Neste trabalho o EMQA foi utilizada na validação de algumas EVs. Para isso foi necessário corrigir as medidas *in situ* em função da RNG e também em função da distância existente entre EI e EV, nos casos em que estas não estão na mesma seção do rio. Neste ultimo caso foi medida a diferença entre os níveis nos dois locais na mesma data. Nos casos em que a variação de nível nas duas estações ocorre na mesma proporção, esta é uma solução para corrigir a diferença altimétrica entre os dois pontos. Contudo, a variação de nível não é uniforme ao longo do rio e depende de características como a forma e o tipo do canal e também das contribuições laterais oriundas de outros cursos d'água que estejam entre a EV e a EI. Mesmo com as limitações para o cálculo do EMQA, foi possível concluir que a validação com esta é mais fidedigna que EMQR, sendo que esta ultima subestima os erros de medição do nível d'água.

Para estimar as altitudes foi utilizado o algoritmo ICE-1 e também a aplicação do algoritmo RANSAC sobre os resultados do primeiro. Para conjuntos de dados em que há erros grosseiros mais evidentes, com o caso do Saral, o RANSAC melhorou a precisão dos níveis calculados pelo ICE-1. Por outro lado, nos casos em que os dados do satélite são muito consistentes e apresentam poucos erros grosseiros, o RANSAC não trouxe melhorias, como foi o caso das estimativas geradas com o Envisat. Portanto, é necessário avaliar a dispersão dos dados para decidir qual dos dois métodos é mais eficiente para estimar a altitude gerada por um satélite.

As FOs podem ser utilizadas para acompanhar a evolução do sinal radar ao longo de um *track* do satélite. Esse tipo de dado contribuiu para entender como o satélite capta os sinais vindos da superfície e como a água se apresenta. O sentido de deslocamento do satélite não influenciou suas respostas, para o modo de operação LRM (Satélite de Pulso Limitado de Baixa Resolução). Por outro lado, para os dados obtidos com a tecnologia SAR apresentam limitações quando a variação da topografia é abrupta e resulta na perda do sinal retornado. Assim, o sentido da órbita é um fator que deve ser considerado na escolha dos pontos de criação das EVs para satélites do tipo SAR, como o caso do Sentinel-3A. As FOs do Envisat, na maioria dos casos, apresentam um padrão: quanto mais distante o ponto está da água, menor é a amplitude e mais distante do *bin* nominal o pico é registrado. Por outro lado, o Saral não apresentou este tipo de comportamento ao longo dos ciclos analisados. A identificação de padrões nas FOs do Saral é complexo. O Sentinel-3A apesar de também ter falhas significativas em muitas das EVs, apresentou uma maior sensibilidade à presença da água, que refletiram

em suas FOs, aonde são registrados picos extremamente altos quando da presença de água em sua pegada.

Em relação as distâncias de extração dos dados, para Envisat e Saral é indicada a extração a uma distância máxima de dois quilômetros em relação ao centro do curso d'água. Isso porque neste intervalo as respostas retornadas ao sensor são mais simples com a presença de poucos picos nas FOs, indicativo da presença de água dentro da pegada do satélite. Pontos localizados em regiões mais distantes do rio geram respostas mais heterogêneas e complexas, com a presença de vários picos, o que dificulta a identificação das respostas vindas da água. Para os três sensores, quando os pontos estão localizados exatamente sobre a água, situação esta difícil de ocorrer em rios de pequeno e médio porte, um pico único na FO é facilmente identificado devido à reflexão especular da água no ponto nadir. A identificação desta situação, através da análise das FOs, pode contribuir na seleção de pontos ideais para estimar as altitudes com os *retrackers* existentes.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O uso da altimetria radar por satélite no RSF e em rios de porte semelhante ao dele é encorajado em trabalhos futuros. Dentre os satélites testados neste trabalho o Envisat foi o que retornou os melhores resultados. Seus dados podem ser utilizados para gerar séries temporais do nível dos cursos d'água ou lagos. O Saral apresenta como ponto positivo a possibilidade de complementação da série temporal do Envisat, pois ocupam as mesmas órbitas. Quanto ao Sentinel-3A, é necessário que tenhamos mais alguns ciclos para avaliar, de forma mais precisa, a sua eficiência. Com base nos resultados obtidos neste trabalho constatou-se que a principal limitação está na topografia das margens do rio. Estudos que lidem com a abordagem dos efeitos topográficos nas medições do Sentinel-3A seriam de grande contribuição para futuros avanços em seu uso.

Devido às potencialidades e à possibilidade de evolução dos sensores radar nos próximos anos, além da grande quantidade de missões presentes e futuras, a AS tende a se tornar cada vez melhor. Problemas como a frequência temporal poderão ser sanados com estudos multi-missão e os de precisão pela melhoria dos instrumentos dos sensores. Neste sentido são encorajados novos trabalhos que abordem a hidrologia continental, tanto com a aplicação direta da altimetria, como no desenvolvimento de novas técnicas que visem melhor aproveitar os dados altimétricos.

Trabalhos que abordem a correção da diferença de nível entre EI e EV são de grande valia para a AS em regiões continentais. O nivelamento das EI, com o uso de receptores GPS geodésico e a posterior medição do nível na EV poderão contribuir

para o processo de validação dos dados. A partir dos dados adquiridos em campo um modelo da variação do nível de um ponto do rio (EI) em função do outro (EV) pode ser gerado. Para esse tipo de trabalho é necessário realizar medições de nível, nos dois pontos de interesse simultaneamente e em várias campanhas de campo, de preferência em períodos que haja variação de nível no rio. Uma sugestão para isso é realizar medições nas quatro estações do ano, desta forma a chance de o rio apresentar variações de nível é maior, o que contribuí para a geração de um modelo. Ainda neste sentido, o desenvolvimento de métodos de interpolação das altitudes entre as estações podem ser de grande valia, contudo é necessário considerar fatores referentes a contribuições laterais, formas do canal e variação do perfil transversal próximo dos pontos de medição do rio.

As FOs, para os dados do Envisat, podem ser utilizadas na construção de filtros de seleção e extração dos dados altimétricos. A existência de um padrão de respostas possibilita a construção de métodos automatizados que tenham o objetivo de selecionar os dados com maior probabilidade de conter água. Mesmo que os dados do Saral e Sentinel-3A não permitam a realização deste tipo de abordagem, outros satélites, que serão lançados, como Sentinel-3C, SWOT e JASON-CS (Sentinel-6), por exemplo, poderão ter seus dados testados em relação às FOs. Assim, a exploração das FOs consiste em um grande campo de pesquisa, que poderá contribuir com o desenvolvimento da AS aplicada à hidrologia continental. Por fim, uma outra linha de trabalhos, que não está dentro das competências das geociências, relacionam-se à exploração dos estudos físicos do comportamento de onda dos sensores a bordo dos satélites. O melhor entendimento e a busca pela criação de métodos de processamento dos dados emitidos na forma de pulsos, além dos estudos em relação à interação destes com as diversas superfícies, pode contribuir com avanços quando do tratamento e das correções dos dados brutos.

Referências

- Abreu, L. G. Á. d. C. e P. Maillard (2014). A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in brazil. In *SPIE Remote Sensing*, pp. 92391B–92391B. International Society for Optics and Photonics.
- ANA (2011). *Orientações para elaboração do relatório de instalação de estações hidrométricas*. Brasília: Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica (SGH).
- ANA (2016). Portal hidroweb. <http://www.hidroweb.ana.gov.br>. Acessado em 20/05/2016.
- Baker, S., O. Bombaci, C. Zeli, P. Venditti, O. Zanife, B. Soussi, J. Dumont, J. Stum, M. Milagro-Perez, e J. Benveniste (2002). *ENVISAT RA2 / MWR Product Handbook*. Paris: ESA.
- Bao, L., Y. Lu, e Y. Wang (2009). Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms. *Progress in Natural Science* 19(2), 195–203.
- Becker, M., J. S. da Silva, S. Calmant, V. Robinet, L. Linguet, e F. Seyler (2014). Water level fluctuations in the congo basin derived from envisat satellite altimetry. *Remote Sensing* 6(10), 9340–9358.
- Benetti, A. e F. Bidone (1993). O meio ambiente e os recursos hídricos. *Hidrologia Ciência e Aplicação* 17(3), 850–875.
- Bergé-Nguyen, M., A. Cazenave, A. Lombard, W. Llovel, J. Viarre, e J.-F. Cretaux (2008). Reconstruction of past decades sea level using thermosteric sea level, tide gauge, satellite altimetry and ocean reanalysis data. *Global and Planetary Change* 62(1), 1–13.
- Berry, P. (2006, september). Two decades of inland water monitoring using satellite radar altimetry in: 15 years of progress in radar altimetry. In *Proc. Symp., Venice Lido, Italy*, pp. 13–18.

- Berry, P., J. Garlick, J. Freeman, e E. Mathers (2005). Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophysical Research Letters* 32(16), 1–4.
- Biancamaria, S., F. Frappart, A.-S. Leleu, V. Marieu, D. Blumstein, J.-D. Desjonquères, F. Boy, A. Sottolichio, e A. Valle-Levinson (2017). Satellite radar altimetry water elevations performance over a 200 m wide river: Evaluation over the garonne river. *Advances in Space Research* 59(1), 128–146.
- Birkett, C. (1995a). The global remote sensing of lakes, wetlands and rivers for hydrological and climate research. In *Proceedings of IEEE IGARSS Conference*, Firenze.
- Birkett, C. (1995b, November). The global remote sensing of lakes, wetlands and rivers for hydrological and climate research. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS 95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, International*, pp. 1979–1981.
- Birkinshaw, S., G. O’Donnell, P. Moore, C. Kilsby, H. Fowler, e P. Berry (2010). Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the mekong river. *Hydrological Processes* 24(26), 3811–3825.
- Blarel, F., F. Frappart, B. Legrésy, D. Blumstein, C. Fatras, E. Mougin, F. Papa, C. Prigent, F. Remy, e F. Nino (2016, Agosto). Radar altimetry backscattering signatures at ka, ku, c and s bands over land. In *Living Planet Symposium*, Volume 740, pp. 426. LEGOS.
- Boergens, E., D. Dettmering, C. Schwatke, e F. Seitz (2016). Treating the hooking effect in satellite altimetry data: a case study along the mekong river and its tributaries. *Remote Sensing* 8(2), 1–22.
- Bolles, R. C. e M. A. Fischler (1981). A ransac-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data. In *IJCAI*, Volume 1981, pp. 637–643.
- Bronner, E., A. Guillot, N. Picot, e J. Noubel (2013). *SARAL/AltiKa Products Handbook*. Toulouse: Centre National d’Etudes Spatiales.
- Brown, G. S. (1977). The average impulse response of a rough surface and its applications. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* 25(1), 67–74.
- Calmant, S. e F. Seyler (2006). Continental surface waters from satellite altimetry. *Comptes Rendus Geoscience* 338(1), 1113–1122.
- Calmant, S., F. Seyler, e J. F. Cretaux (2008). Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. *Surveys in Geophysics* 29(4-5), 247–269.

- Carver, K. R., C. Elachi, e F. Ulaby (1985). Microwave remote sensing from space. *Proceedings of the IEEE* 73(6), 970–996.
- CBHRV (2015). Comitê da bacia hidrográfica do rio das velhas. <http://cbhvelhas.org.br/a-bacia-hidrografica-do-rio-das-velhas>. Acessado em 05/03/2016.
- CBHSF (2004). *Plano de Recursos Hídricos da Bacia hidrográfica do Rio São Francisco (2004-2013)*. Belo Horizonte: Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco.
- CBHSF (2015). *Plano de Recursos hidricos da Bacia Hidrografica do Rio Sao Francisco revisao 2016-2025*. Salvador: Nemus.
- Chelton, D., J. Ries, B. Haines, L. Fu, e P. Callahan (2001). *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*, Chapter Satellite Altimetry, pp. 1–131. San Diego, USA: Academic Press.
- Chelton, D. B., E. J. Walsh, e J. L. MacArthur (1989). Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry. *Journal of atmospheric and oceanic technology* 6(3), 407–438.
- Costi, A. C. Z. (2013). *Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica*. Ph. D. thesis, Universidade de Brasília.
- Crétaux, J.-F., W. Jelinski, S. Calmant, A. Kouraev, V. Vuglinski, M. Bergé-Nguyen, M.-C. Gennero, F. Nino, R. A. Del Rio, A. Cazenave, *et al.* (2011). Sols: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in space research* 47(9), 1497–1507.
- da Silva, J. S., S. Calmant, F. Seyler, O. C. Rotunno Filho, G. Cochonneau, e W. J. Mansur (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.
- da Silva, V. d. P. R. (2004). On climate variability in northeast of brazil. *Journal of Arid Environments* 58(4), 575–596.
- da Silva, V. d. P. R., S. de Oliveira, A. Hoekstra, J. Dantas Neto, J. H. Campos, C. Braga, L. E. de Araújo, D. d. O. Aleixo, J. I. de Brito, e M. D. de Souza (2016). Water footprint and virtual water trade of brazil. *Water* 8(11), 517.
- Davis, C. H. (1995). Growth of the greenland ice sheet: a performance assessment of altimeter retracking algorithms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 33(5), 1108–1116.

- Davis, C. H. (1997). A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeters. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 35(4), 974–979.
- de Oliveira, L. M., P. Maillard, e É. J. de Andrade Pinto (2016). Modeling the effect of land use/land cover on nitrogen, phosphorous and dissolved oxygen loads in the velhas river using the concept of exclusive contribution area. *Environmental monitoring and assessment* 188(6), 333.
- de Souza, N. L., A. Holtz, J. A. Martins, e J. Augusto (1976). *Hidrologia básica*. Brasília: Blucher.
- Duan, Z. e W. Bastiaanssen (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment* 134, 403–416.
- Dubey, A. K., P. Gupta, S. Dutta, e R. P. Singh (2015). Water level retrieval using saral/altika observations in the braided brahmaputra river, eastern india. *Marine Geodesy* 38(sup1), 549–567.
- Egido, A. e W. H. Smith (2017). Fully focused sar altimetry: Theory and applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 55(1), 392–406.
- Enjolras, V. M. e E. Rodriguez (2009). Using altimetry waveform data and ancillary information from srtm, landsat, and modis to retrieve river characteristics. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 47(6), 1869–1881.
- ESA (2014). European space agency. <http://www.esa.int/ESA>. Acessado em: 10/12/2014.
- Fatras, C., F. Frappart, E. Mougin, V. Marieu, A. Diepkilé, F. Blarel, e P. Borderies (2015). Radar altimetry backscattering signatures at ka, ku, c, and s bands over west africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 83, 96–110.
- Fenoglio-Marc, L., S. Dinardo, R. Scharroo, A. Roland, M. D. Sikiric, B. Lucas, M. Becker, J. Benveniste, e R. Weiss (2015). The german bight: A validation of cryosat-2 altimeter data in sar mode. *Advances in Space Research* 55(11), 2641–2656.
- Fischler, M. A. e R. C. Bolles (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* 24(6), 381–395.

- Frappart, F., S. Calmant, M. Cauhopé, F. Seyler, e A. Cazenave (2006). Preliminary results of envisat ra-2-derived water levels validation over the amazon basin. *Remote sensing of Environment* 100(2), 252–264.
- Frappart, F., K. D. Minh, J. L’Hermitte, A. Cazenave, G. Ramillien, T. Le Toan, e N. Mognard-Campbell (2006). Water volume change in the lower mekong from satellite altimetry and imagery data. *Geophysical Journal International* 167(2), 570–584.
- Frappart, F., F. Seyler, J.-M. Martinez, J. G. Leon, e A. Cazenave (2005). Floodplain water storage in the negro river basin estimated from microwave remote sensing of inundation area and water levels. *Remote Sensing of Environment* 99(4), 387–399.
- Fu, L. L. e P.-Y. Le Traon (2006). Satellite altimetry and ocean dynamics. *Comptes Rendus Geoscience* 338(14), 1063–1076.
- Galvêncio, J. e M. de Moura (2010). Detecting hydroclimatic changes using spatio-temporal analysis in the sub-medium são francisco-pe basin, brazil. *Journal of Environmental Hydrology* 18(1), 1–13.
- Garambois, P.-A., S. Calmant, H. Roux, A. Paris, J. Monnier, P. Finaud-Guyot, A. Samine Montazem, e J. Santos da Silva (2017). Hydraulic visibility: Using satellite altimetry to parameterize a hydraulic model of an ungauged reach of a braided river. *Hydrological Processes* 31(4), 756–767.
- Gardini, B., G. Graf, e G. Ratier (1995). The instruments on envisat. *Acta Astronautica* 37, 301–311.
- Getirana, A. e C. Peters-Lidard (2013). Estimating water discharge from large radar altimetry datasets. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(3), 923–933.
- Getirana, A. C., M.-P. Bonnet, S. Calmant, E. Roux, O. C. Rotunno Filho, e W. J. Mansur (2009). Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall–runoff modeling and spatial altimetry. *Journal of Hydrology* 379(3), 205–219.
- Ghosh, S., P. Kumar Thakur, V. Garg, S. Nandy, S. Aggarwal, S. K. Saha, R. Sharma, e S. Bhattacharyya (2015). Saral-altika waveform analysis to monitor inland water levels: a case study of maithon reservoir, jharkhand, india. *Marine Geodesy* 38(1), 597–613.
- Gleick, P. H. e N. Ajami (2014). *The World’s Water Volume 8: The Biennial Report on Freshwater Resources*, Volume 8. Bücher: Island press.

- Hall, D. (1998). *Manual of remote sensing* (3rd ed.), Volume 2. New York, NY: John Wiley and Sons.
- Henrique Costa, P., E. O. Pereira, e P. Maillard (2016). An original processing method of satellite altimetry for estimating water levels and volume fluctuations in a series of small lakes of the pantanal wetland complex in brazil. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 41, 1–8.
- Hidayat, H., B. Vermeulen, M. Sassi, P. Torfs, e A. Hoitink (2011). Discharge estimation in a backwater affected meandering river. *Hydrology and earth system sciences* 15(8), 2717–2728.
- Hwang, C., J. Guo, X. Deng, H.-Y. Hsu, e Y. Liu (2006). Coastal gravity anomalies from retracked geosat/gm altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data. *Journal of Geodesy* 80(4), 204–216.
- IBGE (2015). Censo agropecuário. <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/conceitos>. Acessado em: 09/09/2015.
- IBGE (2016). Censo glossário cartográfico. http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/glossario/glossario_cartografico. Acessado em: 04/09/2016.
- Jacon Gilbert, K. J. C. (1989). *Hidrologia Curva-Chave. Análise e traçado*. Brasília: DNAEE.
- Jain, S. K., R. Singh, M. Jain, e A. Lohani (2005). Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques. *Water Resources Management* 19(4), 333–347.
- Jensen, J. (2009). *Remote Sensing of the Environment: an Earth Resources Perspective*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Kasischke, E. S., G. A. Meadows, e P. L. Jackson (1984). The use of synthetic aperture radar imagery to detect hazards to navigation.
- Kaula, W. M. (1970). *Manual of Standard Procedures for Observing and Reporting Ice Conditions*. Pasadena: NASA Contract Report.
- Khaki, M., E. Forootan, e M. Sharifi (2014). Satellite radar altimetry waveform re-tracking over the caspian sea. *International Journal of Remote Sensing* 35(17), 6329–6356.

- King, C., V. Lecomte, Y. Le Bissonnais, N. Baghdadi, V. Souchère, e O. Cerdan (2005). Remote-sensing data as an alternative input for the ‘stream’runoff model. *Catena* 62(2), 125–135.
- Knight, E. J. e G. Kvaran (2014). Landsat-8 operational land imager design, characterization and performance. *Remote Sensing* 6(11), 10286–10305.
- Koblinsky, C., R. Clarke, A. Brenner, e H. Frey (1993). Measurements of river level variations with satellite altimetry. *Water Resources Research* 29(6), 1839–1848.
- Kouraev, A. V., E. A. Zakharova, O. Samain, N. M. Mognard, e A. Cazenave (2004). Ob’river discharge from topex/poseidon satellite altimetry (1992–2002). *Remote sensing of environment* 93(1-2), 238–245.
- Kuo, C.-Y. e H.-C. Kao (2011). Retracked jason-2 altimetry over small water bodies: Case study of bajhang river, taiwan. *Marine Geodesy* 34(3), 382–392.
- Lee, H., C. Shum, Y. Yi, A. Braun, e C.-Y. Kuo (2008). Laurentia crustal motion observed using topex/poseidon radar altimetry over land. *Journal of Geodynamics* 46(3), 182–193.
- Lee, H. K. (2008). *Tese. Radar altimetry methods for solid earth geodynamics studies*. Ph. D. thesis, The Ohio State University.
- Leon, J., S. Calmant, F. Seyler, M. Bonnet, e M. Cauhopé (2006). Rating curves and average water depth estimation at the upper rio negro from altimetric spatial data and calculated remote discharges. *Journal of Hydrology* 328, 481–496.
- Luo, W., L. Yi, Z. Yu, H. Sun, e L. Yuan (2015). Barycenter reflected equatorial pacific sea level structure evolution and its indication of enso events. *Oceanologia* 57(2), 107–115.
- Maillard, P., N. Bercher, e S. Calmant (2015). New processing approaches on the retrieval of water levels in envisat and saral radar altimetry over rivers: a case study of the são francisco river, brazil. *Remote Sensing of Environment* 156, 226–241.
- Maillard, P. e S. Calmant (2013). Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology. In *Proceedings of SPIE Remote Sensing 2013*, Volume 8887, Dresden, Germany, pp. 1–14. International Society for Optics and Photonics.
- Maneta, M., M. Torres, W. Wallender, S. Vosti, M. Kirby, L. Bassoi, e L. Rodrigues (2009). Water demand and flows in the São Francisco River Basin (Brazil) with increased irrigation. *Agricultural Water Management* 96(1), 1191–1200.

- McGoogan, J. T., L. S. Miller, G. S. Brown, e G. S. Hayne (1974). The s-193 radar altimeter experiment. *Proceedings of the IEEE* 62(6), 793–803.
- McKillup, S. (2011). *Statistics explained: an introductory guide for life scientists*. Cambridge University Press.
- Mercier, F., V. Rosmorduc, L. Carrere, e Thibaut (2010). *Coastal and Hydrology Altimetry product (PISTACH) handbook*. Paris: CNES.
- Michailovsky, C., S. McEnnis, P. Berry, R. Smith, e P. Bauer-Gottwein (2012). River monitoring from satellite radar altimetry in the zambezi river basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(7), 2181–2192.
- MMA (2006). *Caderno da Região Hidrográfica do São Francisco*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos.
- Monico, J. F. G. (2007). *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. Editora Unesp.
- Moore, R. K., L. Chastant, L. Porcello, e J. Stevenson (1998). *Principles and Application of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing: Manual of Remote Sensing, Volume 2*. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Moss, G. (2015). Projeto rios voadores. <http://riosvoadores.com.br/>. Acessado em 20/11/2015.
- Paiva, R. C., W. Collischonn, e D. C. Buarque (2013). Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the amazon. *Hydrological Processes* 27(3), 333–346.
- Papa, F., S. K. Bala, R. K. Pandey, F. Durand, V. Gopalakrishna, A. Rahman, e W. B. Rossow (2012). Ganga-brahmaputra river discharge from jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the bay of bengal. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117(11), 1978–2012.
- Paris, A., R. D. de Paiva, J. Santos da Silva, D. Medeiros Moreira, S. Calmant, P.-A. Garambois, W. Collischonn, M.-P. Bonnet, e F. Seyler (2016). Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the amazon basin. *Water Resources Research* 52(5), 3787–3814.
- Pavelsky, T. M., M. T. Durand, K. M. Andreadis, R. E. Beighley, R. C. Paiva, G. H. Allen, e Z. F. Miller (2014). Assessing the potential global extent of swot river discharge observations. *Journal of Hydrology* 519(1), 1516–1525.

- Pereira, E. O., L. G. A. de Campos Abreu, e P. Maillard (2017). Altimetria por satélite radar aplicada a hidrologia no brasil. *Revista Brasileira de Cartografia* 69(2), 347–360.
- Pereira, E. O. e P. Maillard (2014). The effect of land cover type on radar altimeter response and its influence on retracker algorithms. *SPIE Remote Sensing* 13(1), 923905–923905.
- Pereira, S. B., F. F. Pruski, D. D. da Silva, e M. M. Ramos (2009). Evaporação líquida no lago de sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13(3), 346–352.
- Pereira, S. B., F. F. Pruski, D. d. Silva, e M. M. Ramos (2007). Estudo do comportamento hidrológico do rio são francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11(6), 615–622.
- Phalippou, L., E. Caubet, e E. Thouvenot (1999, Julho). A ka-band altimeter for future altimetry missions. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International*, Volume 1, pp. 503–505. IEEE.
- PIRSF (2015). Projeto de integração do rio são francisco. http://integracaosaofrancisco.gov.br/?page_id=7. Acessado em 07/03/2018.
- Ponchaut, F. e A. Cazenave (1998). Continental lake level variations from topex/po-seidon (1993-1996). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* 326(1), 13–20.
- Postel, S., T. Reeve, e C. McGuigan (2014). Change the course: A new model of freshwater conservation and restoration. *The solutions journal* 5(4), 28–34.
- Postel, S. L., G. C. Daily, e P. R. Ehrlich (1996). Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 5250(271), 785–788.
- Press, W., S. Teukolsky, W. Vettering, e B. Flannery (1992). *Numerical Recipes in C: the Art of Scientific Computing* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Raney, R. K. (1998). The delay/doppler radar altimeter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(5), 1578–1588.
- Rémy, F., B. Legresy, e P. Vincent (1999, Julho). New scientific opportunities from ka-band altimetry. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International*, Volume 1, pp. 506–508. IEEE.

