

## SOFTWARE PARA APLICAÇÕES HIDROLÓGICAS DE OBSERVAÇÕES ALTIMÉTRICAS DO SATÉLITE ICESAT

Otávio Augusto Passaia<sup>1</sup>\*; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>2</sup>.

**Resumo** – Tem-se desenvolvido um grande número de técnicas de sensoriamento remoto para observação de variáveis hidrológicas, permitindo o monitoramento de áreas remotas com cobertura espaço-temporal superior a observações *in situ*. Altimetria é o estudo da medição de altitudes, a representação das altitudes em mapas. O satélite estadunidense ICESat (*Ice, Cloud, Land and Elevation Satellite*), desenvolvido pela NASA, foi utilizado aqui principalmente para medições de nível d'água em corpos d'água brasileiros. O objetivo é avaliar a utilidade desses produtos para aplicações hidrológicas. Para tal, foi desenvolvido um *software*, através de uma rotina no Matlab de extração e visualização dos dados. O código e interface mostraram ser boas ferramentas. Entre as aplicações realizadas, foi estimado o perfil longitudinal do Rio Madeira, monitorada a variação do nível d'água em relação ao nível do mar das Lagoas Itapeva e dos Quadros e estudada a planície de inundação na confluência dos Rios Negro e Branco.

**Palavras-Chave** – sensoriamento remoto, altimetria a laser, hidrologia

### ICESAT DATA PROCESSING FOR HYDROLOGICAL APPLICATIONS THROUGH A SOFTWARE DEVELOPMENT

**Abstract** – Recently a large number of remote sensing techniques for observation of hydrological variables has been developed. That enables large and sparse areas monitoring, with superior temporal-spatial cover to the *in situ* observations. Altimetry is the study of altitude measurements, or the altitude representation in maps. The American satellite ICESat (*Ice, Cloud and Elevation Satellite*) was used in this research to perform water level measurements in Brazilian water bodies. The goal is to evaluate the ICESat utility in hydrologic applications. To reach it, a software was developed to process the ICESat altimetry data, through a routine in Matlab programming language. The resulting code and interface proved to be effective tools to process ICESat data. Among the applications performed, it was estimated the Madeira River's longitudinal profile, monitored the water level variation of the Itapeva and dos Quadros Lagoons, and the floodplain in the confluence of Branco and Negro Rivers was studied.

**Keywords** – remote sensing, laser altimetry, hydrology

<sup>1</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS. otavio.passaia@ufrgs.br

<sup>2</sup> Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS. rodrigo.paiva@ufrgs.br

## 1 INTRODUÇÃO

A adequada gestão dos recursos hídricos e mitigação de impactos negativos de desastres hidrológicos passa pela compreensão do ciclo da água. Têm-se desenvolvido técnicas de sensoriamento remoto para observação de variáveis hidrológicas, que permitem o monitoramento de grandes áreas remotas com uma cobertura espaço-temporal muito superior à de observações *in situ*.

Altimetria é o estudo ou técnica da medição de altitudes, ou a representação das altitudes em mapas. Segundo O'Loughlin *et al.* (2016), os satélites de altimetria medem a altura da água de superfície de maneira similar: um pequeno pulso de energia (ou feixe) é transmitido, e então é refletido pela superfície da água de volta para o sensor. Se a posição do satélite é conhecida então a distância do altímetro para a superfície é proporcional ao intervalo de tempo entre a transmissão e o retorno da energia refletida. A área delimitada pelo tamanho do feixe é o *footprint* do satélite.

A vantagem da altimetria a laser é o *footprint* menor em relação à por radar, devido ao altímetro a laser emitir radiações com comprimento de onda muito menores ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$  – infravermelho). Logo, a abertura angular do feixe ( $\Delta\theta$ ) e consequentemente seu *footprint* também são menores.

O satélite estadunidense ICESat (*Ice, Cloud, Land and Elevation Satellite*) foi desenvolvido pela NASA, para medir a variação na espessura de gelo da Terra, bem como características da topografia e da vegetação terrestre, através do uso do sensor *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS). O uso nesta pesquisa será em medições de nível d'água em rios e lagos brasileiros.

