UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Otávio Augusto Passaia

OBSERVAÇÃO DA ALTIMETRIA DO SATÉLITE ICESAT EM CURSOS D'ÁGUA PARA APLICAÇÕES HIDROLÓGICAS

Porto Alegre

Dezembro de 2016

OTÁVIO AUGUSTO PASSAIA

OBSERVAÇÃO DA ALTIMETRIA DO SATÉLITE ICESAT EM CURSOS D'ÁGUA PARA APLICAÇÕES HIDROLÓGICAS

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Rodrigo C. D. Paiva

Porto Alegre

Dezembro de 2016

OTÁVIO AUGUSTO PASSAIA

OBSERVAÇÃO DA ALTIMETRIA DO SATÉLITE ICESAT EM CURSOS D'ÁGUA PARA APLICAÇÕES HIDROLÓGICAS

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Comissão de Graduação (COMGRAD) da Engenharia Civil na UFRGS

Porto Alegre, 5 de dezembro de 2016

Prof. Rodrigo C. D. Paiva
Dr. pelo IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Anderson Luis Ruhoff
Dr. pelo IPH/UFRGS
Relator

BANCA EXAMINADORA

Prof. Anderson Luis Ruhoff (IPH - UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Joel Avruch Goldenfum (IPH - UFRGS)
Pós-Doutor pelo Institute National des Sciences Appliquées, INSA-Lyon

Mestre Mino Viana Sorribas (IPH - UFRGS)
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Rodrigo C. D. Paiva (IPH - UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Adair e Roseli, e a minha irmã, Carolina, que sempre acreditaram em mim e foram meu grande apoio ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Para concluir minha graduação e realizar este trabalho, o auxílio e motivação de diversas pessoas foi imprescindível. Transmito aqui meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Rodrigo C. D. Paiva, orientador deste trabalho, e também da minha bolsa de iniciação científica e do meu estágio obrigatório, por ter proposto a ideia deste projeto, desenvolvido sob sua tutela nas atividades acima mencionadas, e também pela amizade, compreensão, incentivo, paciência e pela disponibilidade em transmitir seu conhecimento.

Aos meus queridos colegas do grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala, pela convivência, amizade e pelas brincadeiras sadias que tornam essa jornada mais leve. Agradeço Alice, Fernando Fan, Vinícius, Sly, Pedro, Mino, Dieyson, Paulo por sempre estarem dispostos a me ajudar e sanar dúvidas e especialmente ao Germano, João e Ayan, pelas ideias de aplicações para este trabalho e auxílios na programação.

A todos meus colegas de aula que tive durante o período de faculdade, em especial aqueles com os quais compartilhei muitos intervalos, caronas, idas ao RU e risadas, que ajudaram a suportar a grande exigência do nosso curso. Aqui cabe um agradecimento individual aos colegas Guilherme Púglia, Douglas Zechin e Marina Zilio, por terem me acompanhado ao longo de toda graduação.

Aos meus amigos de Bento Gonçalves, do colégio Cecília Meireles, do colégio José Farina, do curso de Marcenaria e do teatro no Projeto Coração Cidadão que, mesmo com a distância, mantiveram o contato e o companheirismo. Cabe agradecimentos especiais aos meus amigos do RPG, pelos jogos divertidos; aos amigos da vizinhança, pelo futebol de rua, jogos de Taco; e aos companheiros do "Futsal dos Bróders".

Aos vizinhos, mas também amigos, da Casa do Estudante da UFRGS, com os quais compartilhei minha rotina e também as dificuldades, e individualmente aos meus colegas de quarto, Alex, Ítalo e Iara, que me ensinaram a aceitar a diversidade e melhorar como pessoa.

Aos amigos de todas as partes do mundo e do Brasil do intercâmbio em Grenoble, na França, pelas inúmeras viagens, festas, e tacos comidos durante aquele ano, especialmente aos companheiros que hoje moram em Porto Alegre e ainda mantenho contato.

Aos meus colegas do Programa de Educação Tutorial, do qual fiz parte 3 anos, por todos os eventos e viagens compartilhados, e especialmente ao tutor do PET - Engenharia Civil na época, Prof. Roberto Rios, por toda a ajuda, conselhos e confiança.

Aos colegas do Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais - LEGG, pelo período que passei com eles, as boas risadas, e pelo futsal das segundas-feiras, que até hoje contribui para minha saúde e bem-estar.

A todos os excelentes professores que contribuíram para minha formação pessoal e profissional, sejam eles das escolas que estudei, da faculdade, do cursinho, do SENAI ou do Teatro, seus ensinamentos fazem parte do que sou hoje.

A toda minha grande família, primos, tios, avós, e especialmente aos meus pais, Adair e Roseli, pela excelente educação, compreensão e confiança que ajudaram a moldar minha personalidade; e à minha irmã, Carolina, pelas conversas, conselhos, amizade. Juntos nós quatro formamos esta família tão unida e divertida, sem eles não seria o que sou hoje.

A minhas amigas que em determinado momento foram minhas companheiras e especialmente Alice, por todo o amor, carinho, e fazer meus dias mais felizes com seu sorriso.