- Richard, J., B. Durand, F. Robert, N. Taveneau, N. Stenou, e P. Sengenés (2008, Julho). Altika instrument for space altimetry with improved performances and ocean sampling: Development status and first test results. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. IEEE International*, Volume 3, pp. 3–67. IEEE.
- Ričko, M., C. M. Birkett, J. A. Carton, e J.-F. Crétau (2012). Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. *Journal of Applied Remote Sensing* 6(1), 61710–61710.
- Ridenour, L. N. (1965). *Radar system engineering*. New York: Dover Publications.
- Roca, M., S. Laxon, e C. Zelli (2009). The envisat ra-2 instrument design and tracking performance. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 47(10), 3489–3506.
- Rodriguez, R. d. G. (2004). *Dessertação. Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: Estudo de caso da bacia do Paracatu*. Ph. D. thesis, Universidade Federal de Viçosa.
- Rosmorduc, V., J. Benveniste, O. Lauret, M. Milagro, e N. Picot (2006). *Radar Altimetry Tutorial*. Toulouse: ESA & CNES.
- Roth, G. e M. D. Levine (1993). Extracting geometric primitives. *CVGIP: Image Understanding* 58(1), 1–22.
- Roux, E., J. Santos da Silva, A. Cesar Vieira Getirana, M.-P. Bonnet, S. Calmant, J.-M. Martinez, e F. Seyler (2010). Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry: a comparative study. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques* 55(1), 104–120.
- Santos, I. d., H. D. Fill, M. Sugai, H. Buba, R. T. Kishi, E. Marone, e L. F. Lautert (2001). *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.
- Schnabel, R., R. Wahl, e R. Klein (2007). Efficient ransac for point-cloud shape detection. In *Computer graphics forum*, Volume 26, pp. 214–226. Wiley Online Library.
- Schultz, G. A. (1988). Remote sensing in hydrology. *Journal of Hydrology* 100(1-3), 239–265.
- Schwatke, C., D. Dettmering, E. Börgens, e W. Bosch (2015). Potential of saral/altika for inland water applications. *Marine Geodesy* 38(sup1), 626–643.

- Schwatke, C., D. Dettmering, W. Bosch, e F. Seitz (2015). Dahiti—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(10), 4345–4364.
- Sentinel-3, T. (2013). *Sentinel-3 User Handbook - GMES-S3OP-EOPG-TN-13-0001*. ESA.
- Smith, W. H. e D. T. Sandwell (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277(5334), 1956–1962.
- Sneeuw, N., C. Lorenz, B. Devaraju, M. J. Tourian, J. Riegger, H. Kunstmann, e A. Bárdossy (2014). Estimating runoff using hydro-geodetic approaches. *Surveys in Geophysics* 35(6), 1333–1359.
- Sulistioadi, Y., K.-H. Tseng, C. Shum, H. Hidayat, M. Sumaryono, A. Suhardiman, F. Setiawan, e S. Sunarso (2014). Satellite radar altimetry for monitoring small river and lakes in indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11(3), 2825–2874.
- Sulistioadi, Y. B. (2013). *Tese. Satellite Altimetry and Hydrologic Modeling of Poorly-Gauged Tropical Watershed*. Ph. D. thesis, The Ohio State University Columbus, Ohio.
- Tourian, M., C. Schwatke, e N. Sneeuw (2017). River discharge estimation at daily resolution from satellite altimetry over an entire river basin. *Journal of Hydrology* 546(1), 230–247.
- Tourian, M., N. Sneeuw, e A. Bárdossy (2013). A quantile function approach to discharge estimation from satellite altimetry (envisat). *Water Resources Research* 49(7), 4174–4186.
- Tournadre, J. (1999, Julho). Estimation of rainfall from ka band altimeter data: computation of waveforms in presence of rain. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS'99 Proceedings. IEEE 1999 International*, Volume 1, pp. 197–199. IEEE.
- Tseng, K.-H., C. Shum, Y. Yi, W. J. Emery, C.-Y. Kuo, H. Lee, e H. Wang (2014). The improved retrieval of coastal sea surface heights by retracking modified radar altimetry waveforms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 52(2), 991–1001.
- Tucci, C. E. M. (2001). *Hidrologia Ciência e Aplicação* (2nd ed.), Volume 1, Chapter Escoamento superficial, pp. 391–441. Porto Alegre: ABRH.

- Verron, J., P. Bonnefond, L. Aouf, F. Birol, S. A. Bhowmick, S. Calmant, T. Conchy, J.-F. Crétaux, G. Dibarboure, A. Dubey, *et al.* (2018). The benefits of the ka-band as evidenced from the saral/altika altimetric mission: Scientific applications. *Remote Sensing* 10(2), 163.
- Vignudelli, S., A. G. Kostianoy, P. Cipollini, e J. Benveniste (2011). *Coastal altimetry*. Paris: Springer.
- Williams, D. L., S. Goward, e T. Arvidson (2006). Landsat. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(10), 1171–1178.
- Yang, L., M. Lin, Q. Liu, e D. Pan (2012). A coastal altimetry retracking strategy based on waveform classification and sub-waveform extraction. *International journal of remote sensing* 33(24), 7806–7819.
- Zwally, J. (2016). Gsfc algorithms. <http://icesat4.gsfc.nasa.gov/>. Acessado em: 15/03/2016.

Apêndice A

Produção bibliográfica relacionada a tese

- Apêndice B - MAILLARD, Philippe; PEREIRA, ERIC OLIVEIRA. Uma Ferramenta para Processar Dados de Altimetria por Satélite para Aplicações em Hidrologia. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre - RS: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. p. 1-8.
- Apêndice C - PEREIRA, E. O.; ABREU, L. G. Á. C. ; MAILLARD, PHILIPPE. Altimetria por Satélite Radar Aplicada a Hidrologia no Brasil. RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 69, p. 347-360, 2017.
- Apêndice D - COSTA, PAULO HENRIQUE ; OLIVEIRA PEREIRA, ERIC ; MAILLARD, PHILIPPE . An Original Processing Method of Satellite Altimetry for Estimating Water Levels and Volume Fluctuations in a Series of Small Lakes of the Pantanal Wetland Complex in Brazil. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLI-B8, p. 327-334, 2016.
- Apêndice E - PEREIRA, E. O.; MAILLARD, P. . The effect of land cover type on radar altimeter response and its influence on retracker algorithms. 2014. (Apresentação de Trabalho/Conferência ou palestra).
- PEREIRA, E. O.; MAILLARD, PHILIPPE. Development of a contextual (multi-waveform) retracker for estimating water levels in lakes and reservoirs. In: 'New era of altimetry, new challenges', OSTST 2016, 2016, La Rochelle. Abstract Book of the 2016 Ocean Surface Topography Science Team Meeting, 2016, 2016. v. 1. p. 106-106.

Apêndice B

Artigo-1



UMA FERRAMENTA PARA PROCESSAR DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES PARA APLICAÇÕES EM HIDROLOGIA

Philippe Maillard^{1} & Eric Oliveira Pereira²*

Resumo – É apresentada uma ferramenta de código aberto para processamento de dados de altimetria por satélite (AS) na determinação do nível de água. Aplicações hidrológicas de AS requerem processamentos distintos dos da oceanografia. O Satellite Water Gauging (SWG) permite a criação de estações hidrológicas virtuais (VHSs) com base no limite dos corpos hídricos e *tracks* do satélite, inseridos como *shapefiles*. O SWG dá ao usuário ferramentas para extrair seções de interesse a partir dos dados AS, aplicar as correções padrão, calcular o nível de água para as VHSs com o uso de três diferentes algoritmos, comparar o resultado com os dados *in situ*, produzir dados em formato vetorial *shapefile* e gerar uma série de gráficos que mostram os resultados. Como uma plataforma de código aberto, o SWG foi criado para facilitar a inclusão de novas funcionalidades a partir de programação. O artigo apresenta uma introdução à AS e algumas de suas peculiaridades em termos de processamento para aplicação em hidrologia e em seguida faz uma descrição detalhada dos módulos do SWG, sua interface gráfica e estrutura de código. Finalmente, dados de teste são apresentados com alguns exemplos de saídas do programa.

Palavras-Chave – Altimetria por satélite, Nível de água, Estação hidrológica virtual.

A TOOL TO PROCESS SATELLITE ALTIMETRY DATA FOR APPLICATIONS IN HYDROLOGY

Abstract – An open-source tool for processing satellite altimetry (SA) data for water level determination for hydrological application is presented. Hydrological applications of SA requires a different processing approach than for oceanography. Satellite Water Gauging (SWG) was created specifically for this purpose. In particular it promotes the creation of virtual hydrological stations (VHSs) based on the knowledge of the water body limits and the satellite tracks as shapefile type vector data. SWG enables the user to extract sections of interest from the SA, apply the standard pre-processing corrections, compute water level values for VHSs using three different algorithms, compare the results with in situ data, produce shapefile vector data of the SA points and plot a variety of graphics showing the results. As an open-source code, SWG was created to facilitate the inclusion of new functionalities by advanced programming users. The article first presents an introduction to SA and some of its peculiarities in terms of processing for hydrological applications, then makes a detailed description of the SWG modules, their graphical interface and code structure. Finally a training dataset is presented with examples of outputs produced by the program.

Keywords – Satellite altimetry, Water level, Virtual hydrological station.

1 - INTRODUÇÃO

A Altimetria por satélite (AS) é cada vez mais utilizada para monitorar rios e lagos ao redor do mundo (Domeneghetti *et al.*, 2015; Schwatke *et al.*, 2015; Tourian *et al.*, 2017). Quando combinada à superfície de lagos e reservatórios, a AS permite estimar variações de volume desses corpos de

¹ Afiliação: Professor Associado Departamento de Geografia - IGC/UFMG, philippermaillard@yahoo.com.br.

² Afiliação: Pós-graduando Departamento de Geografia - IGC/UFMG, ericpereiraufmg@gmail.com.* Autor Correspondente.



água. Quando associada a curva chave de um rio a AS pode ser transformada em vazão. Caso o traço do satélite esteja acompanhando o rio, é possível calcular sua declividade. Esses parâmetros são essenciais em hidrologia, sendo o nível d'água um dos principais para uma série de aplicações tais como monitoramento de inundações, calibração de modelos hidrodinâmicos e previsão de estoque hídrico (Biancamaria *et al.*, 2011; Paiva *et al.*, 2013; Schwatke *et al.*, 2015; Maillard *et al.*, 2015; Tourian *et al.*, 2017).

Dados altimétricos de vários satélites estão disponíveis de forma gratuita na internet através da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), da *European Space Agency* (ESA), do *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), do *Center for Topographic Studies of the Ocean and Hydrosphere* (CTOH) entre outros. Normalmente os dados fornecidos são parcialmente processados, o que exige uma série de correções e outros processamentos para gerar informações úteis, especialmente em hidrologia continental (Koblinsky *et al.*, 1993; Roux *et al.*, 2010).

Existem poucas ferramentas para o processamento dos dados de AS, sendo a *Broadview Radar Altimetry Toolbox* (BRAT) a mais conhecida e disponível gratuitamente na internet (<http://www.altimetry.info/toolbox/>). O BRAT é sugerido pela ESA e pelo CNES e permite realizar uma série de correções, funções estatísticas e de visualização, contudo não foi especificamente desenvolvida para hidrologia. O *Laboratoire d'Etudes Géophysiques et Océanographiques Spatiales* (LEGOS) desenvolveu a ferramenta *Virtual Altimetry Station* (VALS) para extração e seleção manual de pontos altimétricos sobre um rio ou lago (Cochonneau & Calmant, 2011). Essa ferramenta foi utilizada para criar dezenas de estações hidrológicas virtuais (VHSs) na bacia Amazônica (Paris *et al.*, 2016), mas a aplicação é de código fechado e envolve muitos processos manuais.

A AS para aplicação hidrológica abrange várias pesquisas em diferentes níveis (análise de formas de onda, desenvolvimento de *retracers*, filtros espaço-temporais), o que torna clara a necessidade de uma plataforma de processamento para facilitar a implementação de testes de diversas abordagens que visam melhorar a precisão de medidas do nível da água. É com esse objetivo que foi desenvolvida o *Satellite Water Gauging* (SWG) com os seguintes requerimentos: 1) ser escrito em uma linguagem de alto nível largamente disponível para que a comunidade científica pudesse contribuir facilmente; 2) prover gráficos de alta qualidade; 3) produzir resultados em um formato de fácil acesso; 4) permitir a integração com Sistemas de Informação Geográfica (SIG); 5) prover formas para a comunidade científica adicionar novas características e funções; 6) possuir uma interface gráfica amigável - *Graphical User Interface* (GUI).

Este artigo apresenta o aplicativo SWG desenvolvido em Python 2.7 que permite trabalhar com cinco diferentes missões altimétricas, aplicar uma série de correções para seus dados, processá-los para a extração do valor do nível da água de um conjunto de pontos e mostrar os resultados em forma gráfica, textual e de arquivo *shapefile*. Essa aplicação possui código aberto e estará disponível em um repositório de acesso público.

2 - DADOS ALTIMÉTRICOS DE SATÉLITE PARA HIDROLOGIA

A AS utiliza um radar à bordo de um satélite que emite pulsos de micro-ondas em direção ao nadir que são refletido e retro-espalhados pela superfície. O tempo gasto pelo impulso para retornar à antena é transformado em distância que, subtraída da altitude do satélite, resulta assim na elevação do nível de água. Nas superfícies continentais, a grande variação topográfica pode causar um primeiro retorno de uma direção fora do nadir (*off-nadir*) quando o caminho até este ponto é menor que aquele até a água o que torna a estimativa imprecisa. Outro fator de erro vem do fato de que o cone de propagação das micro-ondas pode ter um raio na ordem dos quilômetros e o efeito das



coberturas do solo vizinha a água pode “contaminar” o sinal de retorno (Berry *et al.*, 2005; Siddique-E-Akbor *et al.*, 2011).

3 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA (SWG)

O SWG foi implementado com o objetivo de facilitar a extração, o processamento, a análise e a visualização de dados de AS. O SWG foi desenvolvido com a mesma lógica dos passos normalmente seguidos pelos pesquisadores na criação de estações virtuais de monitoramento do nível de água. O SWG foi criado para tentar automatizar parte dos processamentos dos pontos de AS que cruzam um rio. Os corpos de água são definidos por polígonos complexos (como *shapefiles*) permitindo a fácil determinação dos pontos da AS dentro e próximos aos corpos hídricos. A ferramenta foi planejada de maneira a facilitar a implementação de novas funções (uso de novas missões altimétricas, novos *retrackers*, correções, etc) pelos *end-users*.

3.1. REQUISITOS

O SWG necessita alguns pacotes que devem ser instalados para permitir sua utilização. O manual do SWG orienta na instalação desses pacotes que são: 1. Zlib (*Data compression Library*); 2. HDF5 (biblioteca para armazenamento e gerenciamento de dados); 3. NetCDF4 (Bibliotecas de base de dados auto-descritivos); 4. CODA (Bibliotecas de base de dados auto-descritivos); 5. Pyshape (O módulo Python para ler e gravar *Shapefile*); 6. Basemap (Biblioteca para plotar dados 2D em mapas no Python).

3.2. MÓDULOS E FLUXO DE TRABALHO

O SWG é composto de cinco módulos, um principal e quatro sub-módulos ligados ao primeiro (Figura 2 e em cinza na Figura 1). O módulo principal (Figura 2a) pressupõe que os dados do satélite foram extraídos de acordo com a área de interesse (uma seção do cruzamento entre o traço do satélite e o rio ou lago acrescidos de um *buffer* de alguns quilômetros) e que todas as correções foram previamente aplicadas. Em outras palavras isso irá criar estações virtuais a partir dos dados de AS. Dois módulos são dedicados a criação de estações virtuais: *Create Virtual Hydrological Station* e *Create Multiple Virtual Hydrological Stations*. Um outro módulo produz um perfil topográfico longitudinal do rio a partir da base SRTM e um outro utiliza esse perfil para remover eventuais *outliers* nos dados antes de utilizá-los no módulo principal. A relação entre os diferentes módulos e o fluxo geral do SWG está ilustrado na Figura 1. Cada um desses módulos está descrito nas seções seguintes.

3.2.1. SWG – MÓDULO PRINCIPAL

Os dados altimétricos tem a forma de uma série de pontos medidos ao longo do traço do satélite com espaçamento regular (ex.: 380 m para o RA-2 do Envisat RA-2, 330 m para o SRAL do Sentinel-3A). Dependendo da largura do rio ou da área do lago (assumindo que este é cruzado na perpendicular) mais de um ponto pode ser utilizado, mas deve produzir uma única medida para ser subtraída da altitude do satélite. Além disso, quando existem dados *in situ*, é útil realizar a comparação das medições e fornecer ao usuário alguma estimativa de erro. Assim, os principais objetivos do módulo principal são: 1) processar os pontos de AS e encontrar uma medida única do nível de água para cada ciclo, e 2) calcular o erro médio quadrático entre as medidas obtidos por AS e os dados *in situ*. Neste ponto, três diferentes tipos de processamento são oferecidos:

1. *Water width*: a primeira e mais simples abordagem consiste em simplesmente extrair todos os pontos medidos que sobrepõem o rio (ou lago) entre suas margens e calcular a sua média.

2. *Pattern recognition*: o conceito básico consiste em fazer a classificação da forma descrita pela sequência de pontos em cada um dos lados do rio, a partir de sua linha central, ajustando um polinômio de segundo grau através da sequência de pontos e utilizando os termos do polinômio como feições através das quais a forma da linha do rio é classificada. Diferentes fenômenos podem afetar cada um dos lados do rio de forma independente. Uma descrição completa do *Pattern recognition* pode ser consultada em Maillard *et al.* (2015).

3. *Off-Nadir "hooking" simulation and fitting*: o padrão *off-nadir "hooking"* criado pela superfície da água dentro da forma de onda é um fenômeno físico que pode ser previsto se a presença de água e o raio da pegada do sensor são conhecidos. Esta terceira opção de processamento foi implementada para investigar se modelar e ajustar o "*hooking*" pode melhorar a precisão em casos em que o fenômeno é frequente, como foi observado em vários estudos (ex.: da Silva *et al.*, 2010; Maillard *et al.*, 2015).

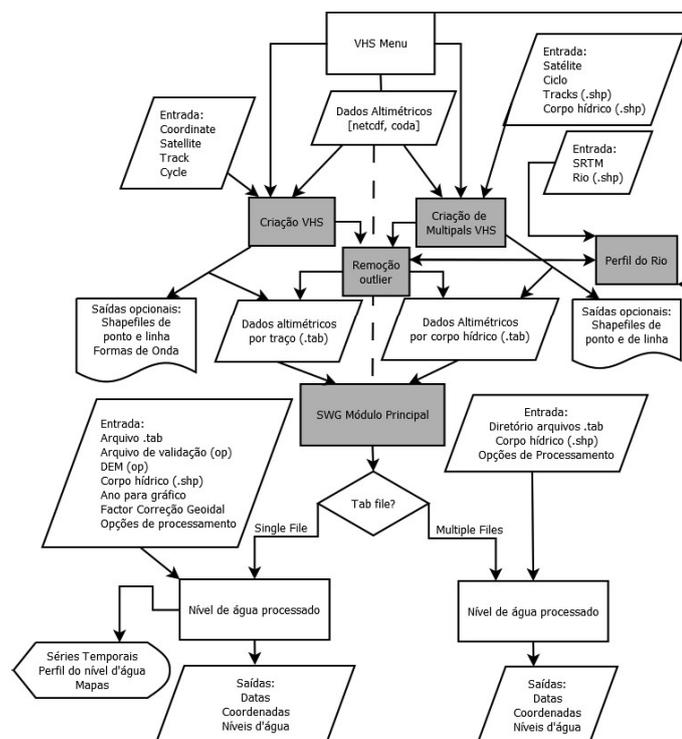


FIGURA 1: Fluxo esquemático do SWG. Os cinco módulos do SWG estão em cinza.

3.2.2. MÓDULO VHS: ESTAÇÃO ÚNICA

A maioria dos autores que utilizam a AS para a hidrologia o fazem para a criação de medições remotas do nível d'água e frequentemente adotam o termo estação hidrológica virtual (*virtual hydrological station* ou VHS). Os satélites têm, normalmente, uma órbita nominal fixa que faz com que o satélite reviste a mesma localização ao longo de seu traço em intervalos regulares de tempo (ex.: 10 dias para o Jason e 27 para o Sentinel-3A). A idéia básica é que em qualquer ponto que um traço cruze um rio suficientemente largo, há o potencial de se criar e monitorar uma VHS. Se existe uma curva chave para essas localidades, dados de vazão podem ser calculados. Este módulo produz uma estação de cada vez com base na coordenada fornecida pelo usuário (Figura

2b). Estes locais podem ser encontrados através da sobreposição dos traços do satélite sobre o curso do rio. Nestes casos a localização é registrada manualmente como um conjunto de coordenadas. O módulo irá extrair uma faixa específica de dados do satélite e aplicar as correções necessárias para o *retracker* escolhido (nesta versão apenas o ICE-1 pode ser utilizado, mas uma simples mudança, explicada no próprio código, pode alterar isso de maneira simples).

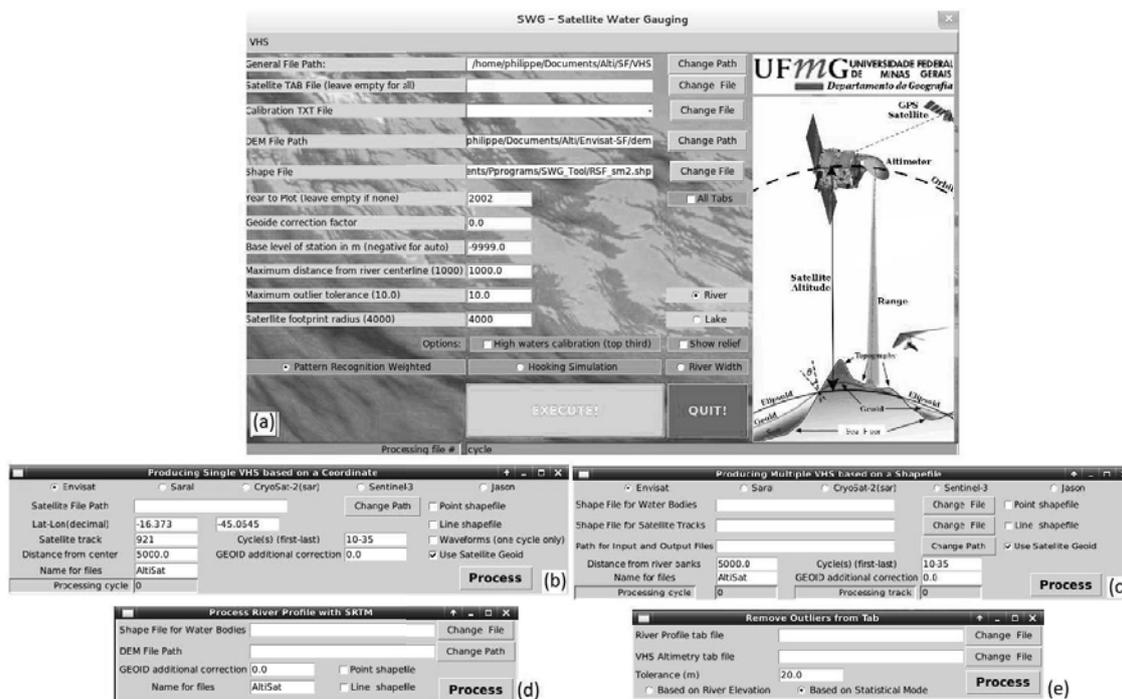


FIGURA 2: Ilustração da interface gráfica (GUI) do módulo principal (a) e dos quatro sub-módulos: (b) estação única VHS; (c) múltiplas estações VHS; (d) perfil do rio com SRTM; e (e) remoção de *outliers*.

A altitude do nível de água (Hw) é obtida através da subtração entre o *range* e a altitude do satélite acrescidos das seguinte correções atmosféricas: ionosfera, variação de pressão e umidade e as marés terrestre e polar. O módulo então salva um arquivo tabular contendo todos os pontos dentro da distância pré-definida pelo usuário. O arquivo tabular pode então ser processado pelo módulo principal para gerar uma única medida de nível para cada data de passagem do satélite (ciclo). As formas de onda (FO) são parte dos dados brutos do satélite a partir dos quais os *retrackers* podem estimar a elevação. A Figura 3 mostra alguns exemplos de FOs no cruzamento do satélite com um rio. Está opção foi implementada no módulo, mas é restrita a um único ciclo por vez para evitar problemas na memória RAM. Um único ciclo pode conter dezenas de FOs dependendo da largura do corpo hídrico.

3.2.4. MÓDULO DE REMOÇÃO DE OUTLIERS E PERFIL DO RIO

Os dois módulos foram pensados conjuntamente, sendo que o primeiro depende parcialmente do segundo. A remoção de *outliers* em séries temporais de nível d'água pode ser complexa devido a ocorrência de eventos extremos (secas e cheias) que são muito importantes e devem ser preservados. Entretanto, o que pode ser um *outlier* (em termos relativos) na foz de um rio pode não ser próximo a sua nascente. Uma primeira abordagem para remoção dos *outliers* está

implementada no módulo principal e é baseada na existência de dados *in situ*. O usuário insere um valor de tolerância e o programa irá eliminar as medições que excedam esse valor baseado na média histórica de cada ciclo/data em particular. Embora isso possa tratar relativamente os *outliers*, outra abordagem é necessária quando não existirem estações *in situ* próximas a passagem do satélite.

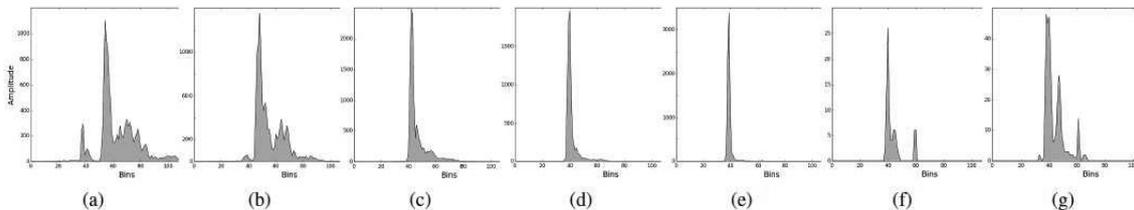


FIGURA 3: Sequência de FOs que representam o cruzamento do satélite Envisat sobre um rio de 500 metros de largura. Apenas em (d) e (e) o satélite está diretamente acima do rio com um pico bem marcado na FO.