Apesar de sua precisão, o ICESat ainda não é muito utilizado, devido à dificuldade em processar seus dados. Segundo O'Loughlin *et al.* (2016), outra razão é que a maioria dos hidrólogos tendem a pensar em termos de séries temporais de medidas repetidas regularmente, as quais o ICESat não produz. Os dados são irregulares no tempo.

O objetivo geral desta pesquisa é descrever desenvolvimento de software para processamento de dados de altimetria do ICESat e avaliar sua potencialidade para aplicações em hidrologia.

## 2 METODOLOGIA

Será descrita a rotina computacional e interface desenvolvidas e áreas de estudo utilizadas para avaliar a funcionalidade do software. O pesquisador usuário do programa poderá escolher: a) o período desejado (por exemplo, de 20/02/2003 a 10/11/2003); b) o local de estudo (por exemplo, a Ilha do Bananal), de duas maneiras: c) utilizar o SRTM como critério de remoção de pontos, ou não.

Primeiramente, é necessário realizar o download dos dados do site do Centro nacional de dados de neve e gelo (NSIDC, em inglês), disponível em <http://nsidc.org/data/icesat/> (Zwally, 2014). Neste pacote de dados brutos, há informações sobre a latitude, longitude, a elevação, sobre os picos de onda, e diversas flags (índices) que podem ser utilizadas numa triagem inicial.

### 2.1 Tratamento dos Dados

Existem alguns índices (*flags*) que contém informações sobre a observação, como as flags de elevação e saturação, utilizadas para identificar observações adequadas. O sistema de referência é mudado para o *datum* vertical Modelo Gravitacional da Terra de 1996 (EGM96).

Entretanto, apenas com esses critérios de remoção de dados espúrios, ainda restam muitos dados inutilizáveis (*outliers*). É necessário removê-los. Para tal, um novo critério foi utilizado: comparar as medidas do ICESat com o SRTM. No *software* desenvolvido neste estudo, se a diferença for maior do que 50 m, a observação é removida.

## 2.2 A Região de Estudo

O primeiro passo é extrair os dados e colocá-los sobre uma imagem georreferenciada (por exemplo, do Landsat), e verificar qual a distribuição espacial dos pontos. Desenha-se um polígono (*shapefile*, por exemplo) da região de interesse, aplica-se um *buffer* de 80 m (Segundo Hall *et al.* (2012), devido a erros de geolocalização do ICESat e resolução do footprint e da máscara d'água).



Figura 1 - Fluxograma do funcionamento do programa

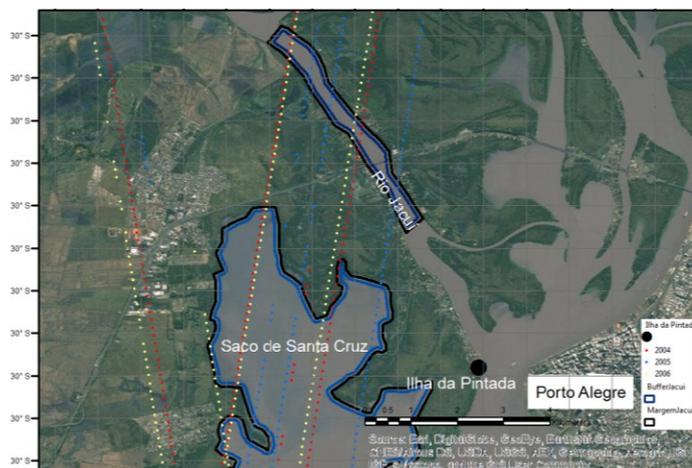


Figura 2 – Estação Virtual no Jacuí. A estação compreende toda a região interna ao polígono distante 80 m da margem, em azul.