Finalmente, aos colegas, professores e regentes dos corais que participei, pelos ensinamentos, apoio e ajuda no aprendizado da música, sem ela eu não estaria graduado.

A maior vitória é batalha não realizada

Sun-Tzu

RESUMO

A adequada gestão dos recursos hídricos passa pela compreensão detalhada dos processos físicos envolvidos no ciclo da água. Têm-se desenvolvido nos últimos anos um grande número de técnicas de sensoriamento remoto para observação de variáveis hidrológicas, que permitem o monitoramento de grandes áreas remotas (e.g. Amazônia) 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 ou plantas topográficas. Neste sentido, destaca-se o satélite estadunidense ICESat, desenvolvido pela NASA, que foi usado nesta pesquisa para realizar estimativas de nível d'água em rios e lagos brasileiros. O objetivo geral é avaliar a utilidade do ICESat em aplicações hidrológicas. Para tal, foi desenvolvida uma ferramenta (aplicativo ou programa) para utilização dos dados de altimetria, através de uma rotina na linguagem de programação do Matlab. O código e interface produzidos mostraram ser boas ferramentas para utilizar os dados do ICESat. Para validação dos dados do satélite ICESat, foi feita uma comparação dos níveis d'água obtidos via sensoriamento remoto com as estações fluviométricas da ANA, na região da Ilha do Bananal. Percebe-se que as variações de níveis d’água obtidas com o ICESat se aproximam das observações das estações fluviométricas da ANA, com erros médios quadráticos menores que 30 cm. O ICESat mostrou-se eficiente nas 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.

Palavras-chave: Altimetria. Altimetria a laser. ICESat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de pesquisa 21

Figura 2 - Estações de medição de nível no mundo 22

Figura 3 - Número de estações de medição de nível ao longo dos anos 23

Figura 4 - Cobertura espacial das estações fluviométricas (em vermelho) e órbitas do ICESat (em verde) 23

Figura 5 - Medida altimétrica em hidrossistemas continentais 26

Figura 6 - Esquema com as grandezas envolvidas na altimetria a laser do ICESat 27

Figura 7 - esquema do GLAS do ICESat 29

Figura 8 - Amostras de onda do ICESat 32

Figura 9 - Logo do ICESat 35

Figura 10 - Remoção de valores atípicos 36

Figura 11 - Medidas do ICESat ao norte do Guaíba 37

Figura 12 - Distância de 80 m a partir das margens do Guaíba 38

Figura 13 - Estação Virtual no Rio Jacuí 39

Figura 14 - Fluxograma do funcionamento do programa 41

Figura 15 - Lagoas do Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul 42

Figura 16 - Perfil topográfico do talvegue do Rio do Carmo 43

Figura 17 - Interface do Programa 45

Figura 18 - Imagem de satélite do Rio Madeira 46

Figura 19 - Arquivo de saída READ-ME 48

Figura 20 - Estação Virtual e a Estação da ANA (lat. -11.618º, long. -50.661º) no Rio Araguaia....50

Figura 21 - Estações virtuais ao Sul da estação São Felix do Araguaia da ANA (lat. -11.618º, long. -50.661º), no Rio Araguaia....51

Figura 22 - Gráfico comparando estação virtual e a da ANA....52

Figura 23 - Perfil Longitudinal do Rio Madeira....53

Figura 24 - Passagem do ICESat sobre as Lagoas do Litoral Norte do RS....54

Figura 25 - Nível Lagoa dos Quadros, Lagoa Itapeva (em preto) e Mar (pontos azuis)....55

Figura 26 - Perfil do Terreno numa passagem do ICESat sobre a Lagoa dos Quadros....56

Figura 27 - Passagem do ICESat sobre a Laguna dos Patos....57

Figura 28 - Níveis nos diferentes polígonos da Laguna dos Patos, com as mesmas cores da figura 33....58

Figura 29 - Boxplots da Lagoa dos Patos....58

Figura 30 – Níveis em diferentes dias nas estações virtuais da Lagoa dos Patos. Cada cor indica um dia diferente de passagem do ICESat, igual a Tabela 9....60

Figura 31 - Passagens do ICESat sobre a região do Rio Negro....61

Figura 32 - Imagem do Alos-Palsar no período de águas baixas....62

Figura 33 - Imagem do Alos-Palsar no período de águas altas....62

Figura 34 - SRTM para a região da confluência dos Rios Negro e Branco....63

Figura 35 - diferenças entre σ0 para as duas imagens do Alos-Palsar, na região do Rio Negro....64

Figura 36 - σ0 para imagem de águas altas (preta) e águas baixas (verde) do Alos-Palsar, na região do Rio Negro....64

Figura 37 - Perfis com medidas do ICESat e o MDE da SRTM, na região do Rio Negro....65

Figura 38 - ICESat e MDE na Floresta Inundada, na região do Rio Negro 65

Figura 39 - ICESat e MDE no Rio Negro e sua várzea 66

Figura 40 - Estações Virtuais na várzea do Rio Negro e na Várzea Interfluvial 67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Operação dos Lasers/Resumo da campanha até 2005 30