O módulo de remoção de *outliers* oferece duas opções para a eliminar *outliers*: 1) utilizando a estatística dos pontos de altitude como um parâmetro de tendência central, e 2) utilizando o ponto mais próximo do perfil do rio tido como a média provável da altitude. O módulo do perfil do rio utiliza imagens da missão *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) na construção do perfil topográfico ao longo curso do rio. A precisão vertical do SRTM é muito menor que a requerida para aplicações de medição do nível da água, por isso é importante uma atenção especial no processamento do SRTM para criar um perfil. Os passos desses processamentos estão descrito abaixo:

1. Devido a imprecisão vertical, a posição do rio nem sempre corresponde à célula mais baixa considerando a direção de escoamento do rio. Para lidar com isso, é realizada uma busca na perpendicular da direção de cada vértice da linha do rio até uma distância correspondente a cinco *pixels* do SRTM.

2. se um ponto gerado no perfil é mais alto ou mais baixo que seus dois vizinhos mais próximos, o ponto de elevação é substituído pela média desses dois pontos.

3. se um ponto faz com que o rio aumente sua elevação na direção jusante, o ponto medido é substituído pelo valor do ponto anterior.

4. TUTORIAL E DADOS DE TREINAMENTO – O RIO SÃO FRANCISCO

O Rio São Francisco é estratégico no Brasil, tanto como recurso hídrico quanto como via de transporte, o que o torna especialmente interessante para aplicação das tecnologias de monitoramento via satélite. Para facilitar o entendimento, por parte do usuário, do fluxo de trabalho do SWG e para que o mesmo se familiarize com os diferentes módulos, um tutorial foi criado e utiliza os dados do São Francisco como um conjunto de teste. A base de dados é composta por dados altimétricos de quatro satélites (Envisat, Saral, Jason-2 e Sentinel-3A) que compreendem o intervalo temporal de 2010 a 2016. Também estão contidos os *shapefiles* dos *tracks* dos satélites, do limite da bacia do Rio, do curso principal do Rio São Francisco, quadrículas SRTM que cobrem a bacia hidrográfica e dados *in situ* da Agência Nacional de Águas (ANA). O conjunto de instruções primeiro conduz o usuário a criar uma VHS, e em seguida sugere a criação de outras. O tutorial também incita a criação de múltiplas VHS com base no cruzamento entre os *shapefiles* dos *tracks* do Envisat e do rio. Outras funcionalidades também são testadas.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos através dos dados de treinamento para a VHS próxima à Manga, no norte de Minas Gerais. Os mapas são criados com o Basemap e são bem simples, mas como os *shapefiles* de ponto e linha também podem ser criados, não vimos a necessidade de criar

um sistema sofisticada de criação de mapas, já que o usuário provavelmente irá criar seus próprios mapas com SIG. A Figura 5 mostra um exemplo de cálculo possível de declividade do rio quando o traço do satélite acompanha o rio ao longo de uma certa distância.

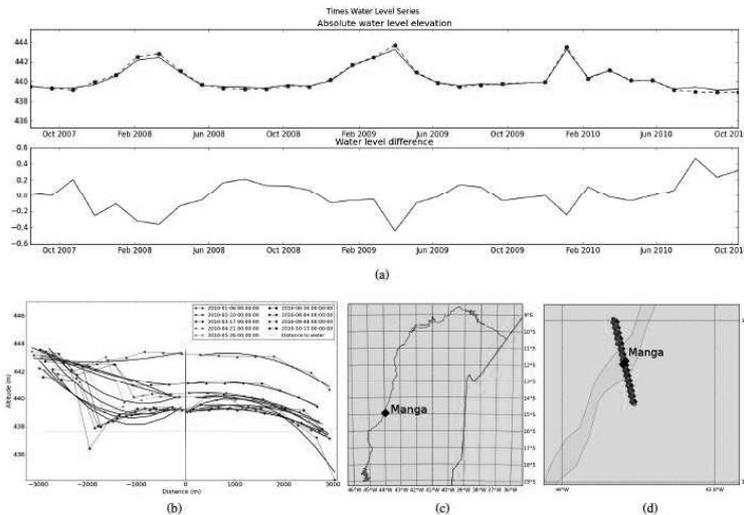


FIGURA 4: Exemplos das saídas gráficas do SWG: (a) série temporal do nível d'água obtido por AS e dados *in situ* (superior) e a diferença entre as duas séries de dados (inferior); (b) perfil dos dados de AS mostrando a solução por *pattern recognition* encontrada pelo SWG; (c) um mapa com a visão geral; (d) uma vista detalhada (zoom) da VHS, com o *shapefile* do rio e os pontos extraídos (verde e vermelho).

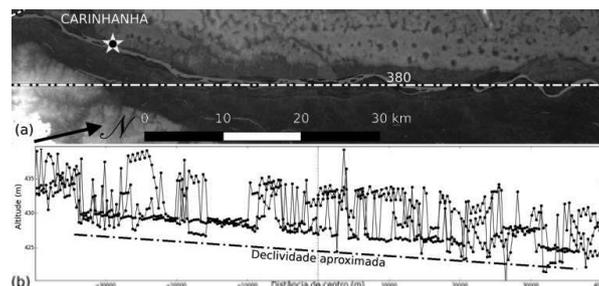


FIGURA 5: Ilustração da capacidade de calcular a declividade do rio quando o traço do satélite o acompanha: (a) o traço do satélite sobrepondo uma imagem Sentinel-2; (b) perfil longitudinal do trecho.

5. CONCLUSÃO

Uma ferramenta de extração, processamento e exibição de dados altimétricos de satélite chamada Satellite Water Gauging (SWG) foi apresentada e descrita. Dados de AS são disponibilizados de forma gratuita por uma série de organizações, mas usualmente requerem uma série de pré-processamentos e processamentos para serem utilizáveis. Isso é especialmente verdadeiro em aplicações em hidrologia, para a qual os dados não foram originalmente concebidos. O SWG representa um esforço de implementar uma série de funcionalidades normalmente necessárias para o monitoramento de nível d'água a partir de dados de AS em um aplicativo único com uma interface gráfica. O SWG será disponibilizado como um *software* livre e de código aberto desenvolvido em Python 2.7 na expectativa de que os usuários usarão o mesmo como uma plataforma de teste no desenvolvimento de suas pesquisas com altimetria por satélite para hidrologia. Desenvolvimentos futuros serão incluídos para contemplar um maior número de missões e até mesmo a inclusão de algumas funções de processamento hde imagens como limiar



(*thresholding*) para o delineamento da água e uma conversão de dados raster-vetor, com o objetivo de criar *shapefiles* que serão utilizados na criação das VHS.

REFERÊNCIAS

BERRY, P.; GARLICK, J.; FREEMAN, J.; MATHERS, E. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophysical Research Letters*, v. 32, n. 16, p. L16401 1–4, 2005.

BIANCAMARIA, S.; HOSSAIN, F.; LETTENMAIER, D. P. Forecasting transboundary river water elevations from space. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 11, p. n/a, 2011.

COCHONNEAU, G.; CALMANT, S. Virtual ALtimetry Station. Version 1.5.3 - <http://www.ore-hybam.org/index.php/eng/software/vals>. Internet site visitado em April 2017, 2011.

DOMENEGHETTI, A.; CASTELLARIN, A.; TARPANELLI, A.; MORAMARCO, T. Investigating the uncertainty of satellite altimetry 179 products for hydrodynamic modelling. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 23, p. 4908–4918, 2015.

KOBLINSKY, C.; CLARKE, R.; BRENNER, A.; FREY, H. Measurements of river level variations with satellite altimetry. *Water Resources Research*, v. 29, n. 6, p. 1839–1848, 1993.

MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S. New processing approaches on the retrieval of water levels in envisat and saral radar 192 altimetry over rivers: A case study of the São Francisco River, Brazil. *Remote Sensing of Environment*, v. 156, p. 226–241, 2015.

PAIVA, R.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; DE GONCALVES, L.; CALMANT, S.; GETIRANA, A.; DA SILVA, J. S. Assimilating in situ and radar altimetry data into a large-scale hydrologic-hydrodynamic model for streamflow forecast in the amazon. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 7, p. 2929–2946, 2013.

PARIS, A.; DIAS DE PAIVA, R.; SANTOS DA SILVA, J.; MEDEIROS MOREIRA, D.; CALMANT, S.; GARAMBOIS, P.-A.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M.-P.; SEYLER, F. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. *Water Resources Research*, v. 52, n. 5, p. 3787–3814, 2016.

ROUX, E.; SANTOS DA SILVA, J.; CESAR VIEIRA GETIRANA, A.; BONNET, M.-P.; CALMANT, S.; MARTINEZ, J.-M.; SEYLER, F. Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry a comparative study. *Hydrological Sciences Journal*, v. 55, n. 1, p. 104–120, 2010.

SCHWATKE, C.; DETTMERING, D.; BOSCH, W.; SEITZ, F. Dahiti—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, n. 10, p. 4345–4364, 2015.

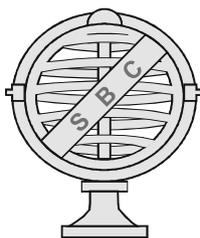
SIDDIQUE-E-AKBOR, A.; HOSSAIN, F.; LEE, H.; SHUM, C. Inter-comparison study of water level estimates derived from hydrodynamic-hydrologic model and satellite altimetry for a complex deltaic environment. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, p. 1522–1531, 2011.

da SILVA, J.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; Rotunno Filho, O.; COCHONNEAU, G.; MANSUR, W. Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions. *Remote Sensing of Environment*, v. 114, p. 2160–2181, 2010.

TOURIAN, M.; SCHWATKE, C.; SNEEUW, N. River discharge estimation at daily resolution from satellite altimetry over an entire river basin. *Journal of Hydrology*, v. 546, p. 230–247, 2017.

Apêndice C

Artigo-2



Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/2: 347-360
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ALTIMETRIA POR SATÉLITE RADAR APLICADA A HIDROLOGIA NO BRASIL

Satellite Altimetry for Hydrology in Brazil

**Eric Oliveira Pereira, Luiza Gontijo Álvares de Campos Abreu &
Philippe Maillard**

¹Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Instituto de Geociências - Departamento de Geografia
Avenida Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte - Brasil
{ericpereira, luizagontijoaca, philippe}@ufmg.br

Recebido em 26 de Abril, 2016/ Aceito em 7 de Dezembro, 2016
Received on April 26, 2016/ Accepted on December 7, 2016

RESUMO

A altimetria por satélite é uma técnica que viabiliza a tomada de medidas de nível em oceanos, gelo, rios e lagos. Inicialmente foi desenvolvida com o objetivo de monitorar os oceanos, entretanto a grande quantidade de dados gerados para áreas continentais viabilizou a realização de estudos relativos a variação espacial e temporal do volume de água em rios e lagos. Tradicionalmente o monitoramento do nível dos rios e lagos é realizado com equipamentos de medição *in situ* o que gera alto custo de instalação e operação, e dificulta sua instalação em localidades remotas. Neste contexto, a altimetria por satélite pode ser utilizada de modo a complementar a rede de monitoramento convencional. No Brasil, a maioria dos estudos de altimetria por satélite se concentra na bacia Amazônica devido a importância e visibilidade da região para o mundo, além da escala dos rios permitirem o uso direto da altimetria radar. O uso desta técnica fora do contexto amazônico apresenta ainda muitos desafios devido às limitações impostas pela natureza do porte dos rios (pequeno e médio) e também pela resolução espacial (*footprint*) dos sensores embarcados nas missões atuais. O objetivo deste trabalho é apresentar as pesquisas realizadas no Brasil desde 1993 até o presente e avaliar o modo de funcionamento dos sensores altimétricos radar. O aprofundamento nos estudos e técnicas de obtenção e processamento de dados, assim como o lançamento de novas missões e desenvolvimento de sensores mais precisos, possa auxiliar no desenvolvimento desta área do conhecimento tanto na Amazônia quanto em outras regiões do Brasil, viabilizando e melhorando o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos.

Palavras chaves: Altimetria por Satélite, Águas Continentais, Bacia Amazônica, Rio São Francisco, Radares Altimétricos.

ABSTRACT

Satellite altimetry is a technique that enables measurements of ocean, ice, river and lake levels. Although satellite altimetry was developed mainly for the purpose of monitoring oceans, the large amount of data generated for continental areas also allows hydrological studies, once the systematic temporal and spatial monitoring of water levels in, in a precise and regular manner is essential to understand hydrological processes. The monitoring of rivers and lakes is traditionally made by *in situ* measuring, but these monitoring stations have a high cost of operation and maintenance and the difficulty to reach remote areas limits their installation in many parts of the territory. In this context, satellite altimetry can be used as a way to complement the conventional network of *in situ* stations. In Brazil, most studies were concentrated in the Amazon basin due to its importance and visibility for the world, but also due to the size of

the rivers allowing direct use of satellite altimetry. The use of this technique outside of the Amazon still presents many challenges because of the river width limitations (small and medium) and also the spatial resolution (footprint) of the sensors aboard the current missions. The objective of this article is to present a review on the main studies in Brazil from 1993 until present, and also to show the principles of altimetric radar sensors. The increased number of studies, improvements in techniques of data processing, the launch of new missions and the development of more accurate sensors and missions are very promising for this field of study. It is expected that the next few years will bring many more studies in this area whether in the Amazon or elsewhere in Brazil, enabling and improving the monitoring and management of water resources.

Keywords: Satellite Altimetry, Inland Waters, Amazon Basin, São Francisco River, Altimetric Radars.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os recursos naturais, um dos que apresenta os mais variados, legítimos e correntes usos é a água (BENETTI & BIDONE, 1993). Esse recurso possui usos múltiplos, dos quais se destacam o agropecuário, o industrial, o hidroenergético e o abastecimento público (GLEICK & AJAMI, 2014). Conforme Postel *et al.* (2014) cada vez mais os recursos hídricos são utilizados sem se levar em conta seus limites de renovação.

Conhecer a qualidade e a quantidade de água disponível ao longo do tempo é essencial para a garantia de oferta desse recurso. A forma mais comum de regular a quantidade e qualidade da água é através da instalação estações de monitoramento diretamente nos rios, lagos e reservatórios. Em conjunto elas formam uma rede hidrológica e contribuem com a gestão dos recursos hídricos (TUCCI, 2001).

A rede hidrológica de estações *in situ* de monitoramento, em todo o mundo, sofre com o decréscimo em quantidade (HARVEY & GRABS, 2003; CALMANT *et al.*, 2006). Isso ocorre por diversos fatores, entre eles o alto custo de instalação e operação, além da perda de pontos de monitoramento pela ocorrência de eventos climáticos extremos e da depredação (GOVATSKI, 2002).

Uma alternativa que pode contribuir na minimização dos problemas enfrentados no monitoramento dos recursos hídricos é a possibilidade da geração de dados de nível (cotas), semelhantes aos das estações *in situ*, por sensoriamento remoto com o uso da altimetria por satélite radar.

Apesar de não ter sido o objeto principal da altimetria por satélite, as pesquisas em hidrologia têm se valido da grande quantidade de dados gerados em todo o planeta e de sua

rápida disponibilização, se tornando uma nova ferramenta para a medição do nível de rios e lagos (CALMANT & SEYLER, 2006). Os estudos com uso da altimetria radar possibilitam além da medição do nível de rios e lagos, o cálculo de vazão e a elaboração de modelos hidrológicos, entre outros (BERRY *et al.*, 2005; CRETAUX & BIRKETT 2006; CRETAUX *et al.*, 2011; VIGNUDELLI *et al.*, 2011; PAPA *et al.*, 2012; RIČKO *et al.*, 2012).

Apesar de ser amplamente utilizada no mundo, a altimetria por satélite radar aplicada a hidrologia conta com poucas publicações no Brasil, tanto no que diz respeito ao seu funcionamento quanto no seu potencial de uso e aplicabilidade.

Neste contexto, os objetivos deste artigo são: apresentar os principais conceitos da altimetria radar de baixa resolução (*Low Resolution Mode* – LRM), seus princípios de funcionamento e também, o estado da arte de trabalhos realizados em território brasileiro até 2016.

1.1 História da altimetria

A altimetria radar foi desenvolvida para medir a forma da Terra (McGOOGAN *et al.*, 1974). As primeiras missões com utilização de radares na obtenção de informações geodésicas e oceanográficas surgiram na década de 1970, com o lançamento dos satélites SKYLAB, GEOS-3 e SEASAT (VIGNUDELLI *et al.*, 2011).

Já nas décadas de 1980 e 1990 a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES) fizeram investimentos significativos na área com o lançamento das missões Geosat (1985), ERS-1 (1991), TOPEX/Poseidon (1992) e ERS-2 (1995). As missões Geosat e ERS-1 tiveram como produtos mais relevantes os

modelos geoidal e de superfície da topografia oceânica (SMITH *et al.*, 1997). Ainda no século XX, a Rússia lançou o satélite GEOIK (parte da constelação Kosmos) destinado ao desenvolvimento de um modelo gravitacional e, posteriormente, de um geóide marinho (VIGNUDELLI *et al.*, 2011). No século XXI houve um crescimento significativo no número de missões lançadas. Essas missões (Tabela 1) tiveram um aumento na acurácia dos

dados obtidos, principalmente nos oceanos e superfícies de gelo.

As perspectivas futuras nos estudos envolvendo altimetria por satélite são bastante promissoras com o lançamento de diversas missões, com a incorporação de tecnologias que visam uma maior precisão na obtenção de dados altimétricos e podem melhorar a qualidade dos dados obtidos através de radar altimétrico.

Tabela 1: Missões Alitmétricas Século XXI

| Satélite | Agência | Lançamento | Altímetro | Banda | Período de revisita |
|------------|----------------------------|---------------|------------|--------|---------------------|
| Jason-1 * | CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA | 2001 | Poseidon-2 | Ku e C | 10 dias |
| ENVISAT * | ESA | 2002 | RA-2 | Ku | 30-35 dias |
| Icesat-1 | NASA | 2003 | Laser | - | 8 e 9 dias |
| Jason-2 * | CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA | 2008 | Poseidon-3 | Ku e C | 10 dias |
| Cryosat-2 | ESA | 2008 | Siral | Ku | 369 dias |
| HY-2A | CHINA | 2011 | - | Ku e C | 14 dias |
| SARAL * | CNES/ISRO | 2013 | AltiKa | Ka | 35 dias |
| Jason-3 * | CNES, NASA, EUMETSAT, NOAA | 2015 | - | Ku e C | 10 dias |
| Sentinel-3 | ESA | 2016 | - | Ku e C | - |
| Icesat-2 | NASA | Previsão 2017 | Laser | - | - |
| SWOT | CNES, NASA CSA | Previsão 2020 | Karin | Ka | 21 dias |
| Jason-CS | EUMETSAT | Previsão 2020 | - | - | - |

Fonte: Adaptado de (SULISTIOADI, 2013).

1.2 Princípios de funcionamento de um radar altimétrico

O termo radar é derivado de *Radio Detection And Ranging*, seu sistema é composto por um gerador de pulsos, um transmissor, um receptor, um gravador e uma antena, conforme ilustrado na Figura 1 (RIDENOUR, 1965).

Os radares funcionam com ondas eletromagnéticas nos comprimentos das micro-ondas (~1 mm-1m). No caso dos altímetros radar LRM, as bandas Ku e Ka são as mais comumente utilizadas (Tabela 1).

O satélite emite um pulso na direção da superfície, após interagir com a mesma a parte

refletida na direção do satélite é registrada. Sabendo-se o tempo gasto, a velocidade da luz e a distância entre o satélite e o elipsóide, é possível calcular a altitude da superfície (Figura 2).

A energia eletromagnética emitida pelo radar percorre a distância de ida e volta à superfície com velocidade próxima a da luz. A antena registra o tempo gasto para o sinal percorrer essa trajetória, o tempo medido é, então, dividido por dois e multiplicado pela velocidade da luz (CHELTON *et al.*, 1989). O valor encontrado é subtraído da altitude do satélite em relação ao elipsóide e, assim, é estimada a altitude da superfície com precisão centimétrica (GARDINI *et al.*, 1995).

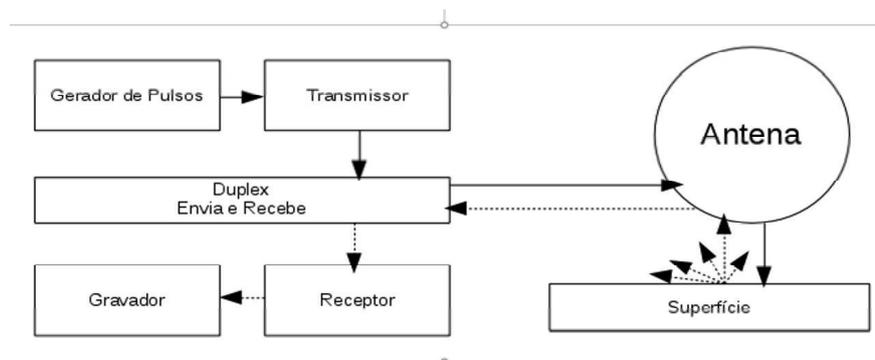


Fig. 1 – Esquema básico dos elementos que compõem um radar altimétrico, que são o gerador de pulso, o transmissor, o receptor, o gravador e uma antena. Adaptado de Jensen (2009).

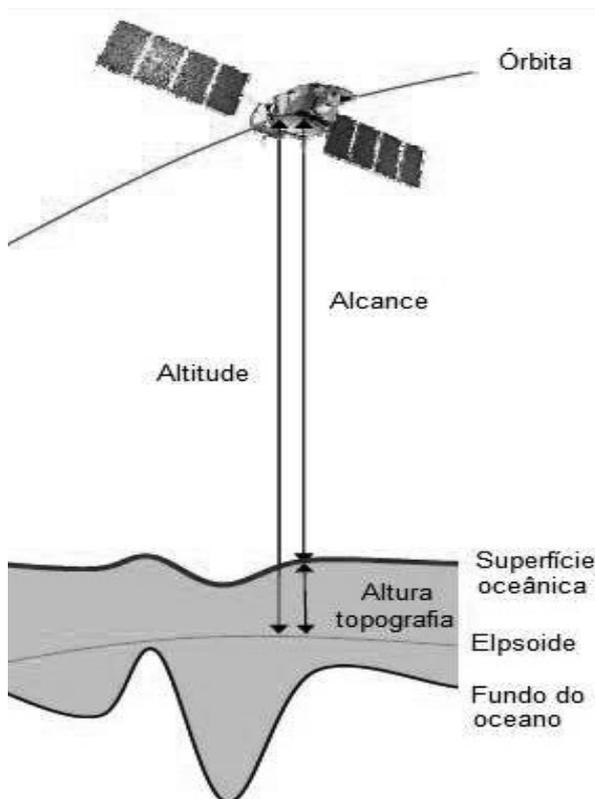


Fig. 2 – Princípio da altimetria. Para obter a altitude da superfície um pulso é enviado em direção à superfície, esse pulso é, em parte, refletido na direção do sensor onde é registrado. Adaptado de BRONNER *et al.*, 2013.

1.2.1 Funcionamento do radar altimétrico LRM

Os dados altimétricos utilizados pelos trabalhos citados neste artigo são obtidos através de sensores de baixa resolução (LRM). Nesse caso o sensor trabalha como um altímetro de pulso limitado, que é baseado na transmissão de um sinal de curta duração, com poucos nano-segundos (ns), e com largura de banda relativamente ampla (CHELTON *et al.*, 1989). O

sinal é transmitido de forma contínua e o retorno é processado e sumarizado com o objetivo de reduzir os ruídos causados por respostas múltiplas (FENOGLIO-MARC *et al.*, 2015). O tempo de duração entre a transmissão e o retorno de um pulso é medido e, conhecida a velocidade da luz, é possível estimar o alcance (*range*) das ondas eletromagnéticas emitidas pelo sensor do satélite, conforme Equação 1.

$$R = \frac{T * c}{2} \quad (1)$$

onde R é o alcance do satélite (*range*), T é o tempo gasto para percorrer a distância de ida e volta entre o satélite e a superfície e c é a velocidade da luz.

A variação do *range* do sinal é muito maior que aquela possível de ser registrada pelo sistema de gravação do satélite (ROCA *et al.*, 2009). Por isso é necessário que o sensor acompanhe a variação da superfície continuamente, isso é feito através do algoritmo de *tracker*. Esse algoritmo estima o tempo gasto para um pulso percorrer a distância de ida e volta entre o satélite e a superfície. Esse processo deve garantir a recepção de todos os retornos necessários para estimar a altitude da superfície. Em alguns casos, como no sistema implementado no satélite ENVISAT, a resolução do radar pode ser ajustada, o que resulta em melhores estimativas e menor quantidade de perda de dados (BACKER *et al.*, 2002).

Os valores de retorno correspondem a algumas centenas de pulsos, que são então discretizados e gravados na janela estimada pelo *tracker*. Esses valores correspondem à amplitude ou potência dos retornos, e são

registrados pelo gravador do radar. O conjunto de retornos sumarizados para um determinado ponto pode ser representado como uma forma de onda (*waveform*), conforme exemplificado na Figura 3.

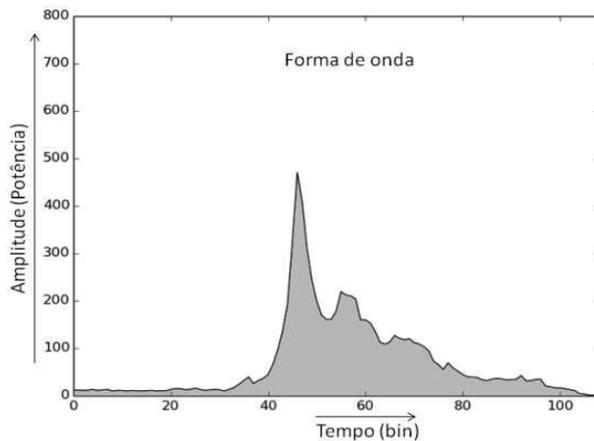


Fig. 3 - Forma de onda obtida sobre um lago. O eixo x representa o tempo e o eixo y corresponde às amplitudes do sinal.