## 2.3 Estações Virtuais

Segundo Silva (2010), “Cada intersecção de um traço do satélite altimétrico com superfície reflexiva do plano de água consiste numa estação virtual, sendo potencialmente possível obter uma série temporal da altura do nível d'água”. Para cada intersecção, o programa calculará a média, mediana e desvio padrão da série, e identificará os *outliers* de duas maneiras (além das já mencionadas): a) serão identificados e removidos os pontos com probabilidade de fazer parte da população menor ou igual a 5% (considerando uma distribuição normal); e b) observações fora do limite do quartil mais 1,5 vezes a amplitude interquartil. O fluxograma (figura 1) ilustra os passos realizados. A figura 2 ilustra uma estação virtual.

## 2.4 Estudos de Caso

Observações de níveis d'água podem ser utilizados para inúmeras aplicações em hidrologia. Os **resultados e discussões** sobre cada estudo de caso serão descritos imediatamente após cada descrição da metodologia empregada, para facilitar a compreensão do leitor.

### 2.4.1 Sistemas de Lagos

Foram utilizadas estações virtuais dentro de cada lago para realizar o monitoramento. Zhang *et al.* (2011), monitoraram lagos chineses para estudar a variação no nível, área e volume destes. Os níveis foram obtidos através de diversos satélites, entre eles o ICESat. Infelizmente, como se pode observar na figura 3, se tem dados do ICESat somente para a Lagoa dos Quadros e a Lagoa Itapeva. As estações virtuais foram extraídas, e uma série temporal gerada para cada uma delas.

O satélite não passou sobre as duas lagoas em dias próximos, logo não é possível observar a relação entre o nível de uma lagoa e o da outra. Entretanto, o nível será comparado ao nível do mar. Na Figura 4 é feita esta comparação. Em preto, está o nível da Lagoa dos Quadros e da Lagoa Itapeva (a lagoa Itapeva são os dois pontos solitários bem à esquerda). Em azul, está o nível do mar. A Lagoa dos Quadros está acima do nível do mar (aproximadamente 1 m), e seu nível varia com amplitude da ordem de 1.5 m, o que é maior que a amplitude de variação observada no mar. A partir dessas

observações, pode-se argumentar que os níveis nas lagoas são governados por processos hidrológicos das bacias afluentes, e não pelo nível do mar, já que não se observa relação entre eles.

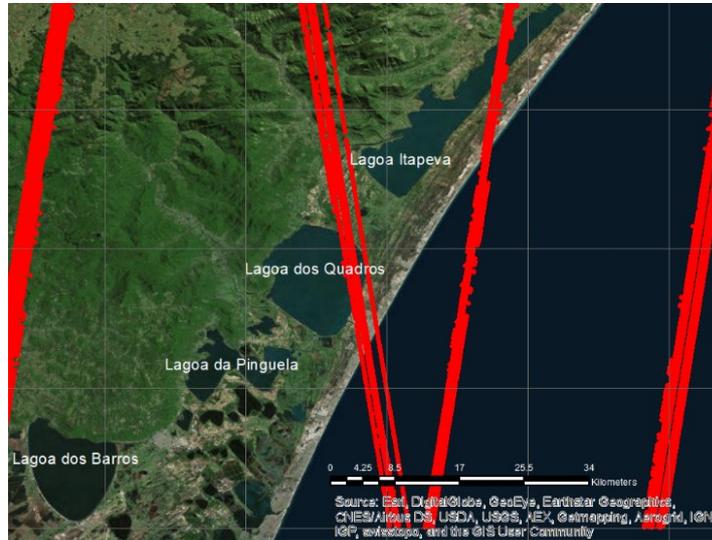


Figura 3 - Passagem do ICESat sobre as Lagoas do Litoral Norte do RS

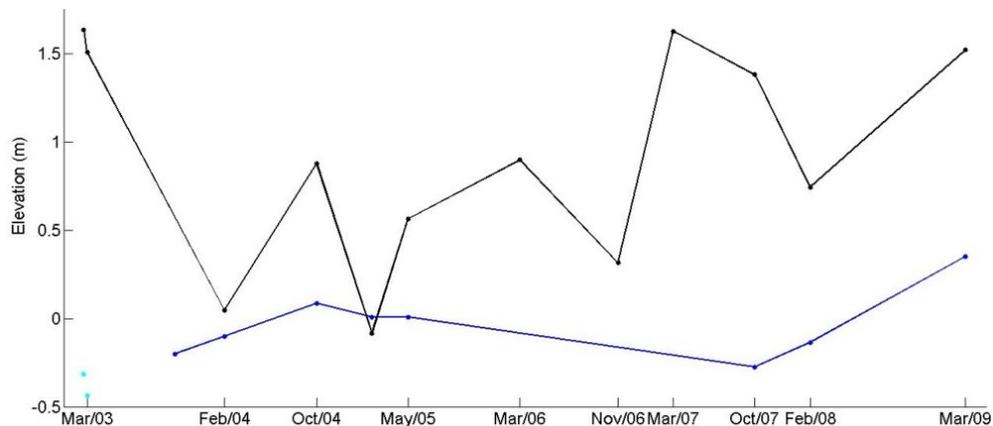


Figura 4 - Nível Lagoa dos Quadros, Lagoa Itapeva (em preto) e Mar (pontos azuis)

#### 2.4.2 Perfil longitudinal médio da linha d'água

Novamente, foram feitas estações virtuais em cada passagem do satélite sobre o curso d'água. Foi utilizado todo o Rio Madeira, de Porto Velho até sua foz no Rio Amazonas. A máscara d'água utilizada foi elaborada através de um mosaico de 8 imagens do Landsat, dos meses de abril e maio, mas não são necessariamente do mesmo ano.

Na figura 5 o perfil do talvegue do Rio Madeira. É visível a diferença de altitude entre a cabeceira do Rio, à direita na imagem, e a foz no Rio Amazonas, à esquerda. Também é clara a elevada amplitude dos níveis d'água entre a época de cheia e seca, chegando a mais de 10 m. Verifica-se também a possibilidade de estimar a declividade de linha d'água para diferentes períodos e trechos. A declividade é da ordem alguns cm/km. Verifica-se que a declividade é variável ao longo do tempo, sendo possível inclusive identificar possível efeito de remanso do Amazonas sobre o rio Madeira no período de Maio, Junho e Julho.

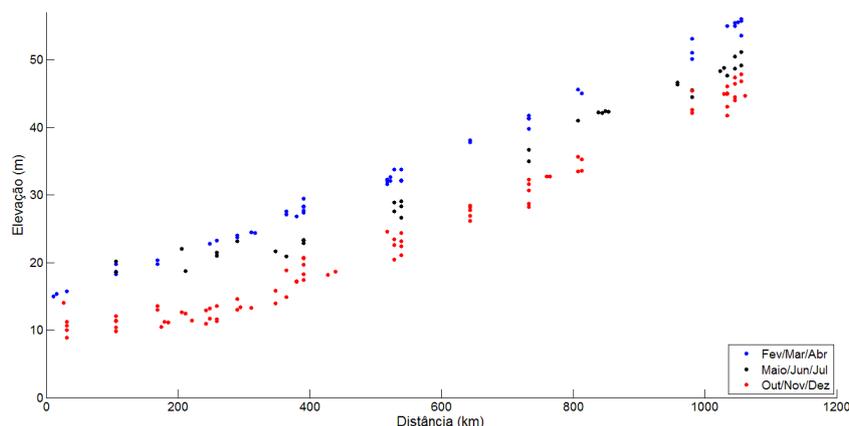


Figura 5 - Perfil Longitudinal do Rio Madeira. Dividiram-se os pontos em três conjuntos: em azul, o período de cheias (fevereiro e março); em verde, o período de secas (outubro a dezembro), e em vermelho, a época de vazões intermediárias (maio a julho).

### 2.4.3 Várzeas de Inundação

Existem áreas onde o fluxo temporal e espacial de água na planície de inundação é pouco entendido, como na Amazônia. Há poucas estações fluviométricas, todas no canal principal, tornando difícil o entendimento da dinâmica de fluxo da várzea de inundação.