As formas de onda (FO) representam, em média, uma variação altimétrica entre 40 e 100 metros, a depender da frequência e variação da largura da banda do sensor utilizado (BACKER *et al.*, 2007; BRONNER *et al.*, 2013). Cada um dos pontos gravados ao longo da projeção das órbitas dos satélites possui uma FO, a partir delas é possível calcular a altitude da superfície de forma precisa.

As ondas eletromagnéticas respeitam os princípios ópticos, sendo refletidas em varias direções e podem conter respostas de vários pontos da superfície (CHELTON *et al.*, 1989). Aquelas que são refletidas no nadir tendem a representar a resposta de maior potência e aparecem como picos nas FOs.

Quanto mais irregular for a superfície (refletor difuso), maior será a área responsável pelas respostas registradas. Esta área tem origem no ponto central (nadir) e expande de forma circular de acordo com as características da superfície e é chamada de pegada do satélite ou *footprint* (Figura 4).

Associado ao *tracker*, a pegada do satélite e as formas de onda (Figura 5), foram desenvolvidos os algoritmos *retracker*. Esses são utilizados para calcular a altitude das superfícies a partir da análise das respostas registradas nas formas de onda, dentre os algoritmos mais conhecidos tem-se o ICE-1, o ICE-2 e o Ocean. Algoritmos *retracker* podem ser divididos em dois tipos: os físicos e os empíricos. Os *retrackers* físicos são

baseados no conhecimento dos parâmetros físicos do retroespalhamento das micro-ondas. Já os modelos empíricos de classificação das formas de onda têm como base as propriedades estatísticas dos dados ou funções de ajuste das formas de onda (VIGNUDELLI *et al.*, 2011).

No primeiro momento, antes da onda eletromagnética atingir a superfície, nenhum retorno é gravado, a partir do momento que a superfície é atingida os retornos são gravados e o sinal se expande em forma de anéis concêntricos (CNES apud SULISTIOADI, 2013).

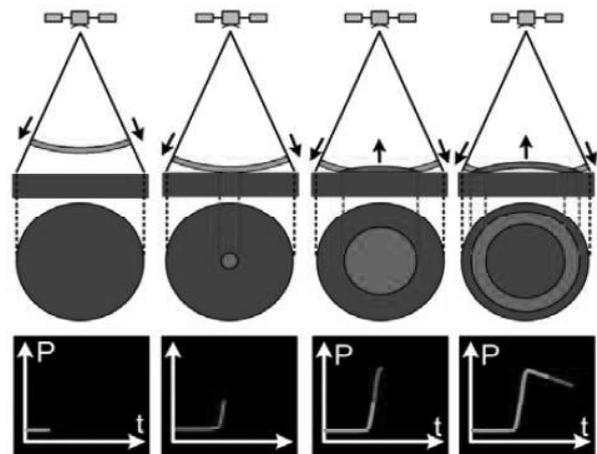


Fig. 4 – Expansão do sinal radar sobre o oceano.

O produto final obtido diretamente dos dados dos sensores radar LRM é a altitude das superfícies, para isso é necessário aplicar a Equação 2 (MAILLARD *et al.*, 2015).

$$H_a = H_s - (\rho + \text{iono} + \text{dry} + \text{wet} + \text{pt} + \text{set}) + GC \quad (2)$$

onde H_a é a altitude ortométrica, H_s é a altitude do satélite em relação ao elipsóide, ρ é o *range* (alcance), *ion* (correções ionosféricas), *dry* (correção da pressão atmosférica), *wet* (correção da umidade atmosférica), *pt* (correção da maré polar), *set* (correção da maré terrestre) e *GC* (correção da ondulação geoidal).

Devido à complexidade e diversidade das superfícies continentais e da incapacidade dos algoritmos *retracker* desenvolvidos para o monitoramento dos oceanos no tratamento correto das formas de onda geradas nesses ambientes, os *retrackers* são pouco eficientes na estimativa de nível de rios e lagos, principalmente nos de pequeno porte (SMITH, 1997).

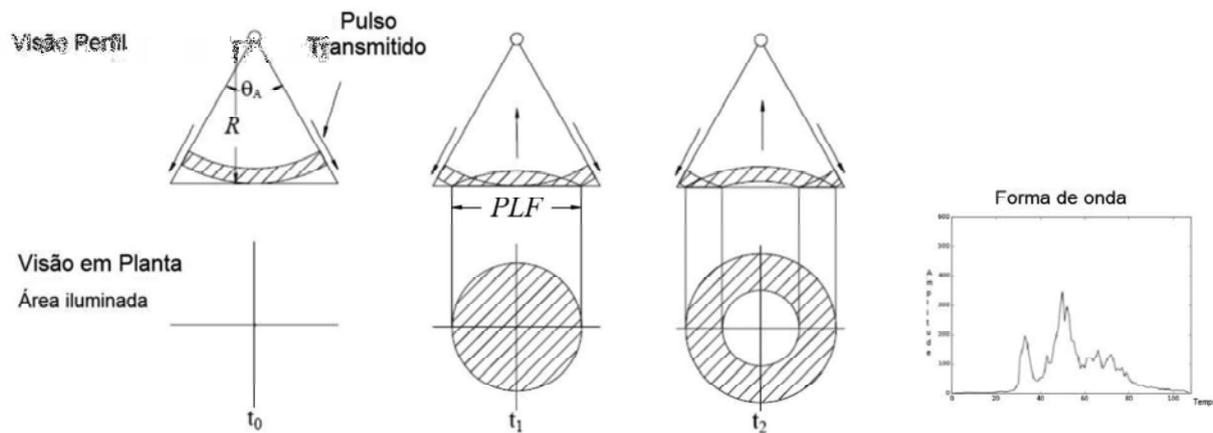


Fig. 5 – Representação em perfil e planta do sinal radar ao longo do tempo e a sua forma de onda. Conforme o tempo passa o círculo se expande em anéis concêntricos, como resultado desse processo tem-se a forma de onda, representada à direita. Fonte: adaptado de (LEE, 2008).

1.3 Dados altimétricos

Os dados de altimetria radar LRM são geralmente disponibilizados de forma gratuita para uso em pesquisas. As principais agências e instituições que hospedam esses dados são a NASA, a “European Space Agency” (ESA), a “Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data” (AVISO), a “Physical Oceanography Distributed Active Archiving Center” (PODAAC), “Indian Space Research Organization” (ISRO). Os dados gerados à bordo dos satélites são baixados através de estações terrestres distribuídas no mundo. Essas estações recebem os dados brutos do satélite e enviam para os centros de controle e processamento das agências responsáveis, que tratam os dados para melhoria da qualidade e precisão.

Os formatos de disponibilização dos dados para os usuários da altimetria por satélite são determinados, basicamente, pela necessidade de compressão para o armazenamento das informações. Com o crescimento no número de missões e o conseqüente crescimento na quantidade de dados gerados, surgiu a necessidade de um se utilizar um padrão que fosse eficiente no armazenamento dos dados e que garantisse sua consistência. Os formatos adotados tendem a não ser tão compactos, mas possibilitam uma maior flexibilidade de conteúdo e um maior nível de detalhamento dos metadados.

Produtos recentes de altimetria passaram a utilizar formatos mais padronizados, influenciados pela comunidade científica usuária e apoiadora das tecnologias *open-data* e *open source*. Os dois tipos de formatos de dados mais utilizados na altimetria radar são o *Hierarchical Data Format* (HDF) e o *Network Common Data Form* (NetCDF), sendo o segundo utilizado amplamente pela comunidade científica de estudos climatológicos e mais recentemente pela altimetria.

Esses formatos são autodescritivos, fazendo com que o programa desenvolvido para ler e analisar os dados altimétricos possa determinar seu próprio conteúdo. Dessa forma, as ferramentas necessitam de um número menor de parâmetros de configuração específicos para analisar dados de diferentes missões. As convenções determinadas pelo *NetCDF Climate Forecast Conventions* foram adotadas por vários projetos e grupos de pesquisa. Essas convenções definem metadados que descrevam o que os dados de cada variável armazenada representam, e as propriedades espaciais e temporais dos mesmos. Essas convenções facilitam a construção de aplicações com capacidades de extração, exibição e re-interpolação de dos dados de forma mais eficientes. Com isso o código pode determinar o conteúdo dos arquivos sem a necessidade de dados auxiliares, o que viabiliza a automatização na inclusão de dados em sistemas integrados, até mesmo em sistemas que não

tenham sido originalmente criados para trabalhar com altimetria (EATON *et al.*, 2003).

O ISRO e o AVISO fornecem registros de dados para diferentes radares altimétricos. Alguns serviços *online*, como o “*Centre de Topographie des Océans et de l’Hydrosphere*”, (CTOH) - <http://ctoh.legos.obs-mip.fr/> e o “*Open Altimeter Database*” (*OpenADB*), disponibilizam os dados de altimetria para *download*.

Além desses, o projeto “*Prototype Innovant de Systeme de Traitement pour les Applications Cotieres et l’Hydrologie*” (PISTACH) fornece dados do Jason-2, com maior quantidade de processamentos, o que torna estes dados mais precisos e acurados para regiões costeiras, e que são disponibilizados de forma rápida (quase em tempo real) para zonas costeiras (PISTACH Handbook, 2010).

Alguns serviços *online*, como o “*Database for Hydrological Time Series over Inland Waters*” (DAHITI) fornecem dados de melhor acurácia e precisão, produzidos a partir da calibração cruzada dos produzidos pelos satélites ENVISAT, ERS-2, Jason-1, Jason-2, Topex Poseidon e SARAL/AltiKa, que incluem as incertezas das medições com a incorporação da abordagem do filtro de Kalman (SCHWATKE *et al.*, 2015). Outro banco de dados que disponibiliza os produtos com maior nível de processamento é o *Radar Altimeter Database System* (RADS), da Universidade Tecnológica de Delft, esses dados são validados e calibrados, também de forma cruzada.

Uma serie de centros de pesquisa e universidades fornecem dados de nível água (produto final da altimetria por satélite). Exemplos de iniciativas que oferecem esses dados são: o programa *Hydrology from Space*, do CNES, mantido pelo *Laboratoire d’Études en Geophysique et Oceanographie Spatiale* (LEGOS), que oferece produtos de altimetria para reservatórios, lagos, terras úmidas e rios (CRETAUX *et al.*;2011); o *Global Reservoir and Lake Monitor* (GRLM), do Serviço de Agricultura Exterior do Departamento Americano de Agricultura (USDA/FAS) juntamente com a NASA (BIRKETT *et al.*, 2011) e o programa *River and Lake European Space Agency/De Montfort University* (ESADMU) (BERRY & WHEELER, 2009). Recentemente, o *Meteorological and Oceanographic Satellite*

Data Archival Centre (MOSDAC) também passou a disponibilizar dados derivados de altimetria para nível de rios, reservatórios e vazão para alguns locais na Índia.

1.4 Hidrologia

Satélites altimétricos radar têm a vantagem de coletar medidas globais, homogêneas e de forma constante o que possibilita a realização de monitoramento sistemático ao longo do tempo, sem depender das condições atmosféricas e da luz solar. Além disso, os dados possuem referência espacial absoluta, o que facilita a comparação entre as medidas realizadas ao longo do globo, independente do país, da época e da missão altimétrica.

Embora o foco inicial da altimetria por satélite não seja a hidrologia, a sua contribuição para os estudos nesta área já foi amplamente demonstrada (CALMANT & SEYLER, 2006). Os dados produzidos podem ser utilizados de modo complementar aos dados convencionais (estações fluviométricas), para a criação de séries temporais, perfis altimétricos de rios, geração de dados para modelos hidrológicos e, também, para o nivelamento de estações *in situ*. A cobertura global é uma vantagem, que torna possível realizar medidas em áreas de difícil acessibilidade em todo planeta. Por outro lado, um dos maiores problemas está relacionado a frequência temporal (de 10 a 35 dias) dos satélites (ROSMORDUC *et al.*, 2006), que é incompatível com o modelo tradicional de medições diárias. Além disso, a incerteza é também um fator limitador desta área, uma vez que o erro das medições em águas interiores pode variar de poucos centímetros (nos melhores casos) a alguns metros (nos piores casos). Devido às potencialidades e às possibilidades de evolução dos sensores radar nos próximos anos, além da grande quantidade de missões presentes e futuras, a altimetria por satélite tende a se tornar cada vez mais útil e eficiente. Problemas como a frequência temporal poderão ser sanados com estudos multimissão. Já a acurácia tende a melhorar com o surgimento de novas tecnologias e sensores como os sensores em modo “SAR” (*synthetic aperture radar*) em “SARIN” (*synthetic aperture radar interferometer*) como os instrumentos a bordo das missões CryoSat-2 (SAR e SARIN) e Sentinel-3 (SAR).

2. O ESTADO DA ARTE DA ALTIMETRIA SATÉLITE RADAR

A altimetria por satélite radar tem sido amplamente utilizada na hidrologia e hoje conta com um crescente número de trabalhos, resultado da maior disponibilidade de dados gerados por diversos satélites. Nesse contexto, é importante ter um panorama das principais aplicações, dos trabalhos realizados com seu uso, aqui optamos por dar ênfase aqueles realizados em território brasileiro. Além disso, destaca-se as perspectivas futuras da altimetria radar por satélite, que podem colaborar ainda mais com o uso na hidrologia.

2.1 Aplicabilidade

A altimetria radar por satélite apresenta aplicações em diversas áreas tais como a dinâmica tropical dos oceanos, a variação do nível dos mares em larga escala, a construção de séries históricas, os estudos de fenômenos naturais globais (ex.: *El Niño e La Niña*) (FU & LE TRAON, 2006; BERGÉ-NGUYEN *et al.*, 2008; LUO *et al.*, 2015).

A maioria dos estudos em altimetria é feito para os oceanos, uma vez que os sensores foram, em sua maioria, desenvolvidos para monitorar esse tipo de superfície. Nessas áreas são apresentados os melhores resultados, já que as técnicas são bem desenvolvidas e a quantidade de trabalhos é grande. O uso da altimetria, porém, vai além das aplicações em oceanos, a altimetria tem sido utilizada para estudos em regiões costeiras e um número crescente de trabalhos tem sido realizado em áreas continentais (CALMANT *et al.*, 2006;2008).

No que diz respeito aos estudos hidrológicos, os dados altimétricos produzidos podem ser utilizados para complementar os dados convencionais produzidos nas estações fluviométricas, na criação de séries temporais, na elaboração de perfis altimétricos de rios e, também, para o nivelamento de estações *in situ* (CALMANT & SEYLER, 2006; BIRKINSHAW *et al.*, 2010; MICHAILOVSKY *et al.*, 2012; BECKER *et al.*, 2014).

2.2 Estudos de altimetria no Brasil

No Brasil os estudos com o uso da altimetria radar são mais frequentes na bacia Amazônica, pois as técnicas aplicadas a mares e oceanos podem ser utilizadas de forma eficaz

devido à dimensão dos corpos hídricos desta região, que torna as respostas espectrais mais semelhantes àsquelas obtidas nos oceanos.

O primeiro trabalho realizado no Brasil foi o de Koblinsky *et al.* (1993), com a utilização do satélite Geosat, que foi o primeiro com precisão suficiente para aplicação em hidrologia. O estudo foi realizado para quatro pontos na bacia Amazônica, de modo que a órbita do satélite estivesse próxima a estações fluviométricas convencionais. Foi desenvolvido um método automatizado para aplicação das técnicas de altimetria, o qual produziu um erro médio quadrático de 1,2 metros em relação aos dados *in situ*, já na aplicação da técnica manual o erro foi de 0,7 metros considerado como promissor.

LEON *et al.* (2006) calculou a relação nível-vazão para 21 estações virtuais na bacia do Rio Negro com dados ENVISAT. O estudo estabeleceu curvas chaves para as 21 estações virtuais, e apresentou um método para minimizar os erros médios quadráticos que permitiu estimar fluxo zero efetivo e conseqüentemente a profundidade das 21 seções com uma diferença média de 1,1 metros entre a profundidade medida e a estimada. O método permitiu a extração da elevação de fundo, declividade de fundo e superfície livre e coeficientes de rugosidade a partir da combinação de dados de altimetria e vazão.

Visando auxiliar no monitoramento de vazão de bacias hidrográficas com baixa quantidade de estações fluviométricas, Getirana *et al.* (2009) utilizaram os dados altimétricos com o desenvolvimento de uma metodologia baseada na distribuição de chuva calibrada e validada com o uso de dados locais. O Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH) foi aplicado na bacia hidrográfica do rio Branco (sub-bacia do rio Amazonas) e os resultados das vazões calculadas indicaram uma relação entre a acurácia do modelo e o tamanho da área de drenagem, o que foi atribuído primeiramente à baixa quantidade de dados pluviométricos e também a restrições do modelo, que foi desenvolvido para grandes bacias. Além disso, foram feitas análises quanto a declividade dos rios, que foram comparados aos dados ENVISAT e *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Os resultados sugerem que os dados gerados por altimetria de satélite têm maior

acurácia entre os outros analisados e deveriam ser utilizados sempre que disponíveis. Getirana *et al.* (2013) realizou um segundo estudo na bacia Amazônica buscando analisar o potencial de grandes conjuntos de dados de altimetria na configuração de uma rede complementar de monitoramento capaz de fornecer dados de vazão em áreas não monitoradas.

De Paiva *et al.*, 2013, fizeram a modelagem hidrológica/hidrodinâmica da Bacia do Rio Amazonas, com a utilização do MGB-IPH. Para fins de validação foram utilizados dados observados através do sensoriamento remoto. Os dados de nível de água obtidos através da altimetria radar, através do satélite ENVISAT, foram um dos dados utilizados na validação.

Da Silva *et al.* (2010), compararam a performance de dois algoritmos de *retracker* (ICE-1 e ICE-2) para dados de duas missões altimétricas, ERS-2 e ENVISAT. A comparação foi aplicada para diversos trechos de rios da bacia amazônica que variam tanto em extensão quanto em largura. Quando comparados aos dados de estações convencionais, os erros médios foram de 12 centímetros nos melhores casos, 40 centímetros na maior parte das situações e muitos metros nas piores situações. Os dois *retrackers* apresentaram resultados semelhantes, quanto aos satélites, foi constatado que o ENVISAT apresentou uma melhoria na altimetria, quando comparado com o ERS-2.

Ainda em 2010, Roux *et al.* (2010) propuseram a comparação entre aspectos qualitativos e quantitativos entre três métodos diferentes de criação de estações virtuais de monitoramento: a) seleção manual de pontos; b) método semi-automático baseado nas características de cobertura do solo que permite a localização da superfície de água do corpo hídrico estudado; e c) procedimento inédito totalmente automático que utiliza um modelo digital de elevação e a estimativa da largura do rio. O estudo foi aplicado na bacia amazônica e os resultados obtidos através desses três métodos são comparados, nos quais o erro de nível de água absoluto foi de 46, 26 e 15 centímetros respectivamente, para 95, 90 e 80 por cento dos valores de nível de água gerados. Os resultados mostraram que o método automático teve erros próximos aqueles obtidos pelo método manual, isso gera a possibilidade de usar a altimetria

por satélite para obter séries temporais de nível de água em grande escala e ajudou a aumentar consideravelmente a aplicação da altimetria radar em hidrologia.

No ano de 2005, a bacia Amazônica foi afetada por um evento climático extremo, com uma seca excepcional. Devido ao número limitado de estações fluviométricas *in situ* ao longo da bacia não foi possível quantificar de forma precisa os dados de nível e vazão do rio no período. Frappart *et al.*, (2012) com a utilização de dados altimétricos multimissões observaram e calcularam a quantidade de água entre 2003 e 2007 de modo a monitorar mensalmente o nível de água armazenada na bacia Amazônica. Assim, a partir dos dados de sensoriamento remoto constatou-se que, na seca de 2005 o nível de armazenamento foi, aproximadamente, 76% menor que a média calculada entre 2003-2007. Deste modo, mostrou-se a aplicabilidade da altimetria radar como auxílio na detecção dos efeitos causados pelas mudanças climáticas.

Costi (2012) comparou as medidas altimétricas obtidas por radar com aquelas disponíveis para as estações *in situ* entre os anos de 2002 e 2008. Os dados remotos acompanharam o regime de variação de níveis registrados nas estações convencionais, o que indica o grande potencial de uso desses dados como fonte complementar em estudos hidrológicos.

Schwatke *et al.* (2015) criaram uma série temporal de dados para lagos e rios na América com o uso combinado das missões altimétricas ENVISAT, ERS-2, Jason-1 e 2, TOPEX/Poseidon e SARAL. Os erros médios quadráticos variaram entre 4 e 36 centímetros para lagos, já para rios os erros ficaram entre 8 e 114 centímetros, quando comparados aos dados das estações convencionais. Com a aplicação do filtro de Kalman, o erro médio foi de 19,6 centímetros para rio Madeira, no Brasil, em frente aos 45 e 53 centímetros obtidos por técnicas convencionais.

Paris *et al.* (2016) utilizaram radares altimétricos orbitais como suporte à modelagem de vazão. Nesse caso foram selecionados dados dos satélites Jason-2 e ENVISAT para elaboração de séries temporais para mais de 100 afluentes do rio Amazonas. Esse estudo mostrou o grande potencial da altimetria radar para o fornecimento de dados para modelos hidrológicos de grandes

bacias, uma vez que foi possível a utilização dos dados altimétricos no modelo. Como pode ser constatado a partir dos trabalhos citados a altimetria por satélite radar tem um grande potencial no monitoramento espaço-temporal das variações do nível de água, na modelagem hidrológica, entre outros. Porém os estudos são mais concentrados em grandes rios, com o Amazonas. Os estudos em regiões fora da Amazônia são mais raros, devido a própria natureza dos rios (menor porte), da topografia das margens e da região, entre outros fatores que dificultam a obtenção de dados com boa precisão e acurácia. Estudos pioneiros fora da bacia Amazônica foram desenvolvidos por Maillard e Calmant (2013), Pereira e Maillard (2014), Abreu e Maillard (2014) e Maillard *et al.* (2015).

Com a utilização de dados das missões ENVISAT e SARAL, Maillard e Calmant (2013), fizeram um estudo em um trecho de 1000 km do rio São Francisco. No artigo foram descritos uma série de processamentos espaciais para corrigir medidas de nível não relacionadas com a água. A acurácia média obtida no trecho do rio São Francisco foi de 60 cm (45 cm se eliminados os *outliers*). Posteriormente, MAILLARD *et al.* (2015) calcularam o nível de água para várias estações virtuais de monitoramento no rio São Francisco, o qual é considerado estreito para aplicações de altimetria radar em hidrologia. Técnicas de processamento baseadas na forma e largura do rio, medições fora do nadir (*off-nadir*) e conhecimentos prévios das áreas de estudo, foram utilizadas com o intuito de melhorar a precisão das medidas de nível. Quando comparado às medidas *in situ*, os erros médios quadráticos foram menores que 0,6 metros e, nos melhores casos, 0,3 metros. Os resultados mostraram que a acurácia varia significativamente dependendo de fatores ambientais tais como a cobertura do solo e a variação topográfica nas margens.

Pereira e Maillard (2014), buscando compreender a influência do comportamento da cobertura do solo nas áreas adjacentes às estações virtuais de monitoramento distribuídas ao longo do território brasileiro, analisaram as formas de onda das diferentes classes. Foram amostrados e analisados dados das coberturas mais comuns que são: agricultura, floresta nativa, floresta plantada, cerrado, pastagem, áreas urbanas e

águas abertas. As classes de águas abertas e floresta apresentaram boa separabilidade quando comparadas as outras classes. Entretanto, estas duas apresentaram respostas muito similares podendo ser facilmente confundidas entre si. Um estudo mais aprofundado sobre a influência da cobertura do solo e das formas de cobertura vegetal poderá trazer melhoria na acurácia das medidas de nível em rios de pequeno e médio porte.

Abreu e Maillard (2014) estudaram a variação de volume da represa de Três Marias, no Alto São Francisco. Os dados altimétricos radar foram comparados com os dados *in situ*, neste caso o erro médio quadrático foi de 0,24 metros, próximo ao encontrado em estudos similares (CALMANT *et al.*, 2006; DA SILVA *et al.*, 2010; MAILLARD & CALMANT, 2013). Além disso, Abreu e Maillard (2014) trabalharam com a relação entre cota, área do espelho d'água e volume da represa de Três Marias. A partir dessa relação foi proposto um modelo de três variáveis, onde a partir de um desses dados é possível inferir sobre os outros dois.

3. Perspectivas Futuras

O uso da altimetria radar possui uma série de vantagens para a hidrologia. A cobertura global torna possível realizar medidas em áreas de difícil acessibilidade, além de constituir um referencial comum na superfície terrestre. O tempo entre a aquisição e disponibilização dos dados é quase em tempo real permitindo monitoramento mais próximo aos eventos climáticos extremos. Por outro lado, uma das desvantagens relaciona-se a taxa de revisita (de 10 a 35 dias) dos satélites (ROSMORDUC, 2011), que é incompatível com o modelo tradicional de medições diárias; um problema que a capacidade de utilizar dados de várias missões promete reduzir em grande parte nos próximos anos. A incerteza é outro fator limitador a altimetria, uma vez que o erro das medições em águas continentais pode variar de poucos centímetros (nos melhores casos) a alguns metros (nos piores casos). Além dos avanços tecnológicos em sensores, são as pesquisas em técnicas de processamento que representam a melhores formas de aprimorar a acurácia das medições.

Devido a grande quantidade de missões presentes e futuras, a evolução dos sensores radar

e suas potencialidades de aplicação, a altimetria radar por satélite tende a tornar-se o futuro para os estudos de monitoramento de nível e vazão de rios. As missões previstas para os próximos anos (Sentinel-3, Jason-CS e SWOT) vão trazer melhorias significativas em todos os aspectos das aplicações hidrológicas da altimetria por satélite. Devido a maior resolução espacial dos sensores, o que poderá reduzir a contaminação dos dados por respostas vindas de áreas vizinhas aos corpos d'água, além da introdução de novos tipos de sensores, que tendem a ter uma maior precisão e acurácia na obtenção dos dados.

Conclusão

A utilização dos dados altimétricos obtidos por sensoriamento remoto já complementa os dados obtidos de forma tradicional (estações *in situ*), e permite obter dados em áreas de difícil acesso.

A maior parte dos estudos realizados em território brasileiro está relacionada à região amazônica. Isso ocorre pela possibilidade de utilização direta das técnicas e algoritmos já desenvolvidos para os estudos oceânicos. Os rios dessa região possuem larguras maiores ou compatíveis com o tamanho dos *footprint* dos sensores em modo LRM. Ademais, a quantidade de pontos sobrepostos a água são, na maioria dos casos, grande, o que permite gerar boas medições. Por outro lado, as aplicações fora do contexto amazônico são ainda escassas, devido às limitações impostas pelo porte dos rios (pequeno e médio) e também pela resolução espacial dos sensores embarcados nas missões atuais. O uso da altimetria para a medição do nível em rios de pequeno e médio porte é influenciado por diversos fatores, como a contaminação do sinal radar, respostas fora do nadir (*off-nadir*), baixa quantidade de pontos sobrepostos ao curso d'água, inexistência de técnicas e algoritmos próprios para lidar com a natureza desses rios, entre outros.

O aprofundamento nos estudos e técnicas de processamento de dados tende a oferecer medidas de nível com maior acurácia. Além disso, o lançamento de novas missões com sensores mais precisos e de tecnologia SAR e SARIN irá permitir a expansão das aplicações para outras regiões do Brasil. Com isso, é esperado que mais estudos sejam realizados fomentando a criação

de bases de dados mais robustas que ajudem a melhorar o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, inclusive em áreas remotas.

Referências Bibliográficas

ABREU, L. G. A. C.; MAILLARD, P. A model based on satellite altimetry and imagery to evaluate water volume changes in a reservoir in Brazil. In: **SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics**, p. 92391B-1 - 92391B-13, 2014.

BACKER, S., O., BOMBACI, C., ZELI, P., VENDITTI, O., ZANIFE, B., SOUSSI, J., DUMONT, J., STUM, M., MILAGRO PEREZ, e BENVENIST, J. **ENVISAT RA2/MWR Product Handbook**. 2007. 204p. Disponível em: <<http://wwwwcpq.mssl.ucl.ac.uk/RA2Handbook/concepts/ra2/ra2-mwr-PH.html>>. Acesso em: 02 Junho 2014.

BENETTI, A.; BIDONE, F. . O meio ambiente e os recursos hídricos. **Hidrologia: ciência e aplicação**, v. 2, p. 651-658, 1993.

BERGÉ-NGUYEN, M.; CAZENAVE, A.; LOMBARD, A.; LLOVEL, W; VIARRE, J.; CRETAUX, J.F.; Reconstruction of past decades sea level using thermosteric sea level, tide gauge, satellite altimetry and ocean reanalysis data. **Global and Planetary Change**, v. 62, n. 1, p. 1-13, 2008.

BERRY, P. A. M.; GARLICK, J. D.; FREEMAN, J. A.; MATHERS E. L. . Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, p. 1-4, 2005.

BIRKINSHAW, S. J.; O'DONNELL, G.; MOORE, P.; KILSBY C.; FOWLER, H.; BERRY, P. Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the Mekong River. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 26, p. 3811-3825, 2010.

BRONNER, E.; GUILLOT, A.; PICOT, N.; NOUBEL, J. . **SARAL/AltiKa products handbook**. Toulouse: CNES SALP-MU-M-OP-15984-CN, 2013. 77 p.

CALMANT, S.; SEYLER, F. . Continental surface waters from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1113-1122, 2006.

- CALMANT, S.; SEYLER, F.; CRETAUX, J. F. . Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4-5, p. 247-269, 2008.
- CHELTON, D. B.; WALSH, E. J.; MACARTHUR, J. L. Pulse compression and sea level tracking in satellite altimetry. **Journal of atmospheric and oceanic technology**, v. 6, n. 3, p. 407-438, 1989.
- COSTI, A. C. Z. **Avaliação de dados altimétricos de níveis de água adquiridos pelo satélite ENVISAT na bacia amazônica**. Dissertação de Mestrado. Brasília, Distrito Federal, 2012. 158 p.
- CRÉTAUX, J. F.; BIRKETT, C. . Lake studies from satellite radar altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1098-1112, 2006.
- CRÉTAUX, J. F.; JELINSKI, W.; CALMANT, S.; KOURAEV, A.; VUGLINSKI, V.; BERGÉ-NGUYEN, M.; GENNERO, M.-C.; NINO, F.; ABARCA DEL RIO, R.; CAZENAVE, A.; MAISONGRANDE, P. . SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. **Advances in space research**, v. 47, n. 9, p. 1497-1507, 2011.
- EATON, B.; GREGORY, J.; DRACH, B.; TAYLOR, K.; HANKING, S.; CARON, J.; PAMMENT, A. . **NetCDF Climate and Forecast (CF) metadata conventions**. 2003. 147 p.
- FENOGLIO-MARC, L.; DINARDO, S.; SCHARROO, R.; ROLAND, A.; SIKIRIC, M. D.; LUCAS, B.; WEISS, R. . The German Bight: A validation of CryoSat-2 altimeter data in SAR mode. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 11, p. 2641-2656, 2015.
- FRAPPART, F.; PAPA, F.; da SILVA, J. S.; RAMILLIEN, G.; PRIGENT, C.; SEYLER, F.; CALMANT, S. . Surface freshwater storage and dynamics in the Amazon basin during the 2005 exceptional drought. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, p. 044010, 2012.
- FU, L. L.; LE TRAON, P. -Y. Satellite altimetry and ocean dynamics. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14, p. 1063-1076, 2006.
- GARDINI, B.; GRAF, G.; RATIER, G. The instruments on ENVISAT. **Acta Astronautica**, v. 37, p. 301-311, 1995.
- GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M. -P.; CALMANT, S.; ROUX, E.; FILHO, O. C. R.; MANSUR, W. J.;. Hydrological monitoring of poorly gauged basins based on rainfall-runoff modeling and spatial altimetry. **Journal of Hydrology**, v. 379, n. 3, p. 205-219, 2009.
- GETIRANA, A. C. V.; PETERS-LIDARD, C. Estimating water discharge from large radar altimetry datasets. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 3, p. 923-933, 2013.
- GOVATSKI, C. A. H. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco-subprojeto 4.7: diagnóstico e proposta de complementação da rede hidrometeorológica da bacia do São Francisco**. Brasília: ANA. GEF/PNUMA/OEA, 2002.
- GLEICK, P. H.; AJAMI, N. . **The world's water volume 8: The biennial report on freshwater resources**. Island press, 2014. 478 p.
- HARVEY, K. D.; GRABS, W. (Eds.). **WMO Report of the GCOS/GTOS/HWRP Expert Meeting on the Implementation of a Global Studies**. Toronto, Canadá, 18-20 Novembro, 2003. 51 p.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009. 598p.
- KOBLINSKY, C. J.; CLARKE, R. T.; BRENNER, A. C.; FREY, H. . Measurement of river level variations with satellite altimetry. **Water Resources Research**, v. 29, n. 6, p. 1839-1848, 1993.
- LEE, H. K. . **Radar altimetry methods for solid earth geodynamics studies**. Tese de Doutorado. The Ohio State University, 2008. 116 p.
- LEON, J. G.; CALMANT, S.; SEYLER, F.; BONNET, M. -P, CAUHOPÉ, M.; FRAPPART, F.; FILIZOLA, N.; FRAIZY, P. . Rating curves and average water depth estimation at the upper Rio Negro from altimetric spatial data and calculated remote discharges. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 481-496, 2006.
- LUO, W.; YI, L.; YU, Z.; SUN, H.; YUAN, L. Barycenter reflected equatorial Pacific sea level structure evolution and its indication of ENSO events. **Oceanologia**, v. 57, n. 2, p. 107-115, 2015.

MAILLARD, P.; CALMANT, S. . Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology. In: **SPIE Remote Sensing**, International Society for Optics and Photonics, 2013. p. 88870W-88870W-14.

MAILLARD, P.; BERCHER, N.; CALMANT, S. . New processing approaches on the retrieval of water levels in ENVISAT and SARAL radar altimetry over rivers: A case study of the São Francisco River, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 156, p. 226-241, 2015.

MCGOOGAN, J. T.; MILLER, L. S.; BROWN, G. S.; HAYNE, G. S. . The S-193 radar altimeter experiment. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 6, p. 793-803, 1974.

MICHAILOVSKY, C.I.; McENNIS, S.; BERRY, P.; SMITH, R.; BAUER-GOTTWEIN, P. . River monitoring from satellite radar altimetry in the Zambezi River basin. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 7, p. 2181-2192, 2012

PAPA, F.; BALA, S. K.; PANDEY, R. K.; DURAND, F.; GOPALAKRISHNA, V. V.; RAHMAN, A.; ROSSOW, W. B. . Ganga-Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 117, n. C11, p. 1-13, 2012.

de PAIVA, R. C. D. . Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013.

PARIS, A.; de PAIVA, R. C.; da SILVA, J. S.; MOREIRA, D. M.; CALMANT, S.; CARAMBOIS, P. A.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; SEYLER, F. Stage-discharge rating curves based on satellite altimetry and modeled discharge in the Amazon basin. **Water Resources Research**, v. 52, n. 5, p. 3787-3814, 2016.

PEREIRA, E. O.; MAILLARD, P. . The effect of land cover type on radar altimeter response and its influence on retracker algorithms. In: **SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics**, p. 923905-923905-13, 2014.

POSTEL, S.; REEVE, T.; McGUIGAN, C. .

Change the course: A new model of freshwater conservation and restoration. Disponível em < <http://www.thesolutionsjournal.com/print/237223>>. Acesso: 10 abril 2016.

RIDENOUR, L. N. (Ed.). **Radar system engineering**. Nova York, 1965. 748 p.

RIČKO, M.; BIRKETT, C. M.; CARTON, J. A.; CRÉTAUX, J. F. . Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 6, n. 1, p. 061710-061710, 2012.

ROCA, M.; LAXON, S.; ZELLI, C. . The ENVISAT RA-2 instrument design and tracking performance. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions online**, v. 47, n. 10, p. 3489-3506, 2009.

ROSMORDUC, V.; BENVENISTE, J.; PICOT, N.; DORANDEU, J.; EARITH, D.; LAURET, O.; SICARD, P. . Basic Radar Altimetry Toolbox and radar Altimetry Tutorial: A New Set of Tools for All Altimetry Users. In: **ESA Special Publication**. 2006.

ROSMORDUC, V. . **Radar altimetry tutorial**. J Benveniste e N. Picot Ed, 2011. 301 p.

ROUX, E.; da SILVA, J. S.; GERITANA, A. C.; BONNET, M. P.; CALMANT, S.; MATINEZ, J. M.; SEYLER, F. . Producing time series of river water height by means of satellite radar altimetry—a comparative study. **Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 1, p. 104-120, 2010.

SCHWATKE, C.; DETTMERING, D.; BOSCH, W.; SEITZ, F. . DAHITI—an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 10, p. 4345-4364, 2015.

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

SMITH, W. H. F.; SANDWELL, D. T. . Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science**, v. 277, n. 5334,

p. 1956-1962, 1997.

SULISTIOADI, Y. B. . **Satellite altimetry and hydrologic modeling of poorly-gauged tropical watershed**. Tese de Doutorado. The Ohio State University, 2013. 136 p.

TUCCI, C. E. M. I. . **Hidrologia: ciência e**

aplicação. Porto Alegre: Editora da , 2012. 943 p.

VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. (Ed.). **Coastal altimetry**. Springer Science & Business Media, 2011. 566 p.

Apêndice D

Artigo-3

AN ORIGINAL PROCESSING METHOD OF SATELLITE ALTIMETRY FOR ESTIMATING WATER LEVELS AND VOLUME FLUCTUATIONS IN A SERIES OF SMALL LAKES OF THE PANTANAL WETLAND COMPLEX IN BRAZIL

Paulo Henrique Costa^{a,*}, Eric Oliveira Pereira^a, Philippe Maillard^a

^aUFMG, Departamento de Geografia, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte - MG, Brazil
paulohdacosta@gmail.com; ericpereiraufmg@gmail.com; philippe@ufmg.br

Commission VII, WG VII/4-5

KEY WORDS: Satellite altimetry, Envisat, Saral, Waveform, Retracker, Water level, Small lakes, Pantanal

ABSTRACT:

Satellite altimetry is becoming a major tool for measuring water levels in rivers and lakes offering accuracies compatible with many hydrological applications, especially in uninhabited regions of difficult access. The Pantanal is considered the largest tropical wetland in the world and the sparsity of *in situ* gauging station make remote methods of water level measurements an attractive alternative. This article describes how satellites altimetry data from Envisat and Saral was used to determine water level in two small lakes in the Pantanal. By combining the water level with the water surface area extracted from satellite imagery, water volume fluctuations were also estimated for a few periods. The available algorithms (retrackers) that compute a range solution from the raw waveforms do not always produce reliable measurements in small lakes. This is because the return signal gets often “contaminated” by the surrounding land. To try to solve this, we created a “lake” retracker that rejects waveforms that cannot be attributed to “calm water” and convert them to altitude. Elevation data are stored in a database along with the water surface area to compute the volume fluctuations. Satellite water level time series were also produced and compared with the only nearby *in situ* gauging station. Although the “lake” retracker worked well with calm water, the presence of waves and other factors was such that the standard “ice1” retracker performed better on the overall. We estimate our water level accuracy to be around 75 cm. Although the return time of both satellites is only 35 days, the next few years promise to bring new altimetry satellite missions that will significantly increase this frequency.

1. INTRODUCTION

Satellite altimetry is becoming an important tool for measuring water levels in rivers, lakes and wetlands and offers accuracies compatible with many applications such as water resource monitoring, flood control and even water volumes and discharge when combined with other data like satellite imagery or *in situ* data. It is especially useful in uninhabited regions of difficult access like the Pantanal wetland complex of Brazil, Bolivia and Paraguay. With an area of 150 000 sq km the Pantanal is considered both the largest sedimentary flood plain and the largest tropical wetland complex in the world being characterized by a major annual flood pulses and a very dynamic process of sediment transport. The Pantanal is a complex landscape of rivers, lakes and wetlands (Figure 2) with a high biodiversity linked to its specific hydrological regime of flood pulses. Given the hydrological and ecological importance of the region, monitoring its dynamic is essential to the protection of this fragile ecosystem and to the survival of the populations that depend on it. The sparsity of *in situ* gauging stations and the difficulty of access make the region difficult to monitor and remote methods of water level measurements can be the only viable alternative.

Satellite altimetry was originally developed mostly for the study of ocean topography and phenomena like “El Niño” and “La Niña” but is being increasingly used for applications in coastal and inland waters (Da Silva et al., 2012). Numerous studies have been published in recent years to demonstrate the application of satellite altimetry for measuring water levels in rivers, lakes and reservoirs. The systematic monitoring of water storage variation in lakes, with regularity and precision, is of utmost importance

for understanding the environmental processes of the surrounding areas, the interference of the climate changes on the water availability and better management of the water supply. Due to the complexity of the factors in which the balance of input and output of water from lakes depends on, individually monitoring each one of them is still considered infeasible (Créaux et al., 2011).

Satellite altimetry data can present itself either as one of a few pre-processed altitude range measurement for either ocean or ice or as a the raw waveform returns from the radar instruments. It has been shown by a number of authors that the available retracker (ocean or ice) do not always produce very reliable measurements in continental waters, especially in small lakes or rivers of less than 1 km in width (Berry et al., 2005; Siddique-E-Akbor et al., 2011). This is because none of the available retracker was developed for inland waters (Sulistioadi et al., 2015). Since the radar footprint is much larger than these water bodies, the return signal gets often “contaminated” by the surrounding land.

This article describes a preliminary study to evaluate the potential of using altimetry data from Envisat and Saral satellites combined with satellite imagery to estimate water volume fluctuations in two small lakes in the Northwestern part of the Pantanal known as the Amolar region. We also implemented and tested a new retracker (baptised Lake1) specifically for calm water lakes.

2. BACKGROUND ON SATELLITE ALTIMETRY IN LOW RESOLUTION MODE (LRM)

The principle of satellite altimetry is simple: the radar antenna sends pulses (time t_0) that reach the Earth’s surface at near speed of light and are reflected back towards the antenna (time t_1) which

*Corresponding author

records the time needed for the trajectory back and forth (Chelton et al., 2001). By dividing the time difference by two ($\frac{t_0 - t_1}{2}$), and subtracting it from the satellite's altitude, a precise estimate (in the order of centimetres) of the surface elevation (water, ice or land) can be obtained (Gardini et al., 1995). Figure 1 illustrates this principle and shows the Saral satellite.

The Envisat¹ and Saral² satellites both use (or used for Envisat that was decommissioned in 2012) radar altimeters in low resolution mode (LRM) that performs as a conventional pulse limited altimeter. The pulses are transmitted continuously and the reflected echoes are processed and summed up to reduce the noises caused by multiple responses (Fenoglio-Marc et al., 2015). Satellite altimetry produces point measurements along a ground track and the data are limited to the satellite path coverage. Envisat and Saral used the same nominal orbit and the same return frequency of 35 days. The spacing between measurements within the satellite track is approximately 400 m and 165 m for Envisat and Saral respectively and the distance between neighbouring tracks is about 80 km at the equator (Roca et al., 2009).

Since the variation in range from the satellite to the surface is much larger than is captured by the echo recording system, it is necessary to track the return echo (Roca et al., 2009). The sensor has to estimate the time needed for the impulse to go forth and back in order to predict the "range window". This is the role of the "tracker", an on-board program that computes the "opening" and "closing" time of the 128 recording gates (Roca et al., 2009). The raw data is recorded in a signal waveform (WF) that covers a time lag representing a distance of about 40 m for SARAL and 60 m for ENVISAT.

To compute altitude, atmospheric and geophysical corrections are performed in the ground processing chain. A continuous function is fitted over the bins of the WF and a point is chosen to represent the most likely altitude at nadir based on the WF shape. This process is called retracking. Three retracker algorithms are commonly used with SARAL/Altika and ENVISAT/RA-2 data: (Ice1, Ice2 and Ocean) (Rosmorduc et al., 2006; Baker et al., 2002).

3. METHOD

3.1 Study Area

Located at the geographical center of South America with an area of 150 000 km² the Pantanal, is the largest tropical wetland in the world. The larger part is situated in Brazil ($\approx 80\%$) with the rest in Bolivia ($\approx 20\%$) and Paraguay ($< 1\%$). Its economy is mostly based on livestock farming but also on a booming tourist industry (Junk and de Cunha, 2005). The Paraguay River is the main water course bringing water in and out of the Pantanal. Although annual precipitations are less than the potential evaporation (Tucci et al., 1999) the hydrological and topographical characteristics of the Pantanal with flat terrain receiving water from the Planalto region create annual flooding with an area between 10 000 km² and 100 000 km² (Paz et al., 2014). The inaccessibility and low population of the region make it very difficult to monitor with *in situ* water level stations which explains their scarcity throughout the Pantanal. This flood pulse is the most distinctive characteristic

¹Envisat was an European Space Agency (ESA) satellite with numerous instruments, one of which was the RA-2 radar altimeter.

²Saral is a cooperative altimetry technology mission of Indian Space Research Organisation (ISRO) and France's Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) launched in 2013; Altika is the radar altimetry instrument.

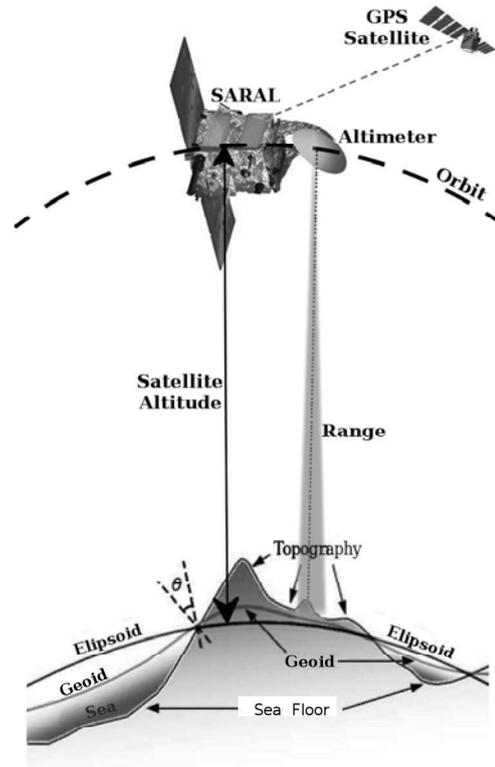


Figure 1: Illustration of the principle of satellite altimetry with Saral.

of the Pantanal making it a challenge for hydrological modelling (Paz et al., 2014).

For this pilot study, we chose two lakes in the Northwestern portion of the Pantanal, a region known as the *Serra do Amolar* (Figure 2). This region does not suffer the flood pulse as much as the Southern part and remains flooded throughout the year. The two lakes are at both Southern and Northern ends of the *Amolar* region: lakes *Gaiba* (South) and *Baía Grande* (North). The two lakes have areas of ≈ 93 km² and ≈ 25 km² respectively which are considered small for satellite altimetry in LRM.

3.2 Water Surface Area Calculation

The imagery data used in this study was acquired from the United States Geological Survey (USGS) on-line platform (*Earth Explorer*) and ESA's Sentinel Data Hub. Images from the Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, Landsat-8 OLI and Sentinel-1 (radar) missions were selected considering the best possible match with the dates of passage of the Saral and Envisat satellites and the quality of the images taking into account the cloud coverage over both lakes. We selected 11 images: 5 for the Envisat data between May and September 2009 and 6 for the Saral data between March and November 2015.

Thresholding and classification approaches were tested for both types of image. The classification was performed solely on the infrared bands of the Landsat images using a probability threshold to separate water from land. For the radar images, both the VV and VH bands were used. For the thresholding of the optical images only the shortwave infrared band was used ($\lambda \approx 1.55 - 1.75 \mu\text{m}$ for Landsat-5 and -7 and $\lambda \approx 1.57 - 1.65 \mu\text{m}$ for Landsat-8) and only the VV band of Sentinel-1 images. Because water is an almost specular reflector in side-looking radar, a threshold is easily found to separate it from dry land. The lakes

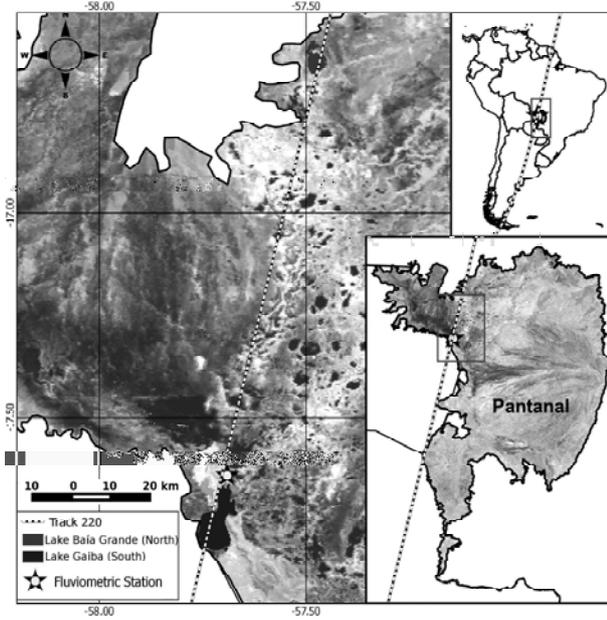


Figure 2: General views of the study area showing the two lakes investigated. A MODIS image in the backdrop shows the extent of the water surface covering the region (dark tones).

were then separated from the connecting rivers and streams using a standardized buffer. The estimated areas could not be validated at this time. A future field campaign will enable us to validate our approach.

3.3 Water Level Determinations

The water level data for both lakes was computed from two altimetry satellites: Envisat (2002-2010) and Saral (2013-2015) which both use the same nominal orbit. Although we only calculated the water surface areas for 11 different dates, we still produced water level time series for the whole period covered by the satellites.

The radar satellite altimetry data was processed with a special application tool called SWG (Satellite Water Gauging) (Maillard et al., 2015) using the Python 2.7 environment. SWG can be used for extracting altimetry data for lakes or rivers, depending on the user's needs.

Satellite altimetry data needs a series of corrections and pre-processing procedures. The surface altitude is a result of the subtraction from satellite's altitude α_s of the range ρ , and correcting it considering the atmospheric phenomena that delay propagation: the variations of the ionosphere (*iono*), pressure (dry troposphere: *dry*) and humidity (wet troposphere: *wet*), and the solid earth (*set*) and polar (*pt*) tides that generate crustal vertical motions. Another correction makes the resulting altitude relative to the geoid datum (*GC*) instead of the rotation ellipsoid (Equation 1).

$$H_w = \alpha_s - (\rho + \textit{iono} + \textit{dry} + \textit{wet} + \textit{pt} + \textit{set}) + GC \quad (1)$$

The range is normally extracted from one of the available retrackerers: ocean, ice1, ice2, ice3 and sea ice. But since only the first three are available for both satellite, we only used these. There are no retracker available for land, rivers or lakes and most authors use one of the ice retrackerers (Zhang et al., 2010; Da Silva

et al., 2012; Zheng et al., 2016). As we observed frequent problems with the available retrackerers, we build one specifically for lakes of calm water (very large lakes tend to have waves similar to oceans).