Pode-se utilizar o ICESat para medir o nível no canal principal e na planície de inundação. Hall *et al* (2012) e Trigg *et al.* (2013) fizeram isso para a Amazônia, com auxílio do Landsat para observar as variações temporais e espaciais de nível d'água na várzea, e interpretar a dinâmica de fluxo.

Foi escolhida a região da várzea próxima à confluência dos Rios Negro e Branco. Na figura 6 é possível identificar as órbitas do ICESat ali, bem como uma legenda em escala de cores para diferentes altitudes.

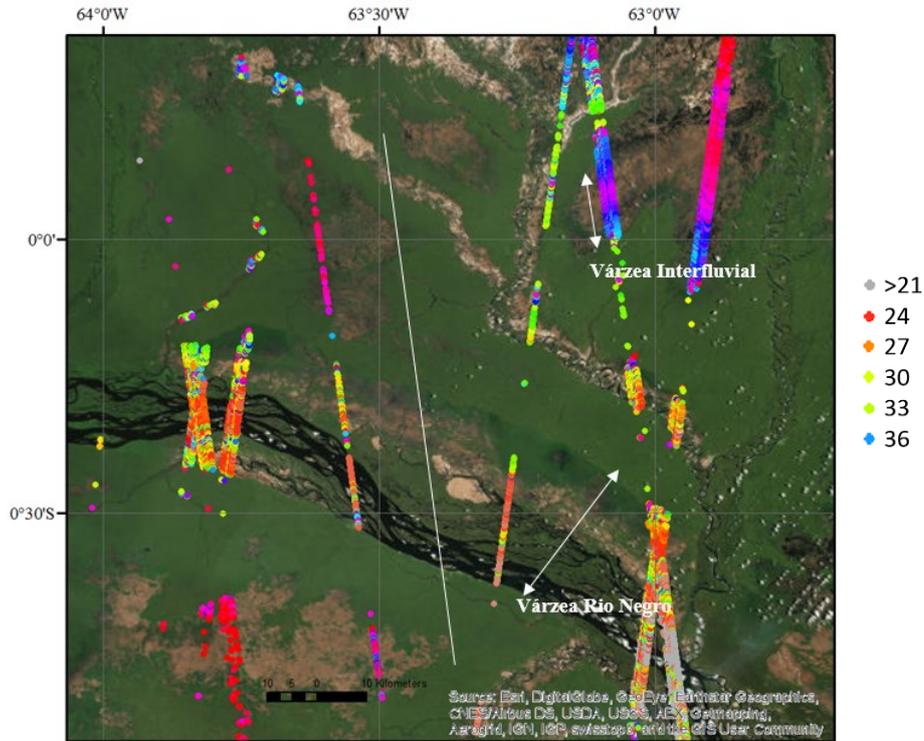


Figura 6 - Passagens do ICESat sobre a região do Rio Negro. A linha branca é a delimitação do perfil que será mostrado a seguir.

Para o perfil da figura 6, foram plotadas para diferentes datas as medições de nível do satélite, e então comparadas entre si e com a elevação do MDE da SRTM (figura 7). Há pequenas diferenças entre o ponto inicial (o zero, ou referência) do MDE e das diferentes passagens do ICESat. Percebe-se que as medidas se aproximam bastante, e a tendência é o MDE ficar um pouco acima, pois ele não é capaz de observar a superfície abaixo da vegetação como o ICESat. A região mais baixa, à esquerda no gráfico, é o Rio Negro e sua várzea. Após, o terreno e, novamente na região baixa, o afluente. Então, vê-se a vegetação e na terceira região baixa, a várzea inundada (entre 110 e 132 km).

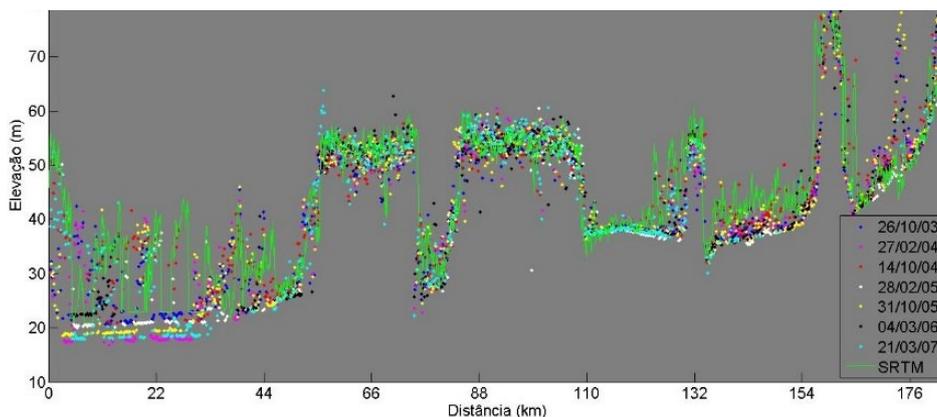


Figura 7 - Perfis com medidas do ICESat e o MDE da SRTM, na região do Rio Negro

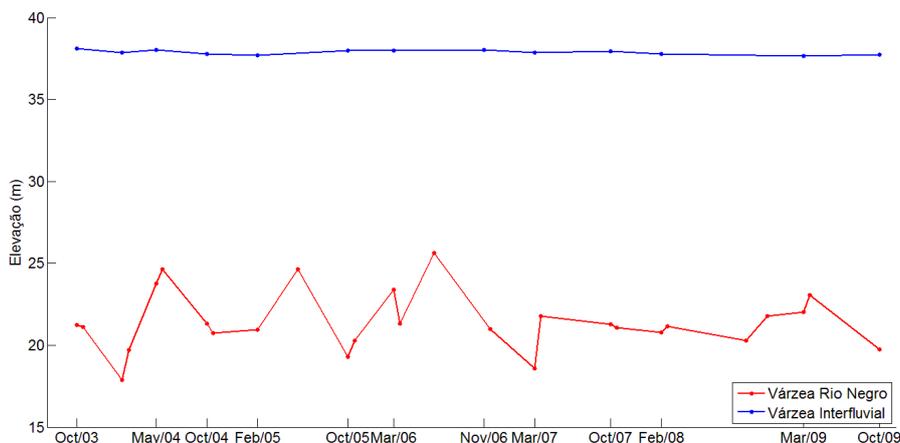


Figura 8 - Estações Virtuais na várzea do Rio Negro e na Várzea Interfluvial

Foram feitas duas estações virtuais, uma na várzea do Rio Negro, e outra na Várzea Interfluvial. A figura 8 mostra a série temporal delas. Percebe-se que os níveis na várzea Interfluvial (azul) são maiores, e variam com menor amplitude (~0,3 m), enquanto a várzea do Rio Negro (vermelho) possui nível menor, porém com amplitude de variação de até 8 m. Estas análises demonstram como os dados do ICESat podem ser úteis para elucidar processos hidrológicos em regiões com complexa rede de rios e várzeas inundáveis, como a bacia do rio Negro.

### 3. RESULTADOS DA PESQUISA

A interface do software de processamento de dados ICESat e os arquivos de saída serão mostrados a seguir. Os resultados das aplicações realizadas através dele foram previamente discutidos. A Figura 9 mostra a interface do ICESatProcessor. A interface foi toda escrita em inglês, para possibilitar a divulgação e uso internacional.