3.4 Lake specific retracker (Lake1)

A retracker is an algorithm whose function is to find the most "likely" nadir point within the waveform. Knowing that the coordinates of the data point is over water, this point should indicate the range between the satellite and the water. If land falls within the satellite footprint and if this land is at a higher elevation than the water surface, the distance to the satellite might be shorter even though it is off-nadir. Conversely, if for some reason a water surface also situated off-nadir sends a stronger return signal than the water at nadir, the retracker can register this return as the "good" signal and compute a range that is longer than the water surface at nadir, a situation common in LRM satellite altimetry known as "hooking" (Da Silva et al., 2012). This can occur for instance in a lake or river with the presence of small waves. We noticed that the waveform over lakes was often characterized by a single peak, especially near the shore where the water is more protected from the wind and produce little waves. We then created a retracker algorithm to take advantage of the peculiar situation. The "Lake1" retracker computes the following steps:

1. Compute the second derivative of the waveform by applying a Laplace operator.
2. Retain all peaks with 10% or more of the maximum amplitude.
3. Count the remaining peaks.
4. If there are no more than 3 peaks, use the first to calculate the range.
5. If the algorithm fails, use the "Ice1" retracker.

The last step was included because we noticed that in situation of complex waveforms, the "Ice1" retracker tended to produce better results than the others (see Results section).

Figure 3 shows examples of waveforms over Lake Gaíba along with a tentative interpretation of the phenomenon causing their shape.

3.5 Comparison of Retrackerers and Validation

Although we had strong indications from otehr previous studies that the "Ice1" retracker would yield better results than the other retrackerers available, we still tested the three retrackerers available from both Envisat and Saral data and the one we created: "Ice1", "Ice2", "Ocean" and "Lake1". Because the region is isolated and mostly uninhabited, very few *in situ* water level stations are available. In fact we could only use one single station situated near ($< 5 \text{ km}$) the Gaíba Lake from the ANA database (<http://hidroweb.ana.gov.br>). We then validated our results using RMSE between the satellite water level and the adjusted ANA data (the levels in the ANA database are only relative without absolute elevation).

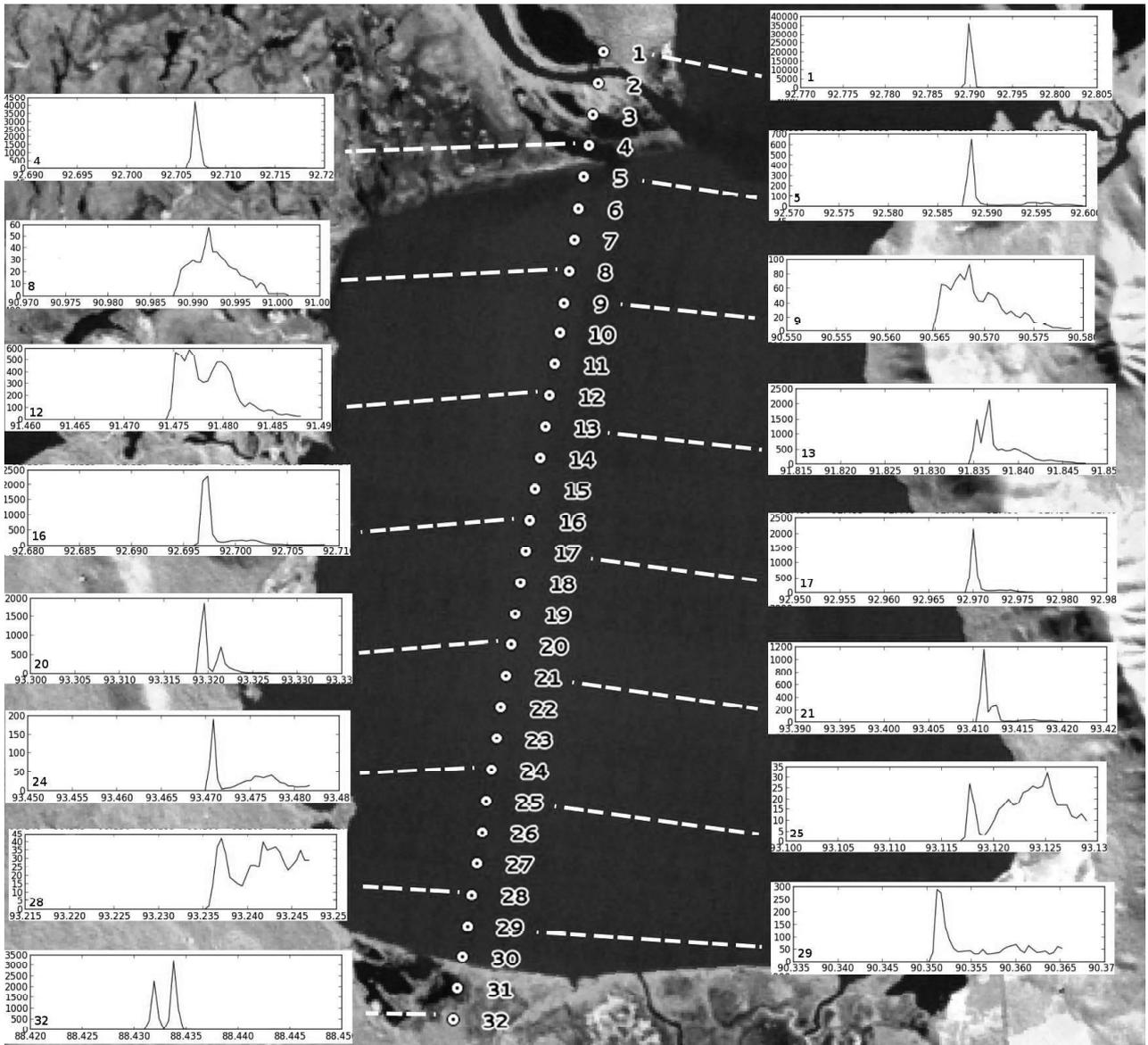


Figure 3: Illustration and interpretation of waveform response across Lake Gaiba. Waveforms 1, and 4 have both a very strong single peak return that might be produced by a roughly textured yet flat surface (vegetation) and the fact that water is present but off-nadir might cause that part of the impulse to be reflected specularly away from the sensor. Waveforms 5, 16, and 17 have a typical calm water response with a single peak of much less energy than the previous two and apparently receive very little influence from other surfaces. Waveforms 13, 20, 21 and 24 have a secondary peak (or peaks) that may come from the nearby land ($\approx 2km$) or even small waves that backscatter towards the antenna. Waveforms 8, 9, 12, 25, 28 and 29 are complex waveforms that receive influence from the land, waves or both; these waveforms may receive land contamination from more than one direction contributing to their complex shape. Waveform 32 has land at its nadir but clearly receives influence from off-nadir surfaces explaining why its peaks corresponds to altitudes below the lake surface. Note the small range near the Eastern shore of the lake.

3.6 Volume Fluctuation Computation

The combination of the SWG levels and surface area was used to estimate the volume variation in the two lakes between the selected dates. The change in volume (ΔV) between two dates t_1 and t_2 was calculated using equation 2, where $\Delta level = level_{t_2} - level_{t_1}$.

$$\Delta V = \Delta level_{t_2-t_1} \times (Area_{t_1} + Area_{t_2}/2) \quad (2)$$

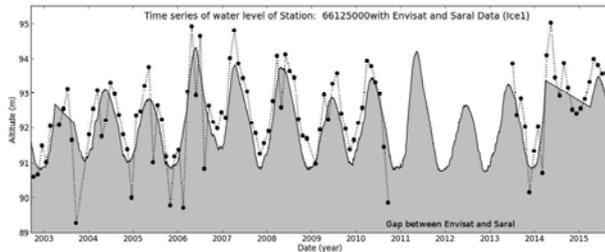
4. RESULTS

4.1 Water level time series

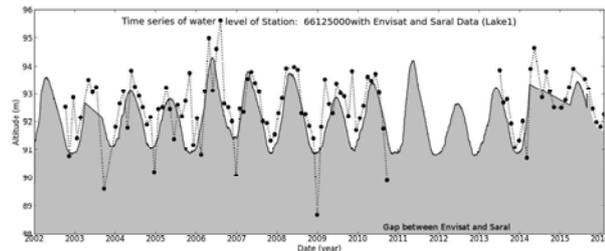
Because we had only one *in situ* water level station near Lake Gaiba, our first step was to use it to calculate RMSE for the four retracers and for both Envisat and Saral data (Table 1). Although we had the impression our Lake1 retracker could bring improvement we discovered that on the average, Ice1 is still better, probably because it is less sensitive to peaks that might be caused by trees, boats and nearby land (the satellite track on some dates is relatively close to the Eastern shore where there are tall trees and even a small range 400 m above the lake; see Figure 3). Figure 4 shows the water level time series produced from the Ice1 and Lake1 retracker after combining Envisat and Saral data compared with the nearby *in situ* station. Note that both are quite similar but that some outliers of Lake1 are further away.

| Envisat RMSE (m) | | | | Saral RMSE (m) | | | |
|------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|--------|-------|
| Ice1 | Ice2 | Ocean | Lake1 | Ice1 | Ice2 | Ocean | Lake1 |
| 0.774 | 1.996 | 3.574 | 1.182 | 0.769 | 2.412 | failed | 1.352 |

Table 1: Root mean square errors between *in situ* data and satellite altimetry for the four retracker of both Envisat and Saral.



(a) Ice1



(b) Lake1

Figure 4: Time series combining Envisat and Saral data for the Ice1 (top) and Lake1 (bottom) retracker.

To assess the difference between the Ice1 and Lake1 retracker we plotted sequences of altimetry points from track 220 that cross both Lake Gaiba (Figure 5) and Lake Baia Grande (Figure 6). We made sure that all points fell directly over both lakes. From these we could observe the following:

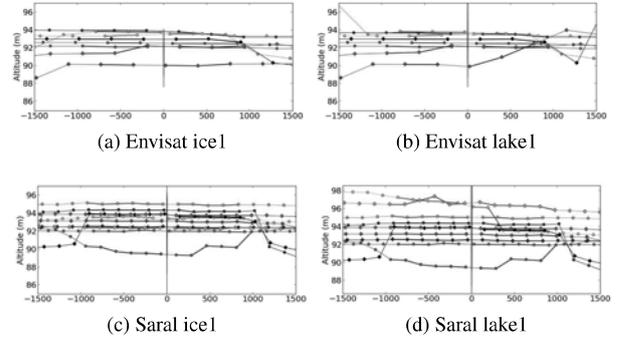


Figure 5: Water level sequence of satellite altimetry points crossing Lake Gaiba (track 220) showing the behaviour of the Ice1 and Lake1 retracker for both Envisat and Saral.

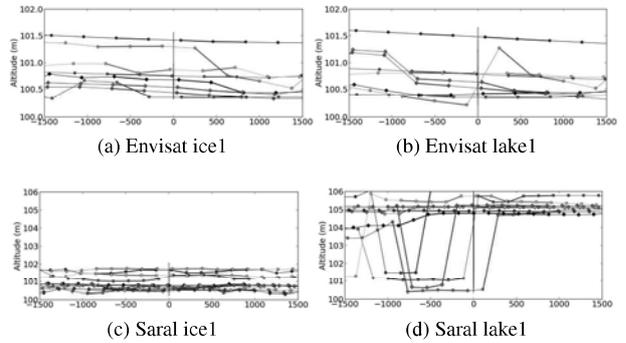


Figure 6: Water level sequence of satellite altimetry points crossing Lake Baia Grande (track 220) showing the behaviour of the Ice1 and Lake1 retracker for both Envisat and Saral.

- The points appear more consistent over Lake Gaiba than over Lake Baia Grande, probably because the former is larger.
- Lake1 is systematically less constant than Ice1.
- Although all points fall directly within the lakes (and more than 1 km from the shores), all graphs show variations of sometimes more than 1 m within the same sequence.
- High water are generally more stable than low water, possibly because of the resurgence of small island during low water periods.

4.2 Water Surface Area Determination

Four different types of images were used to determine the water surface area: Landsat-5, -7, -8 and Sentinel-1. Both thresholding and classification techniques were tested. It was found however that classification was more consistent as a “blind” approach. It also produced results more consistent with the water levels obtained from both the satellite altimeters and the single *in situ* gauging station. Although we could not validate these results the simple fact that higher water levels were associated with larger areas was in itself a partial validation of the approach. Figure 7 shows examples of the difference in area for the two lakes.

From another perspective, because these lakes are small considering a 10-30 m pixel ground resolution, the proportion between the number of contour and inside pixels can be rather large and represents a significant source of error that should be taken into accounts when working with images of different resolution. In this

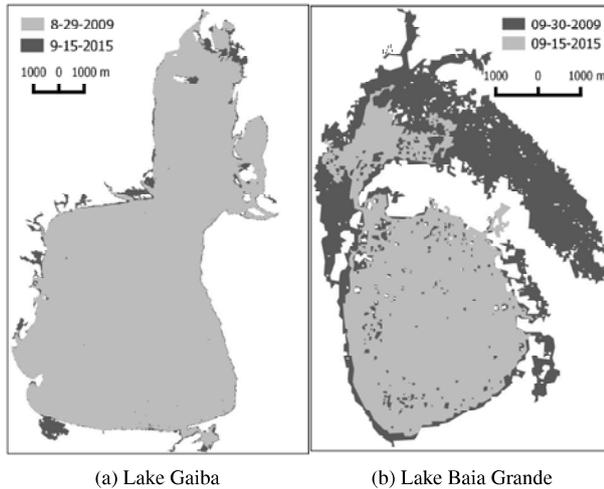


Figure 7: Comparison of some of the water surface areas calculated for Lake Gaiba (a) and Lake Baia Grande (b). Note that Lake Baia Grande is located in a very flat area that even the smallest increase in water level involves a large difference in area while Lake Gaiba is much less affected by water level changes.

study we have calculated that for the larger lake (Lake Gaiba) the ratio between perimeter and area is ≈ 0.0015 while the smaller one (Lake Baia Grande) has a ratio of ≈ 0.006 . Considering a ground resolution of 10 m (Sentinel-1) these ratios become 0.014 and 0.057 respectively while for the 10 m resolution (Landsat) these values are 0.004 and 0.017 respectively. This means that, all other considerations apart, the error measurement can be three times larger with Landsat compared with Sentinel-1 data.

4.3 Water Volume Fluctuation

Because the project is still in its infancy, we restricted our volume fluctuation study to two separate years for the two lakes: 2009 with Envisat and 2015 with Saral. Table 2 shows the height and area values for 11 dates and for the two lakes as well as the volumes change when all the necessary data was available. In some cases we were not able to identify image data available to correspond with the altimetry data from either Envisat or Saral. Also, Saral drifted off-track (by over 10 km) during the months of June and July 2015 and could not register altitude data for either lakes. It is also clear from the data that the relation between area and height is far from linear and an elevation of the water level by only a few centimetres can represent a very large increase in area.

A few inconsistencies can also be observed from Table 2 where an increase in area was not accompanied by a higher water level. Three such cases can be observed (in bold italic in Table 2) and can be attributed to inaccuracies in either measurement or in the time lag between the altimetry measurement and the image acquisition. We think that this could be the case for the last set of measurement from Envisat (30 September 2009) with a delay of six days between data acquisitions.

5. DISCUSSION

It is clear that the method we proposed and the results we achieved could not be taken as substitute to *in situ* gauging stations because both the temporal frequency and the accuracy are insufficient. Having very little validation data, it is also difficult to identify

the errors which probably come from both sources of data but in an unknown proportion. In addition to these shortcomings, the drifting of the altimetry satellite can invalidate the measurements especially for small lakes. Clouds were also a problem for the optical image data and a short time lag between the altimetry data and the image acquisition date was not always possible.

However we should take notice that all these problems will be greatly reduced in the near future. First because the number of altimetry satellites is rapidly increasing and for instance the launch of Sentinel-3A in March 2016 with a SAR altimeter promises a significant increase in accuracy with a much reduced footprint. Sentinel-3A will be followed by Sentinel-3B in 2017 which will increase coverage. Other missions are also on the drawing board such as Jason-CS and SWOT (2020).

Radar images from Sentinel-1A are already available but the launch of Sentinel-1B in April 2016 will reduce the return time by a factor of two and make it possible to obtain an image anywhere on the Earth every six days. A validation of the accuracy of separating water from land in these images is needed in order to determine the best approach to this segmentation especially with the peculiar characteristics of these small lakes in the Pantanal that can have a large portion of their surface covered with macrophytes.

The fact that most *in situ* gauging stations have not been levelled accurately is also a limiting factor to determine the accuracy of satellite water level measurements for small lakes. The Brazilian water agency (ANA) is currently levelling its gauging station but it will probably be a few years until all stations are levelled.

All these factors will bring improvements but the use of LRM altimeter for hydrology is still relatively new and much research is needed especially in developing adaptive retracers that can deal with complex situations such as this small lakes context. The “Lake1” retracker we developed in this research worked relatively well in very specific situations but did not, on average, bring improvement to the “Ice1” retracker which is by far still the most used for hydrological studies.

All the sources of error mentioned above show the volume fluctuations we have measured have very limited accuracy but it is still the only source of such data possibly available at this moment.

6. CONCLUSIONS

We described in this article a method to measure the surface water area and the water level altitude from satellite data for two small lakes in Brazil’s Pantanal in order to estimate volume fluctuations over time. The surface areas were measured from satellite image data of both optical (Landsat) and radar (Sentinel-1) type using pixel-based classification and a probability threshold. The water level was obtained from processing satellite altimetry data from Envisat and Saral. We also implemented a new “retracer” that we baptised “Lake1” to deal with the peculiar situation of calm water waveforms. Although the retracker behaved relatively well with parts of the lake waters, on average the supplied retracker “Ice1” produced better results. A number of problems were identified including:

- Images of the same date as the altimetry measurements were not always available.
- Altimetry measurements for small lakes can show large variations because of signal “contamination”.

| Landsat | Image date | Satellite | Cycle | Cycle date | Gaiba Lake | | | Baia Grande | | |
|---------|------------|-----------|-------|------------|------------|--------------|---------------------------------------|-------------|---------------|---------------------------------------|
| | | | | | Area (ha) | Height (m) | Δ Volume ($\times 10^6 m^3$) | Area (ha) | Height (m) | Δ Volume ($\times 10^6 m^3$) |
| L-7 | 17 May/09 | Envisat | 79 | 19/May/09 | * | 90.20 | n/a | 2 939 | 101.23 | - |
| L-7 | 18 Jun/09 | Envisat | 80 | 18/Jun/09 | 9 300 | 93.11 | - | 3 282 | 100.84 | -13.604 |
| L-5 | 28 Jul/09 | Envisat | 81 | 28/Jul/09 | 9 433 | 93.48 | 34.691 | 3 262 | 100.62 | -7.304 |
| L-5 | 29 Aug/09 | Envisat | 82 | 1/Set/09 | 9 358 | 92.44 | -97.037 | 3 007 | 100.45 | -5.389 |
| L-5 | 30 Sep/09 | Envisat | 83 | 6/Out/09 | 9 431 | 91.84 | -55.938 | 3 449 | 100.34 | -3.677 |
| L-8 | 23 Mar/15 | Saral | 22 | 26/Mar/15 | 9 169 | 93.32 | - | 2 037 | 100.65 | - |
| S-1 | 30 Apr/15 | Saral | 23 | 30/Apr/15 | 9 593 | 93.91 | 56.304 | 2 726 | 100.85 | 4.957 |
| L-7 | 15 Jun/15 | Saral | 24 | 04/Jun/15 | 9 499 | ** | n/a | 2 450 | ** | n/a |
| S-1 | 11 Jul/15 | Saral | 25 | 09/Jul/15 | 10 011 | ** | n/a | 2 618 | ** | n/a |
| L-8 | 15 Sep/15 | Saral | 27 | 17/Set/15 | 9 575 | 93.10 | -78.391 | 2 272 | 100.54 | -7.046 |
| S-1 | 27 Nov/15 | Saral | 29 | 26/Nov/15 | * | 91.65 | n/a | 2 382 | 100.59 | 1.249 |

Legend: * no image data available; ** Saral satellite was off-track

Table 2: Values of lake areas, water levels and volume fluctuations for Lake Gaiba and Lake Baia Grande.

- Satellite track drift can invalidate results.
- Water surface area determination from multi-type images (optical and radar) of different resolution can produce significant differences for small lakes where the proportion between contour and inside pixel is large.

Even with all these shortcomings, we were still able to produce results that show that the potential is there and will grow rapidly when we consider the forthcoming satellite altimetry missions in the near future. The Sentinel programs (especially the first three) of ESA's Copernicus Program (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus) will greatly contribute to improving these results by a significant increase in temporal frequency and resolution.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was conducted at the Department of Geography of *Universidade Federal de Minas Gerais* as part of the Master's research of Paulo Henrique Costa under the supervision of Philippe Maillard. The authors are grateful to Brazil's CAPES for their financial support.

References

- Baker, S., Bombaci, O., Zeli, C., Venditti, P., Zanife, O., Soussi, B., Dumont, J., Stum, J., Milagro-Perez, M. and Benveniste, J., 2002. ENVISAT RA2 / MWR Product Handbook. http://www.cpg.mssl.ucl.ac.uk/RA2_Handbook/concepts/ra2/ra2-mwr-PH.html.
- Berry, P., Garlick, J., Freeman, J. and Mathers, E., 2005. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. *Geophysical Research Letters* 32(16), pp. L16401 1–4.
- Chelton, D., Ries, J., Haines, B., Fu, L. and Callahan, P., 2001. *Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*. Academic Press, San Diego, USA, chapter Satellite Altimetry, pp. 1–131.
- Crétaux, J.-F., Jelinski, W., Calmant, S., Kouraev, A., Vuglinski, V., Bergé-Nguyen, M., Gennero, M.-C., Nino, F., Abarca Del Rio, R., Cazenave, A. et al., 2011. Sols: A lake database to monitor in the near real time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research* 47(9), pp. 1497–1507.
- Da Silva, J. S., Seyler, F., Calmant, S., Rotunno Filho, O. C., Roux, E., Araújo, A. A. M. and Guyot, J. L., 2012. Water level dynamics of amazon wetlands at the watershed scale by satellite altimetry. *International Journal of Remote Sensing* 33(11), pp. 3323–3353.
- Fenoglio-Marc, L., Dinardo, S., Scharroo, R., Roland, A., Sikiric, M. D., Lucas, B., Becker, M., Benveniste, J. and Weiss, R., 2015. The german bight: A validation of cryosat-2 altimeter data in sar mode. *Advances in Space Research* 55(11), pp. 2641–2656.
- Gardini, B., Graf, G. and Ratier, G., 1995. The instruments on envisat. *Acta Astronautica* 37, pp. 301–311.
- Jain, S. K., Singh, R. D., Jain, M. K. and Lohani, A. K., 2005. Delineation of flood-prone areas using remote sensing technique. *Water Resources Management* 19(4), pp. 337–347.
- Junk, W. J. and de Cunha, C. N., 2005. Pantanal: a large south american wetland at a crossroads. *Ecological Engineering* 24(4), pp. 391–401.
- Maillard, P., Bercher, N. and Calmant, S., 2015. New processing approaches on the retrieval of water levels in envisat and saral radar altimetry over rivers: A case study of the são francisco river, brazil. *Remote Sensing of Environment* 156, pp. 226–241.
- Maillard, P., Pivari, M. and Pires-Luiz, C., 2012. *Remote Sensing of Planet Earth*. InTech - Open Access Publisher, Rijeka, Croatia, chapter Remote sensing for mapping and monitoring wetlands and small lakes in Southeast Brazil, pp. 21–44.
- Paz, A. R., Collischonn, W., Bravo, J. M., Bates, P. D. and Baugh, C., 2014. The influence of vertical water balance on modelling pantanal (brazil) spatio-temporal inundation dynamics. *Hydrological Processes* 28(10), pp. 3539–3553.
- Roca, M., Laxon, S. and Zelli, C., 2009. The envisat ra-2 instrument design and tracking performance. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 47(10), pp. 3489–3506.
- Rosmorduc, V., Benveniste, J., Lauret, O., Milagro, M. and Picot, N., 2006. Radar Altimetry Tutorial. <http://www.altimetry.info>.
- Siddique-E-Akbor, A., Hossain, F., Lee, H. and Shum, C., 2011. Inter-comparison study of water level estimates derived from hydrodynamic-hydrologic model and satellite altimetry for a complex deltaic environment. *Remote Sensing of Environment* 115, pp. 1522–1531.

- Sulistioadi, Y., Tseng, K.-H., Shum, C., Hidayat, H., Sumaryono, M., Suhardiman, A., Setiawan, F. and Sunarso, S., 2015. Satellite radar altimetry for monitoring small rivers and lakes in indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(1), pp. 341–359.
- Tucci, C. E., Genz, F. and Clarke, R. T., 1999. *Hydrology of the upper Paraguay basin*. United Nations University Press: Tokyo.
- Zhang, M., Lee, H., Shum, C., Alsdorf, D., Schwartz, F., Tseng, K., Yi, Y., Kuo, C., Tseng, H., Braun, A., Calmant, S., Filizola, N. and Seyler, F., 2010. Application of retracked satellite altimetry for inland hydrologic studies. *International Journal of Remote Sensing* 31(14), pp. 3913–3929.
- Zheng, J., Ke, C., Shao, Z. and Li, F., 2016. Monitoring changes in the water volume of hulun lake by integrating satellite altimetry data and landsat images between 1992 and 2010. *Journal of Applied Remote Sensing* 10(1), pp. 016029–016029.