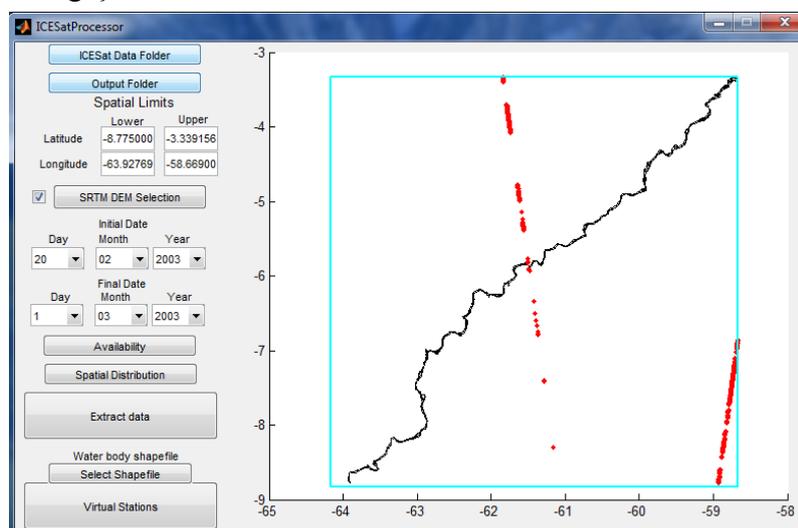


Figura 9 – Interface do programa. O quadrado azul claro é o limite da quadrícula do MDE da SRTM; os traços vermelhos, as passagens do ICESat; e os limites em preto, a delimitação do Rio Madeira.

Conforme o botão selecionado, o programa fornece como saída alguns arquivos de texto, com informações sobre longitude; latitude; elevação do ICESat; elevação do SRTM; ano; mês e dia. Para as estações virtuais, também são apresentadas as médias das elevações; mediana; desvio padrão, o número de pontos utilizados; e índice do polígono onde foi feita a estação.

## 4 CONCLUSÕES

O código e interface produzidos no Matlab mostraram ser boas ferramentas para utilizar os dados do ICESat. Apesar da falha do laser 1, do satélite ter saído de órbita, e de sua campanha irregular no tempo, o ICESat mostrou-se eficiente em todas as aplicações realizadas neste trabalho. Os perfis do Rio Madeira e da região do Rio Negro mostraram-se coerentes e condizentes com o atual conhecimento daquelas regiões. Quanto ao monitoramento de lagoas e sistemas de lagos, foi demonstrada a variação de nível no tempo e no espaço para as regiões estudadas.

Ainda há muito potencial a ser explorado em outras aplicações, além das realizadas aqui, como: a) geração de um MDE; b) declividade média da linha d'água; d) calibração de modelos hidrodinâmicos; e) nivelamento de réguas de estações fluviométricas; f) estudo de sistemas hídricos.

O software desenvolvido e aqui descrito está disponível para download e uso através do link <https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/icesatprocessor/>, na página do grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala (HGE – IPH/UFRGS).

A NASA está planejando uma missão de acompanhamento, o ICESat 2 (ABDALATI, 2010), para dar continuidade aos estudos das mudanças polares e de mudanças na biomassa vegetal, com o lançamento previsto para o ano de 2017. Espera-se poder utilizar boa parte dos desenvolvimentos do presente estudo para observações do futuro ICESat 2.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e aos colegas no grupo de pesquisa de Hidrologia de Grande Escala (HGE) pelo apoio para realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ABDALATI, W. et al. (2010) The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE*, 98.5(5), pp. 735-751.
- CARABAJAL, C. C.; HARDING, D. J. (2005) ICESat validation of SRTM C-band digital elevation models. *Geophysical research letters*, 32(22), pp. 1-5.
- HALL, A.; SCHUMANN, G.; BAMBER, D.; BATES, P.; TRIGG, M. (2012). Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat. *Water Resources Research*. 48(10), pp. 1-6.
- O'LOUGHLIN, F.; NEAL, J.; YAMAZAKI, D., BATES, P. (2016) ICESat derived inland water surface spot heights. *Water Resources Research*, 52(4), pp. 3276-3284.
- SILVA, J. S. *Altimetria Espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia Amazônica*. 2010. 316 p. Tese Doutorado em Engenharia Civil – Curso de Pós-Graduação COPPE/UFRJ - Université de Toulouse, 2010.
- TRIGG, M. A. et al. (2013) Observations of Amazon floodplain channel dynamics using Landsat images and ICESat elevations. *AGU Spring Meeting Abstracts*, 1.
- ZHANG, G.; et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003–2009). (2011) *Remote Sensing of Environment*, 115(7), pp. 1733-1742.
- ZWALLY, H. J. *GLAS/ICESat L2 Global Land Surface Altimetry Data (HDF5), Version 34*. GLA14. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <http://dx.doi.org/10.5067/ICESAT/GLAS/DATA211>.