Apêndice E

Artigo-4

The effect of land cover type on radar altimeter response and its influence on retracker algorithms

Eric Oliveira Pereira^a and Philippe Maillard^a

^aUniversidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Brazil

ABSTRACT

Satellite altimeters on-board Envisat and SARAL (Altika) are routinely used to create virtual monitoring stations from the satellite path crossing with any river of significant width. These virtual stations have the advantage of having a low operational cost and providing near real-time absolute measurement of water level. However, many shortcomings still remain open questions and the precision of measurements can vary widely depending on a number of factors such as the river width and environmental conditions surrounding the water course. In this article we have concentrated our efforts on the relation between land cover classes, the shape of waveforms produced by the backscatter response and the separability among different land cover classes and water. Seven land cover classes often encountered nearby large river banks were analyzed: agriculture, native forest, planted forest, savanna, pasture, urban and open water. Waveforms of these classes were sampled to build a waveform library. They were compared among themselves using cross-correlation, cumulative difference and Kolmogorov-Smirnov distance. Average waveforms for each class were calculated and compared. The results show that only the “open water” and “forest” classes could be characterized as having a typical behavior, probably caused by the limitations of the measurements used. Furthermore, these two classes have very similar responses and could easily be confused. The other classes generally showed chaotic behavior which can mostly be attributed to variations in their cover characteristics. We expect that a better understanding of the influence of land cover on waveform shapes will increase accuracy of water level measurements.

Keywords: SARAL/Altika, Waveforms, Radar altimeter, Cross-correlation, inland water

1. INTRODUCTION

Less than three percent of the Earth's water is fresh and most of it is frozen in ice.¹ Fresh water is used for most of human activities such as agriculture, industry, energy generation and domestic consumption.² In Brazil, the monitoring of available fresh water is mostly done through a network of fluviometric stations located on the banks of major rivers, lakes and reservoirs. The Brazilian Water Agency (*Agência Nacional de Águas* or ANA) is responsible for maintaining this network and managing a water database which is made available on the Internet.³ Although very extensive, this network still has many gaps in scarcely populated or inaccessible areas of Brazil's large territory ($\approx 8.5Mkm^2$). Furthermore, the delay between the date of the measurement and the availability of the data can spread over several weeks since only a small portion of the network uses telemetry. In this sense, satellite altimetry is a very promising way to complement conventional monitoring stations especially for remote and inaccessible (*e.g.* wetlands) areas. The fact that the data can be almost immediately available at no direct cost is yet another advantage.

Since the late 70's, a number of satellite altimetry missions were launched primarily for monitoring the oceans (*e.g.* Topex/Poseidon, Jason, GFO, ERS-1 and -2) and also for ice caps (ERS-1 and -2, Envisat, CryoSat, ICESat).⁴ In February 2002 the European Space Agency (ESA), launched the Envisat mission with the objective of providing the scientific community with a range of instruments onboard a single satellite to improve our understanding of global climatic changes.⁵ Amongst these instruments, the RA/-2 altimeter was designed to measure the topography of the oceans and continents (both land and water) as well as estimating wind speed over the oceans.⁶ In April 2012, after ten years of operation the communication with the satellite was lost and

Further author information: (Send correspondence to Eric O. Pereira)
E.O.Pereira: E-mail: ericpereiraufmg@gmail.com, Telephone: +55 (31) 86 68 75 36
P. Maillard.: E-mail: philippe@ufmg.br, Telephone: +55 (31) 33 24 76 69

Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI, edited
by Christopher M. U. Neale, Antonino Malfese, Proc. of SPIE Vol. 9239, 923905
© 2014 SPIE · CCC code: 0277-786X/14/\$18 · doi: 10.1117/12.2066889

Proc. of SPIE Vol. 9239 923905-1

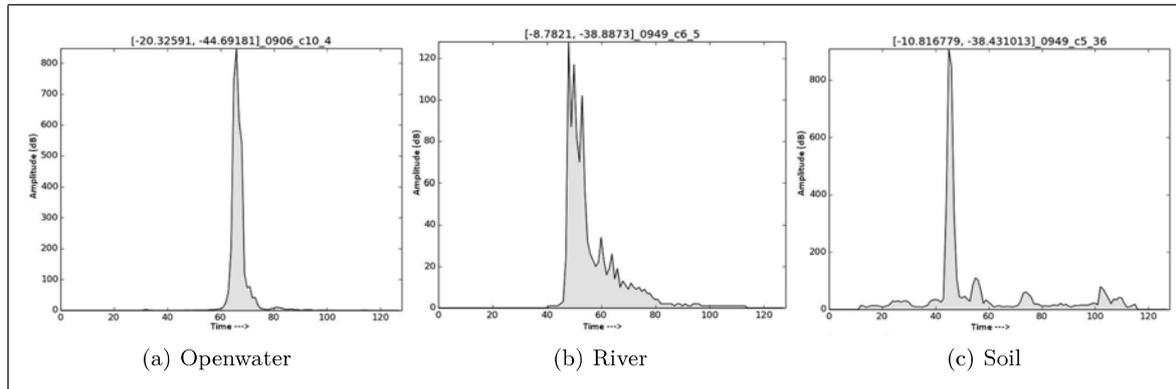


Figure 1. Waveform examples.

the mission ended.⁷ In February 2013, SARAL, an altimetry satellite equipped with the AltiKa altimeter and resulting from a collaboration of the French CNES and the Indian ISRO agencies (<http://smc.cnes.fr/SARAL/>) was launched on the exact same orbit as Envisat in an effort to offer a continuum of altimetry data covering the same footpath and return frequency as Envisat.⁸ As more missions are planned for the near future like Sentinel-3 in 2015⁷ and SWOT in 2020,⁹ satellite altimetry is likely to become a key technology for monitoring the Earth's water resources.

The principle of satellite altimetry is relatively simple. The radar antenna sends impulses (time t_0) that reach the Earth's surface at near speed of light and are reflected back towards the antenna (time t_1) which records the time needed for the trajectory back and forth.¹⁰ By dividing the time difference by two ($\frac{t_0-t_1}{2}$), and subtracting it from the satellite's altitude, a precise estimate (in the order of centimeters) of the surface elevation (water, ice or land) is obtained.⁶ It should be noted that satellite altimetry produces point measurements over the satellite path and do not offer coverage for regions with no satellite overpass. In the case of SARAL, the spacing between measurements within the satellite track is about 30 m and the distance between neighboring tracks is about 40 km at the equator. The return frequency is 35 days.

Because the radar antenna both emits and receives the impulses, it only records the returns for a short time lag. In this account, it has to estimate the time needed for the impulse to go forth and back in order to "open" its recording gate at the right time to make sure it will not miss the returning signal. This is the role of the "tracker", an on-board program that computes the "opening" and "closing" of the recording gates using two instruments, DORIS and SLR.¹¹ The data recorded consists in a signal waveform (WF) discretized in 128 bins as shown in Figure 1. If the relief of the surface changes abruptly (steep slope), the tracker can overestimate (sloping up) or underestimate (sloping down) the return time and miss the data altogether. The WF is raw data and conversion into distance and other corrections are done in the ground processing chain. The WF covers a time lag of about 133 ns representing a distance of about 40 m. To compute a more precise measurement, a continuous function is fitted over the bins and a point is chosen to represent the most likely altitude at nadir based on the shape of the WF. This is performed by an algorithm called the "retracker". Three retracker algorithms are used with SARAL/AltiKa data: (Ice1, Ice2, Ocean).¹² No retracker exists for land surfaces because the variability of land cover and their optical/electrical properties is too great for a single algorithm to handle.

A number of studies have used satellite altimetry to measure water levels in rivers and lakes. Even though most satellite altimetry missions were planned for oceanic applications, the creation of virtual (or remote) water monitoring stations using satellite altimetry has already become a reality used by many researchers.^{8, 13-16} Most of these researches used one of the existing retrackers (mostly Ice1, 2 or 3) and have had to cope with the problem of signal "contamination" by land cover surfaces, especially for rivers.^{8, 14} The problem for applications in hydrology is generated by the size of the satellite footprint that has a diameter of several kilometers and therefore acquires responses for land mixed with the water response. Some have tried to implement custom retrackers for these situations.^{17, 18} Abrupt changes in the topography of river banks can also interfere because the path from the satellite to a high river bank can be shorter than the path to the nadir and the water.⁸ Because

the water response is usually the strongest, the retracker sometimes records the signal from water off-nadir even though the satellite is over land; a phenomenon reported in a number of studies and called “hooking”.¹⁹ It has been argued that the amount of contrast between the response of land and water is one of the main problems responsible for the contamination of the signal by non-water surfaces: a low contrast will make it difficult for the retracker to distinguish between land and water and might produce unpredictable results.⁸ In that perspective we argue that using fixed retracker algorithms might not be appropriate for monitoring rivers. Conversely, the raw WFs contain the complete information acquired by the sensor and could be directly used to compute an elevation value in these situations.

WFs are related to the land cover they intercept within the footprint depending on geometrical (roughness, slope) and electrical (temperature, conductivity) properties of the surfaces. Mostly these will affect the proportion of the signal absorbed or scattered within the surface. Each main land cover (*e.g.* forest, grassland, pasture, urban, etc.) is then likely to respond in a similar way that if such land cover is known (or can be deduced from imagery for instance) the general behavior of the WF can be predicted and so could a mixture of any of the main land covers with water. For such an approach, a thorough investigation of how the various land covers affect the WFs is needed. The objective of our study is to analyze the behavior of WFs in the main land cover types encountered in Brazil, to identify and apply methods of comparison between WFs and determine the separability between the main land cover WFs and water WFs.

2. METHODOLOGY

2.1 Data

At this point, no specific area of Brazil was defined as our study area but we selected the predominant land cover classes found in Brazil as our study object. Seven classes were elected: agriculture, native forest, planted forest, savanna, pasture, urban and open water. The selection of samples for all these classes was performed visually with the help of a series of RapidEye* images and GoogleEarth (<https://www.google.com/earth/>). The SARAL altimetry data was downloaded from the CTOH site (<http://ctoh.legos.obs-mip.fr/products>). Until the beginning of this study, ten complete SARAL cycles were available in NetCDF format covering the 03/2013 - 02/2014 period. The IGDR family of products includes the waveforms at 40 Hz.¹¹ An in-house Python program was developed to extract the waveforms in a manageable format. A series of corrections are normally applied to transform the radar altimeter data in altitude but at this point, since only the waveform and the coordinates of satellite at the acquisition time were needed for this project, these corrections will not be described here.

2.2 Sample selection

Samples were selected by overlaying the actual ground tracks and each altimetry point of a number SARAL tracks and cycles over recent RapidEye and Google Earth images (between 2010 and 2012) in a Geographic Information System (GIS). All the samples were then processed using an in-house program that extracts the numerical values from the original NetCDF files. The extraction process is divided in two steps: a preliminary extraction of point sequences covering a few km and the individual point extraction that will serve as definite samples. These two steps are described in the following sections.

2.3 Preliminary extraction

In this first step, sections of a number of SARAL tracks are chosen by superimposing the nominal tracks of the satellite over images in attempt to select areas likely to contain appropriate samples of one or more land cover types. This process is initiated by defining four parameters: 1) track number, 2) approximate coordinates (based on the nominal orbital track), 3) cycle interval, and 4) a maximum distance value that will encircle the altimetry points extracted. The cycle interval was set to 4 – 10 because the first three cycle were known to be of poor quality of at least to show unpredictable results and since 10 was the last cycle acquired at the time of this research. A maximum distance of 3km was set to account for the possible side shift of about one km that the actual track can have with relation to the nominal track. The program saves the data in tabular form and generates a vector file in *shapefile* format (Esri) of the actual tracks and points for all the cycles selected.

*RapidEye is a five satellites constellation operated by Blackbridge, Canada and producing multispectral images with a five meter ground resolution (<http://blackbridge.com/>)

Once the maximum cross-correlation between the two waveforms was found, the value was saved to serve as a comparison measure and both waveforms were cropped to include only their valid section for comparisons.

Additionally, to include absolute comparison metrics, the D statistic from the Kolmogorov-Smirnov goodness of fit test (Eq. 2). The Kolmogorov-Smirnov²⁰ test computes the probability of two distributions belonging to the same population based on the distance between their cumulative distributions:

$$D = \max_{-\infty < x < \infty} |S_{N_f}(x) - S_{N_g}(x)| \quad (2)$$

Thus, the larger the D value, the more dissimilar are the two waveforms.

Finally we computed the sum of cumulative differences between the two waveforms (Eq. 3).

$$Diff = \Sigma | \vec{f} - \vec{g} | \quad (3)$$

The waveforms were compared in two different manners: 1) between pairs of the same cover type (within class) and 2) between pairs of different land cover classes (between class). The three measures of similarity then served as a mean to characterize the different land cover classes and to assess their similarity between themselves and mostly from water. A special attention has been given to the separability between each of the land cover class and water.

2.6 Generation of mean waveforms

Having found the point at which any waveform pair reaches maximum cross-correlation, these waveforms could arguably be combined and averaged in the same manner in which simple waves can be combined together to create a complex wave. Comparing a large number of waveforms is a rather arduous task for which no simple solution exists. In an effort to try to determine if land cover classes can be said to possess a characteristic behavior, we have combined all samples of each class together to create a mean waveform to stand as a plausible “signature” waveform. Figure 3 illustrates such process for two classes: “open water” and “urban”. In this case, for illustration purposes, only three waveforms have been combined.

3. RESULTS

Results are presented in three different sections corresponding to the type of analysis we have conducted. In the first section, samples from all land covers and water were compared in pairs, both between different classes and within the same class. The second section brings a comparative analysis of the average waveforms described in Section 2.6 of the methodology. The third section shows a preliminary analysis of the waveform behavior as it passes from one land cover type to water.

3.1 Waveform comparison by pairs

Figure 4 shows a waveform example of each land cover type along with its spatial context in the accompanying image from the Google Earth data base. In the first six samples (agriculture, pasture, savanna, forest, planted forest and open water) a clear stronger peak is noticeable but with a varying amplitude ranging from 140 to about 600. Conversely, in the case of the “urban” sample, the behavior appears much more erratic with a succession of peaks of increasing amplitude. This behavior was not observed in all urban samples but was still characteristic. It stands out that the response from the “savanna”, “forest” and “open water” are very similar with a single strong peak and might be difficult to distinguish. The three clear peaks of the “planted forest” class might be caused by variations of growing stages in the surrounding stands as seen on the corresponding image. These “off-nadir” responses might have caused the three peaks but since we did not have an image of the exact same date it cannot be asserted (the dynamics of these plantation can be very rapid).

All waveform samples were compared by pairs and three measurements resulted of these comparisons: 1) average cross-correlation, 2) average difference and 3) average K-S distance. These values are presented in Table 1. While the cross-correlation was meant as a measure of similarity, the cumulative difference an K-S

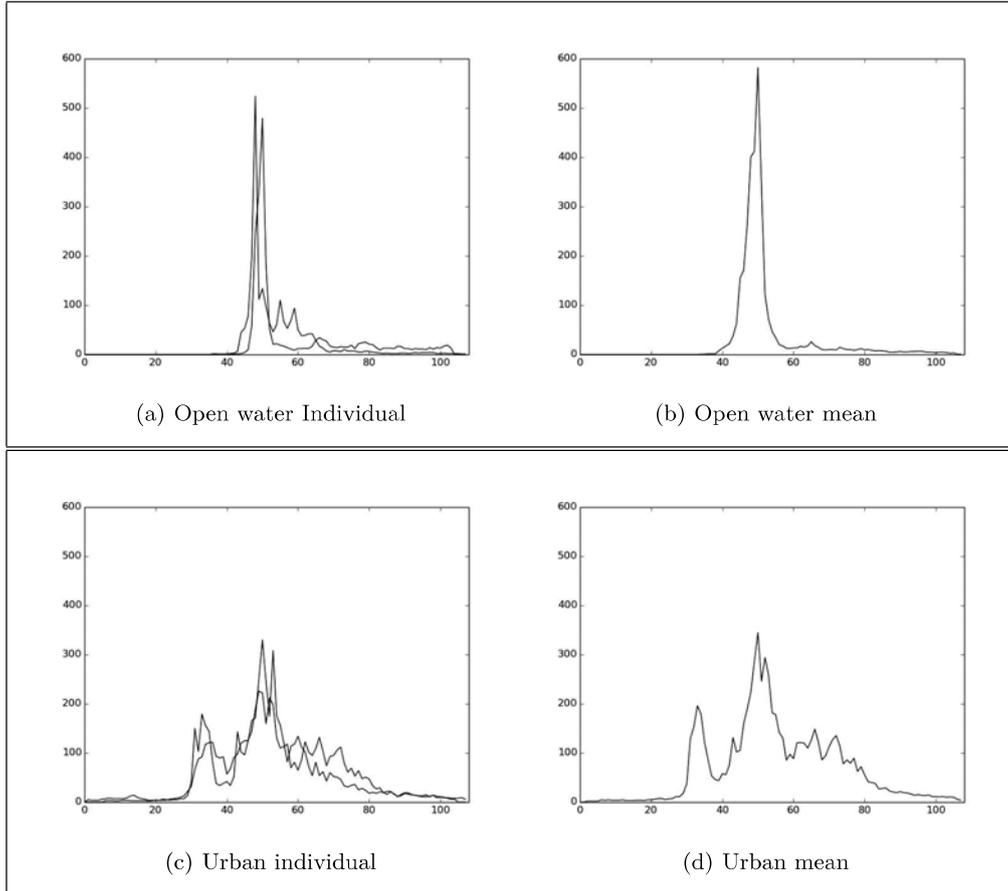


Figure 3. Individual and mean waveforms: open water and urban.

distance are indicative of dissimilarity. It should be noted that the three measurements were taken at the peak cross-correlation between each waveform pair to account for shifts between them.

Few values stand out in the cross-correlation matrix. In particular it can be seen that only the “forest” and “open water ” classes have strong cross-correlation values (0.509 and 0.668 respectively) showing that only these two classes can be said to have characteristic responses. It also stands out that “pasture” and “planted forest” have very low cross-correlation values (0.276 and 0.227) indicating a lack of characteristic waveform. The “planted forest” class is also often characterized by a high dynamic of change with time. These plantations are typically logged every seven years with growth of over three meters a year. This makes it very difficult to find comparable samples. Conversely, the “pasture” class represents a broad land cover type that can have very different appearances depending on its management. The analysis of the values off the diagonal also reveals some interesting facts. In particular, the classes that had the strongest characteristic behavior (“forest” and “open water ”) are also the ones with the highest cross-correlations between them (0.549). To a lesser degree, this also true of the “savanna” class with correlations of 0.402 and 0.445 with “forest” and “open water ” respectively.

The cumulative difference and K-S distance matrices show values meant to separate the land cover classes between themselves. Although they both show similar relations, they have different aims. Because the cumulative difference is simply a sum of all differences it tends to show better if the samples of the same class have or not a specific waveform shape and amplitude. For instance the values observed for “planted forest” clearly support the assessment of a highly changing class. In this matrix, the “open water” class appears to be more difficult to separate from the “forest” than in the correlation analysis. The K-S distance gives an indication of how far

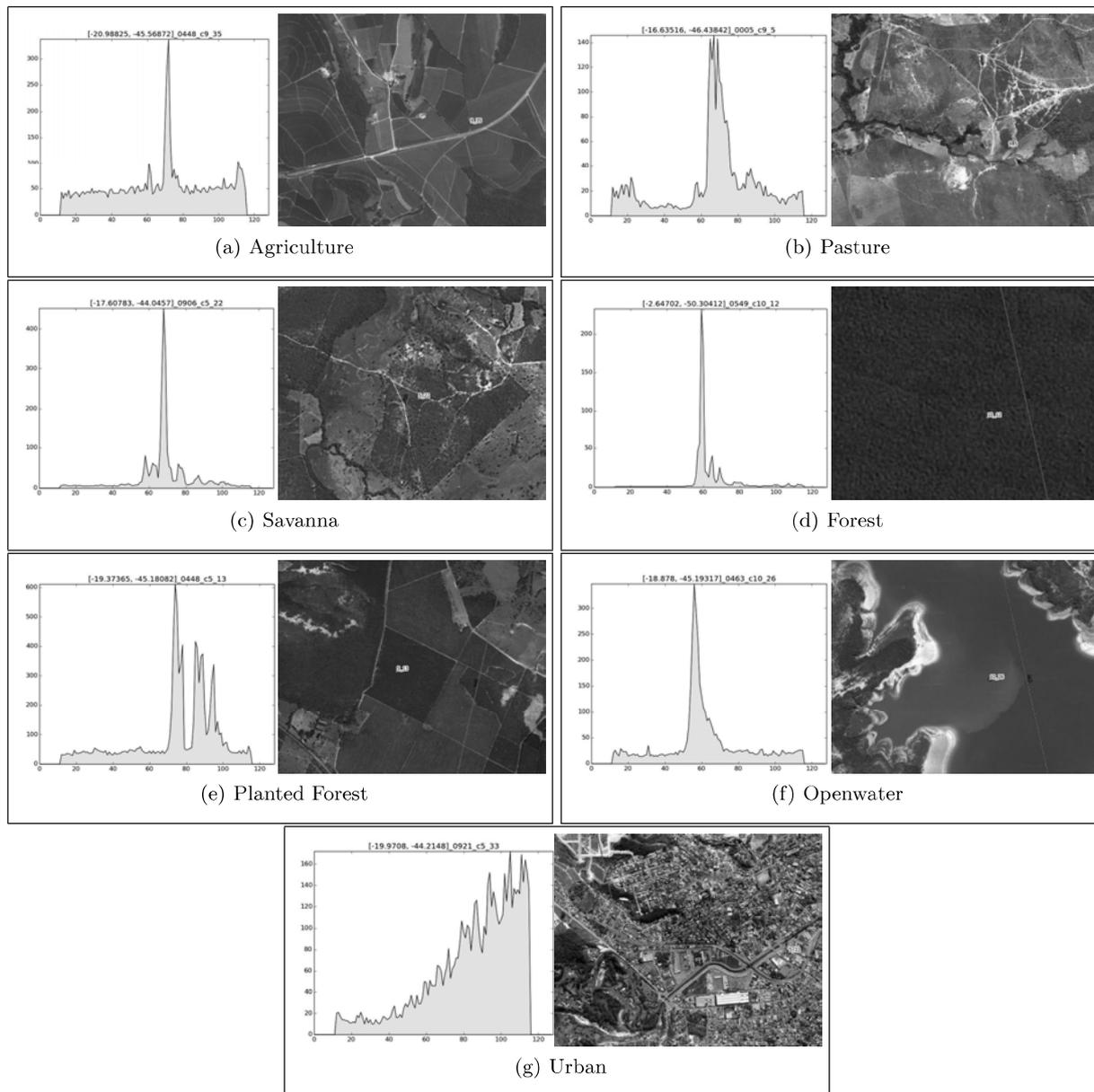


Figure 4. Example waveforms of the seven cover types analyzed.

Table 1. Average cross-correlation, cumulative difference and Kolmogorov-Smirnov distance (K-S) of all samples pairs.

| Cross-correlation | Agriculture | Forest | Pasture | Planted forest | Savanna | Urban | Open water |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Agriculture | 0.334 | | | | | | |
| Forest | 0.301 | 0.509 | | | | | |
| Pasture | 0.293 | 0.326 | 0.276 | | | | |
| Planted forest | 0.248 | 0.254 | 0.249 | 0.227 | | | |
| Savanna | 0.340 | 0.402 | 0.317 | 0.244 | 0.387 | | |
| Urban | 0.295 | 0.319 | 0.305 | 0.243 | 0.312 | 0.358 | |
| Open Water | 0.329 | 0.549 | 0.364 | 0.237 | 0.445 | 0.381 | 0.668 |
| Cumulative Difference | Agriculture | Forest | Pasture | Planted forest | Savanna | Urban | Open water |
| Agriculture | 4910 | | | | | | |
| Forest | 4699 | 3603 | | | | | |
| Pasture | 4990 | 4530 | 4986 | | | | |
| Planted forest | 7963 | 8396 | 8157 | 10320 | | | |
| Savanna | 4630 | 4109 | 4671 | 7988 | 4306 | | |
| Urban | 5231 | 5143 | 5245 | 8003 | 4991 | 5063 | |
| Open Water | 5244 | 4071 | 5039 | 8718 | 4635 | 5459 | 4112 |
| Kolmogorov-Smirnov (K-S) | Agriculture | Forest | Pasture | Planted forest | Savanna | Urban | Open water |
| Agriculture | 3461 | | | | | | |
| Forest | 3281 | 2420 | | | | | |
| Pasture | 3564 | 3145 | 3605 | | | | |
| Planted forest | 5924 | 6847 | 6171 | 6898 | | | |
| Savanna | 3268 | 2830 | 3330 | 6263 | 3071 | | |
| Urban | 3428 | 3551 | 3622 | 5663 | 3366 | 3139 | |
| Open Water | 3639 | 2763 | 3426 | 6893 | 3174 | 3812 | 3088 |

the cumulative functions (waveforms in our case) are distant from one another. In this case, mainly because most of the land cover classes do not have characteristic waveform, the K-S distance did not add any significant contribution to the previous analyses but generally confirms what was suggested by the correlation and cumulative difference.

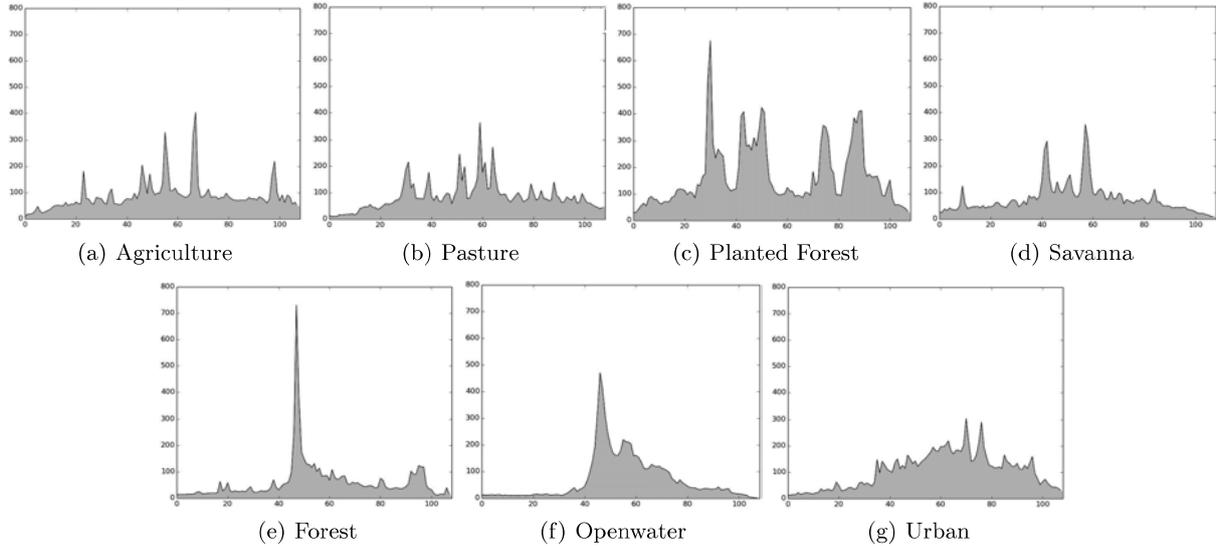


Figure 5. Mean waveform of the seven land cover classes.

3.2 Mean waveforms

Visual analysis of the mean waveforms (Figure 5) quickly reveals that the strong characteristics that appeared to be present while visualizing single waveform sample seems to somewhat fade out in their mean counterparts. The “forest” and “open water” classes are the cases that seem to have kept most of their characteristic shape. The other five classes appear to have lost most of their singular shape. Arguably, the three classes of relatively low and open vegetation (agriculture, pasture and savanna) appear to be very similar both in shape and amplitude. These three classes of “low and open” vegetation (although savanna trees can reach five meters) also have in common a broad range of states that can hinder any tentative of finding a “signature” waveform.

Table 2, shows the cross correlation values between the mean waveforms and give a good indication of the variation between classes. As expected, the cross correlation between water, forest and savanna is rather high (> 0.7). But this time, even the correlation between the “urban” class and water is relatively high (≈ 0.64). The explanation can be found in Figure 5 where even if the strong peak present in “open water” is absent in the “urban” class, the rest of the bins have a relative similarity of amplitude range. The fact that the waveforms were compared as a whole regardless of their singular shape is perhaps why these values of cross correlation are poorly indicative of their differences. This is somewhat observable in the cumulative and K-S distance matrix where the distance between the two classes appear to be greater than the correlation suggested. In these two matrices the “planted forest” stands out with very high values (difference and K-S) that would suggest a high separability in view of the analysis in the previous section, but since this class did not have a “signature” waveform (low cross correlation between its individual samples) this conclusion would be erroneous. In both the cumulative difference and K-S matrix, the “open water class” does not appear to be easily separable from the “forest”, “savanna” and “pasture” classes as was pointed out in the previous visual analyses.

3.3 Analysis of river sections

Because our interest in waveforms comes primarily from determining the ability to identify waveforms of water and to separate them from other land cover classes, it seemed only natural to analyze the behavior of the interface between water and other classes. Figure 6 shows four sections of river being crossed by a SARAL track and the waveforms likely to be progressively “contaminated” by another land cover type.

Water and forest. In Figure 6a the satellite track points from an ascending orbit (bottom to top) are first clearly above the forest, then above the water and finally return above the forest. The four waveforms are very

Table 2. Matrices of cross-correlation, cumulative difference and Kolmogorov-Smirnov distance for mean waveforms.

| Cross-correlation | Agriculture | Forest | Pasture | Planted forest | Savanna | Urban | Open water |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|--------------|------------|
| Agriculture | 1 | | | | | | |
| Forest | 0.527 | 1 | | | | | |
| Pasture | 0.455 | 0.423 | 1 | | | | |
| Planted forest | 0.196 | 0.363 | 0.393 | 1 | | | |
| Savanna | 0.596 | 0.574 | 0.546 | 0.410 | 1 | | |
| Urban | 0.467 | 0.353 | 0.580 | 0.282 | 0.595 | 1 | |
| Open Water | 0.546 | 0.807 | 0.538 | 0.288 | 0.715 | 0.635 | 1 |
| Cumulative difference | Agriculture | Forest | Pasture | Planted forest | Savanna | Urban | Open water |
| Agriculture | 0 | | | | | | |
| Forest | 4992 | 0 | | | | | |
| Pasture | 3865 | 5059 | 0 | | | | |
| Planted forest | 10021 | 12072 | 9674 | 0 | | | |
| Savanna | 3142 | 3980 | 3476 | 10428 | 0 | | |
| Urban | 5264 | 7192 | 4411 | 10255 | 4772 | 0 | |
| Open Water | 6058 | 3640 | 5634 | 12011 | 4490 | 5822 | 0 |
| Kolmogorov-Smirnov (K-S) | Agriculture | Forest | Pasture | Planted forest | Savanna | Urban | Open water |
| Agriculture | 0 | | | | | | |
| Forest | 2833 | 0 | | | | | |
| Pasture | 1045 | 2561 | 0 | | | | |
| Planted forest | 8632 | 11273 | 8520 | 0 | | | |
| Savanna | 1129 | 1715 | 1101 | 10231 | 0 | | |
| Urban | 2611 | 4938 | 2472 | 6706 | 3308 | 0 | |
| Open Water | 2528 | 1556 | 2133 | 10379 | 1160 | 3571 | 0 |

similar both in shape and amplitude and the second point (C 11.21) appears to have some secondary peaks. This is very consistent with our previous analyses stating that “forest” and “open water” produce very similar waveforms.

Water and savanna. Figure 6b shows a situation where three out of four points fall on land (two on the fluvial island) and only one point is clearly over water (point C 10.26). The other three waveforms show a much more complex shape not unlike the mean waveform of “savanna” in the previous section. Arguably, the influence of the “open water” class expresses itself through the central peak near the center of the three waveforms.

Water and urban. Figure 6c shows a situation where the satellite track runs parallel to the river bank which is occupied by an urban area. The first two points at the bottom (ascending orbit) are clearly influenced by the nearby urban structures and show complex waveforms being a kind of mixture from the “pure” responses shown in the previous section (see Figure 5f and g). The third point also receives influence from the bank that is now covered mostly by cultivated areas. Finally the last point falls in the water further away from the river bank but probably still receives influence from the dry land and has clearly the simplest shape with only one strong peak typical of water.

Water and agriculture. Figure 6d shows an area dominated by agriculture near the river banks. In this case, even though the four points clearly overlap land (within the footprint), its influence is not perceivable on

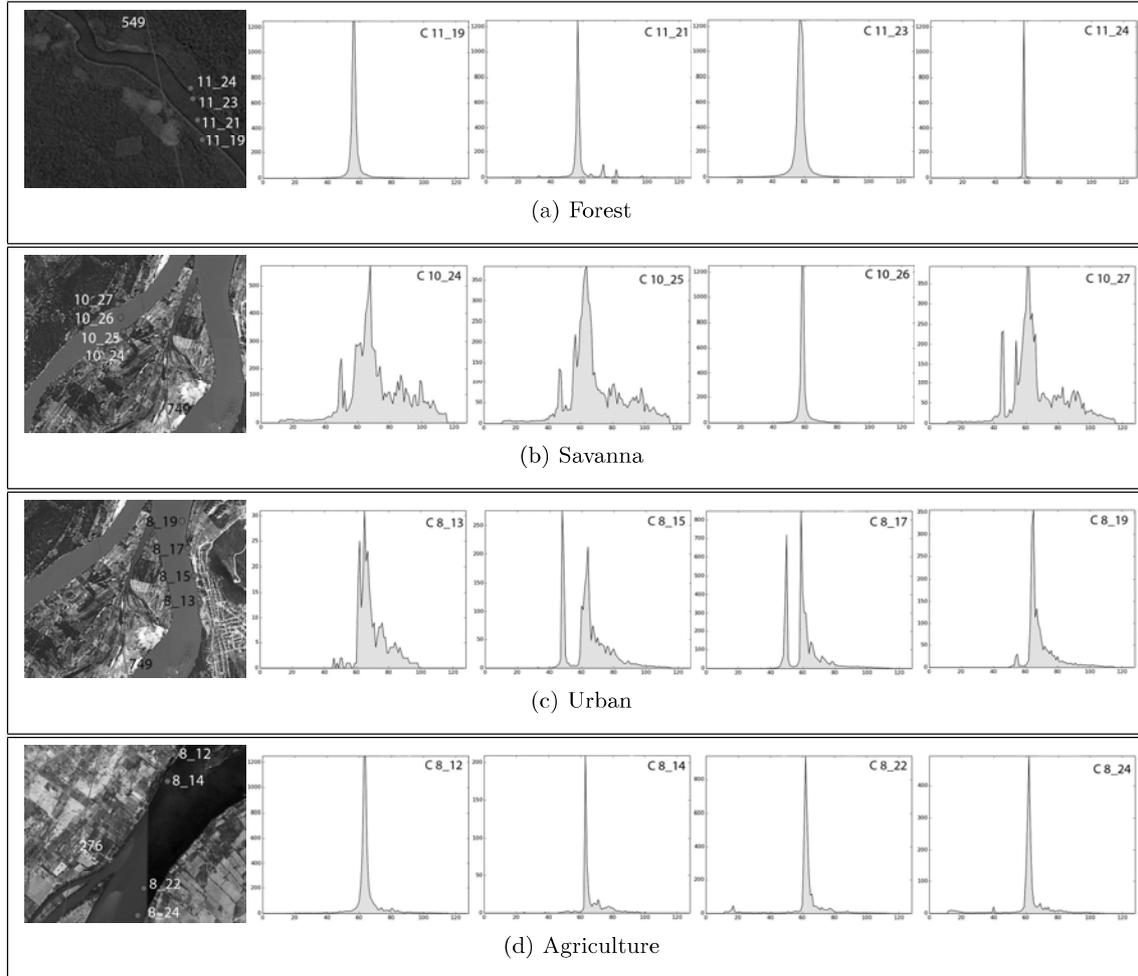


Figure 6. Waveforms of river sections.

the waveforms. Because water gives such a strong return, the influence of the land seems to fade out almost completely. Even point C 8_12 show a typical water waveform even though it appears to be on land.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

This article brings an exploratory analysis of raw waveform data from the recently launched (2013) SARAL altimetry satellite. This was motivated by recurring errors and low accuracy of some measurements of water level in rivers of medium width ($< 1Km$). A plausible hypothesis for these errors is that the waveform returns are “contaminated” by the land surrounding the river even when the actual altimetry point falls directly in the river. Our objective was then to analyze the influence of these land covers of the shape of the waveforms and try to establish a means of separating them from water.

Of the seven land cover classes studied (forest, planted forest, savanna, urban, pasture and agriculture) two presented very high within-class variation: “planted forest” and “pasture”. Because these two classes are thought to be highly dynamic in time and we did not have access to reliable validation data, no real conclusions could be drawn from their behavior. Our preliminary results suggest that these seven land cover classes could form two groups: the ones that can be separated from water and the ones that cannot.

Waveforms from the “forest” and “savanna” classes could not be separated from water since they were all highly correlated. This could mean that in a situation where the satellite track crosses a medium size river banked by forest it could involve problems of accuracy and even an eventual retracker scheme taking the context into account might not be able to separate the water from it banks. Conversely, since “agriculture” and “urban” classes were likely to be separable from water and a virtual monitoring station in this context would have better chances of giving a good accuracy. The three measures of similarity/difference used here tend to show a certain pattern of behavior that our visual analysis generally supports. This is not to say that other measures based on different concepts could not give better results. In fact, we believe, for instance, that one drawback from the three measurement used is that they give the same importance (weight) to all the bins of the waveforms and do not consider the more characteristic points (peaks) that shape the waveforms. A future approach could consider such points to describe and compare waveforms.

In this study waveforms were considered individually in an effort to approach the problem from a case by case stand. However, it has already been suggested that a contextual approach considering a sequence of waveforms would have a better chance of success.¹⁸ Finally neither the influence of the topography was considered and could have a significant effect on waveforms especially in abruptly sloping terrain.

REFERENCES

- [1] Desonie, D., [*Hydrosphere: Freshwater Systems and Pollution*], Infobase Publishing (2009).
- [2] Gleick, P. H. et al., [*The World's Water Volume 8: The Biennial Report on Freshwater Resources*], vol. 8, Island Press (2014).
- [3] ANA - Agencia Nacional das Aguas, [<http://www.ana.gov.br>], Site internet visited on March (2014).
- [4] Calmant, S. and Seyler, F., “Continental surface waters from satellite altimetry,” *C.R. Geoscience* **338**, 1113–1122 (2006).
- [5] Frappart, F., Calmant, S., Cauhopé, M., Seyler, F., and Cazenave, A., “Preliminary results of envisat ra-2-derived water levels validation over the amazon basin,” *Remote Sensing of Environment* **100**(2), 252–264 (2006).
- [6] Gardini, B., Graf, G., and Ratier, G., “The instruments on envisat,” *Acta Astronautica* **37**, 301–311 (1995).
- [7] ESA - European Sapatial Agencie, [<http://www.esa.int/ESA>], Site internet visited on February (2014).
- [8] Maillard, P. and Calmant, S., “Spatial processing techniques for satellite altimetry applications in continental hydrology,” in [*Proceedings of SPIE Remote Sensing 2013*], **8887**, International Society for Optics and Photonics, Dresden, Germany (2013).
- [9] CNES - Centre national d etudes spatiales, [<http://smc.cnes.fr/SWOT/>], Site internet visited on February (2014).
- [10] Chelton, D., Ries, J., Haines, B., Fu, L., and Callahan, P., [*Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications*], ch. Satellite Altimetry, 1–131, Academic Press, San Diego, USA (2001).
- [11] CNES, [*SARAL/Altika Products HandBook*], CNES (2013).
- [12] Rosmorduc, V., Benveniste, J., Lauret, O., Milagro, M., and Picot, N., [*Radar Altimetry Tutorial*], <http://www.altimetry.info> (2006).
- [13] Berry, P., Garlick, J., Freeman, J., and Mathers, E., “Global inland water monitoring from multi-mission altimetry,” *Geophysical Research Letters* **32**(16), L16401 1–4 (2005).
- [14] Calmant, S., Seyler, F., and Cretaux, J. F., “Monitoring continental surface waters by satellite altimetry,” *Surveys in geophysics* **29**(4-5), 247–269 (2008).
- [15] Vergasta¹, L. A., de Oliveira¹, R. A., Figliuolo¹, G. C., de Sousa¹, A. C., Pereira, P. A., Correia, F. W. S., da Silva, J. S., Calmant, S., and Seyler, F., “Análise comparativa entre dados de precipitação e de níveis de água estimados via produto merge e satélite envisat na bacia amazônica,”
- [16] Papa, F., Bala, S. K., Pandey, R. K., Durand, F., Gopalakrishna, V., Rahman, A., and Rossow, W. B., “Ganga-brahmaputra river discharge from jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the bay of bengal,” *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* **117**(C11) (2012).

- [17] Enjolras, V. and Rodriguez, E., “Using altimetry waveform data and ancillary information from SRTM, Landsat and MODIS to retrieve river characteristics,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **47**(6) (2009).
- [18] Ričko, M., Birkett, C. M., Carton, J. A., and Crétaux, J.-F., “Intercomparison and validation of continental water level products derived from satellite radar altimetry,” *Journal of Applied Remote Sensing* **6**(1), 061710–061710 (2012).
- [19] da Silva, J., Calmant, S., Seyler, F., Rotunno Filho, O., Cochonneau, G., and Mansur, W., “Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISAT radar altimetry missions,” *Remote Sensing of Environment* **114**, 2160–2181 (2010).
- [20] Press, W., Teukolsky, S., Vetterling, W., and Flannery, B., [*Numerical Recipes in C: the Art of Scientific Computing*], Cambridge University Press, 2nd ed. (1992).

Apêndice F

Código Python 2.7: algoritmo RANSAC

```
Funcao com os parametros de entrada para o modelo
def RANSAC(lat,y,althook,alt,nit,nth,narat,nout):
    def RANSAC_plot(n, x, y, m, c, final=False, x_in=(), y_in=(),
                    points=()):
        """ plot the current RANSAC step
        :param n      iteration
        :param points picked up points for modeling
        :param x      samples x
        :param y      samples y
        :param m      slope of the line model
        :param c      shift of the line model
        :param x_in   inliers x
        :param y_in   inliers y
        """
        fname = "output/figure_" + str(n) + ".png"
        line_width = 1.
        line_color = '#0080ff'
        title = 'iteration ' + str(n)
        if final:
            fname = "output/final.png"
            line_width = 3.
            line_color = '#ff0000'
            title = 'final solution'
        plt.figure("RANSAC", figsize=(15., 15.))
        # Grid para o grafico
        grid = [min(x), max(x), min(y), max(y)]
        plt.axis(grid)
        # Insercao do grid no grafico
```

```

plt.grid(b=True, which='major', color='0.75', linestyle='
        --')
plt.xticks([i for i in range(min(x), max(x), 5)])
plt.yticks([i for i in range(min(y), max(y), 10)])
# Plotagem dos pontos de entrada
plt.plot(x[:,0], y[:,0], marker='o', label='Input points',
        color='#00cc00',
        linestyle='None', alpha
        =0.4)

# Plotagem do modelo
plt.plot(x, m*x + c, 'r', label='Line model', color=
        line_color, linewidth=
        line_width)

# Plotagem dos pontos inliers
if not final:
    plt.plot(x_in, y_in, marker='o', label='Inliers',
            linestyle='None',
            color='#ff0000',
            alpha=0.6)

# Plotagem dos pontos selecionados para a modelagem
if not final:
    plt.plot(points[:,0], points[:,1], marker='o', label='
            Picked points',
            color='#0000cc',
            linestyle='None',
            alpha=0.6)

    print 'tamanho amostra', len(x_in)

# -----
# Parametros RANSAC
RANSAC_iterations = nit    # numero iteracoes
RANSAC_threshold = nth    # limiar
RANSAC_ratio = narat     # taxa de inliers requeridos
# Dados de entrada
n_samples = len(alhook)    # numero de pontos da inseridos
outliers_ratio = nout     # taxa de outliers
n_inputs = 1
n_outputs = 1
# Busca do modelo linear para os pontos
def find_line_model(points):
    m = (points[1,1] - points[0,1]) / (points[1,0] - points[0,
        0] + sys.float_info.
        epsilon) # inclinacao
        da linha (slope)
    c = points[1,1] - m * points[1,0] # intercepto (y-
        intercept)

    return m, c

```

```

# Encontrar o ponto intercepto do modelo linear com a normal dos
# pontos
(x0,y0), para isto:
    :parametro m inclinacao da reta
    :parametro c intecepto
    :parametro x0 point's x coordinate
    :parametro y0 point's y coordinate
    :return ponto de interceptacao
def find_intercept_point(m, c, x0, y0):
    # intersecao do ponto com o modelo
    x = (x0 + m*y0 - m*c)/(1 + m**2)
    y = (m*x0 + (m**2)*y0 - (m**2)*c)/(1 + m**2) + c
    return x, y
# Inicio do processo iterativo de busca:
    n_inputs = 1
    n_outputs = 1
# Amostras
    y_noise = np.array(y)
    x_noise = np.array(lat)
    shape = (len(y),1)
    x_noise = x_noise.reshape(shape)
    y_noise = y_noise.reshape(shape)
    plt.figure(4)
    plt.plot(x_noise,y_noise)
    data = np.hstack( (x_noise,y_noise) )
    ratio = 0.0
    model_m = 0.0
    model_c = 0.0
# Executar iteracoes RANSAC:
    # Selecionar dois pontos aleatorios
for it in range(RANSAC_iterations):
    n = 2
    all_indices = np.arange(x_noise.shape[0])
    np.random.shuffle(all_indices)
    indices_1 = all_indices[:n]
    indices_2 = all_indices[n:]
    maybe_points = data[indices_1,:]
    test_points = data[indices_2,:]
    # Encontrar o modelo linear para os pontos sorteados:
    m, c = find_line_model(maybe_points)
    x_list = []
    y_list = []
    num = 0
    # Encontrar linhas ortogonais para o modelo para todos os
# pontos testados:
for ind in range(test_points.shape[0]):

```

```

x0 = test_points[ind,0]
y0 = test_points[ind,1]
# Encontrar o intercepto do modelo com a normal do
# ponto (x0,y0)
x1, y1 = find_intercept_point(m, c, x0, y0)
# Distancia entre o ponto e o modelo
dist = math.sqrt((x1 - x0)**2 + (y1 - y0)**2)
# Verificar inliers:
if dist < RANSAC_threshold:
    x_list.append(x0)
    y_list.append(y0)
    num += 1
x_inliers = np.array(x_list)
y_inliers = np.array(y_list)
# Caso o novo modelo seja melhor que o anterior - Carregar
# o novo:

if num/float(n_samples) > ratio:
    ratio = num/float(n_samples)
    model_m = m
    model_c = c

# Caso o numero de inliers satisfaca o modelo o processo
e encerrado:
if num > n_samples*RANSAC_ratio:
    print 'O modelo final foi encontrado!'
    break

# Plotar o modelo final
RANSAC_plot(0, x_noise,y_noise, model_m, model_c, True)
print '\nFinal model:\n'
print ' ratio = ', ratio
print ' model_m = ', model_m
print ' model_c = ', model_c
print 'PointstModel',maybe_points[0]
print 'PointstModel',maybe_points[1]
print (maybe_points[0][1]+maybe_points[1][1])/2
# Saida do modelo: mediana dos pontos inliers
return np.median(y_inliers)
\label{cod:RANSAC}

```

Apêndice G

Código Python 2.7: ajuste do *Tracker*

```
c = 299792458.0 # velocidade da luz
sr = c/(2*freq) # distancia entre bins
if len(alti) > 0:
    cy = []
    lat = []
    lon = []
    wff = [] #original
    wfn = [] # wf original com 256 bins
    trk = [] # tracker
    wfst = [] # wf deslocado 256
    a=80
    b=208
    pto = []
    for j in range(0,len(alti)):
        if alti[j].ice1 != 0 and alti[j].ice1 != 4294967.295:
            ct+=1
            wfx = [0]*256 # lista vazia com 256 bins
            wf = alti[j].wf #Forma de onda original com 128 bins
            wff.append(wf)
            wfx[a:b] = wf[0:128] #Copia da FO original para as posicoes 80
                                #-208 em wfx

            wfn.append(wfx)
            trk.append(alti[j].trk) #Valor do tracker
            cyx = alti[j].cycle # Ciclo
            cy.append(cyx)
            pto.append(ct) #Numero do Ponto
            la = alti[j].lat #Latitude
            lo = alti[j].lon #Longitude
            lat.append(la)
```

```

lon.append(lo)
wfn = np.array(wfn) #Alteracao do tipo de dado
for i in range(0,len(wfn)):
    if trk[0] != trk[i]: #condicao para deslocar a FO
        shift = (int(round((trk[0]-trk[i])/sr))) #Valor de
                deslocamento
        wfz = [0]*256 #Forma de Onda com 256 bins
        wfz[int(a+shift):int(b+shift)]=wfn[i][80:208] #Forma de Onda
                com deslocamento
        wfst.append(wfz) #Pontos ajustados pelo trakcer
    else: # Se tracker incial e atual sao iguais
        wfz=[0]*256 #Forma de Onda com 256 bins
        wfz[int(a):int(b)]=wfn[i][80:208]
        wfst.append(wfz) #Pontos sem necessidade de ajuste

```

Apêndice H

Código Python 2.7: Retracker Customizado

```
for i in range(0, len(wf)):  
    count+=1  
    posld = [] #Posicao leading edge  
    poste = []  
    leamp = [] #Amplitude leading edge  
    teamp = [] #Amplitude de cada bin apos filtro  
    temp = []  
    wff = [] #waveform  
    tk = 0 #traker  
    gate = 0 #bin  
    rtkfle = []  
    for j in range(0, len(wf[i])):  
        temp.append(wf[i][j])  
        tk = trk[i]  
        if wf[i][j] != 0 and wf[i][j] > wf[i][j-1] and (wf[i][j] -  
            wf[i][j-1]) >5 : #filtro por  
                amplitude  
  
            posld.append(j+1)  
            leamp.append(wf[i][j])  
        elif wf[i][j] < wf[i][j-1]:  
            poste.append(j)  
            teamp.append(wf[i][j])  
            wff.append(wf[i][j])  
    alt_rtkep2 = []  
    alt_ice1 = []  
    if posld != []:  
        gate = ((min(posld)+max(posld))/2) #Posicao Inicial +  
            Posicao Final dividido por dois
```

```

rtkfle = (tk + ((cgate-gate)/2)*sr) # Valor do tracker para
                                     bin x cgate e o bin nominal do
                                     satellite
nivel = alti[i] - ((alti[i].ice1 +(tk-rtkfle)) + alti[i].ion
                  + alti[i].dry + alti[i].wet + alti[
                  i].ptide + alti[i].stide )
cfac = alti[i].ice1 + (tk-rtkfle) # fator de correcao
#que considera que entre ice1 calculado e o "real"
#existe uma diferenca que e dada por tk-rtkfle.
if sat == 'satelite':
    if rtkfle > 0 and cfac > 0:
        d2 = alti[i].alt #valor do tracker
        if alti[i].ion != 32767.0:
            a = (d2 - (alti[i].ice1 + alti[i].ion + alti[i].dry +
                      alti[i].wet + alti[i].ptide + alti[
                      i].stide)) #ice1
            c = (d2 - (cfac + alti[i].dry + alti[i].wet + alti[i].
                      ptide + alti[i].stide)) #retracker
                      customizado
            alt_rtkep2.append(c)
        else:
            a = (d2 - (alti[i].ice1 + alti[i].dry + alti[i].wet +
                      alti[i].ptide + alti[i].stide)) #
                      ice1
            c = (d2 - (cfac + alti[i].dry + alti[i].wet + alti[i].
                      ptide + alti[i].stide)) #retracker
                      customizado
            alt_rtkep2.append(c)
    else:
        if rtkfle > 0 and cfac > 0:# and alti[i].ion != 32767.0:
            d2 = alti[i].alt
            a = (d2 - (alti[i].ice1 + alti[i].ion + alti[i].dry +
                      alti[i].wet + alti[i].ptide + alti[
                      i].stide)) #ice1
            c = (d2 - (cfac + alti[i].ion + alti[i].dry + alti[i].
                      wet + alti[i].ptide + alti[i].stide
                      ))
            alt_rtkep2.append(c)

```