Tabela 2 - Comparação das missões de altimetria mais populares para estimativa do nível d'água superficial 33

Tabela 3 - Arquivo de Saída do Spatial Distribution 47

Tabela 4 - Arquivo de saída Results 49

Tabela 5 - Arquivo de Saída ICESat and SRTM 49

Tabela 6 - Arquivo de Saída Virtual Stations 49

Tabela 7- Erro e Correlação das estações 51

Tabela 8 - Resultados para as Lagoas Itapeva e dos Quadros 54

Tabela 9 - Dados das estações virtuais para a Lagoa dos Patos 59

LISTA DE SIGLAS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

ICESAT - *Ice, Cloud and Land Elevation Satellite*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

ANA – Agência Nacional de Águas

GLAS - *Geoscience Laser Altimeter System*

GLA 14 - *Global Land Surface Altimetry Data, Version 34*

NSIDC - *National Snow and Ice Data Centre*

WGS84 - *World Geodetic System* de 1984

EGM96 - *Earth Gravitational Model* de 1996

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

MDE - Modelo Digital de Elevação

SIG – Sistema de Informação Geográfica

VALS - *Virtual Altimetry Station*

LISTA DE SÍMBOLOS

r = raio da pegada

H = distância entre o satélite e a superfície

$\Delta\theta$ = abertura angular do feixe em radianos

λ = comprimento de onda

D = diâmetro da antena

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
2 DIRETRIZES DA PESQUISA 19
2.1 QUESTÕES DE PESQUISA 19
2.2 OBJETIVOS DOTRABALHO 19
2.2.1 Objetivo principal 19
2.2.2 Objetivos secundários 19
2.3 PRESSUPOSTO 20
2.4 DELIMITAÇÕES 20
2.5 LIMITAÇÕES 20
2.6 DELINEAMENTO 20
3 ALTIMETRIA ESPACIAL 22
3.1 ALTIMETRIA POR RADAR 24
3.2 ALTIMETRIA A LASER 26
4 O SATÉLITE ICESAT 28
4.1 FUNCIONAMENTO E CAMPANHA 28
4.2 PRECISÃO 32
5 METODOLOGIA 34
5.1 TRATAMENTO DOS DADOS 34
5.2 A REGIÃO DE ESTUDO 36
5.3 ESTAÇÕES VIRTUAIS 39
5.4 ESTUDOS DE CASO 41
5.4.1 Validação através de estação da ANA 41
5.4.2 Sistemas de lagos 42
5.4.3 Perfil Longitudinal 43
5.4.4 Declividade da linha d'água 44
5.4.5 Várzeas de inundação 44
6 RESULTADOS 45
6.1 ICESAT PROCESSOR 45
6.1.1 Spatial Distribution 47
6.1.2 Extract Data 48
6.1.3 Virtual Stations 49

6.2 VALIDAÇÃO 50
6.3 APLICAÇÃO NO RIO MADEIRA 52
6.4 APLICAÇÃO NAS LAGOAS DO LITORAL NORTE DO RS 53
6.5 APLICAÇÃO NA LAGOA DOS PATOS 56
6.6 APLICAÇÃO NA AMAZÔNIA – RIOS NEGRO E BRANCO E VÁRZEAS DE INUNDAÇÃO 60
7 CONCLUSÕES 68
REFERÊNCIAS 69

1 INTRODUÇÃO

O principal constituinte da maioria dos seres vivos é a água, fonte de vida. Além de ser imprescindível para os organismos, a maior parte (~62,5%) da energia elétrica gerada em nosso país provém de usinas hidrelétricas (EPE, 2015). As mudanças no uso do solo – como aumento da impermeabilização - causadas pelo crescimento populacional e consequente expansão urbana, fazem com que as características das bacias hidrográficas se alterem, ampliando o escoamento superficial e então os eventos de cheia. Segundo Trigg et al. (2013, p. 1), muitas estimativas de biogeoquímicos são dependentes do conhecimento dos processos hidrodinâmicos de uma planície de inundação, por exemplo. Ademais, a crescente demanda por água, a sua contaminação e a falta de tratamento e destinação adequada dos esgotos diminui sua disponibilidade, em alguns casos originando escassez.

Logo, é necessário compreender detalhadamente os processos físicos envolvidos no ciclo da água para uma adequada gestão dos recursos hídricos e mitigação de impactos negativos de desastres hidrológicos, como as recentes cheias e secas extremas observadas nacionalmente.

Têm-se desenvolvido nos últimos anos um grande número de técnicas de sensoriamento remoto para observação de variáveis hidrológicas, que permitem o monitoramento de grandes áreas remotas (como a Amazônia, por exemplo) com uma cobertura espacial muito superior à de observações *in situ*. Essas observações incluem estimativas por satélite da precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, de níveis d'água (altimetria), entre outras.

Altimetria é o estudo ou técnica da medição de altitudes, ou a representação das altitudes em mapas ou plantas topográficas (FERREIRA, 1988). É a parte da topografia que trata dos métodos e instrumentos empregados no estudo e representação do relevo do solo. O estudo do relevo de um terreno consiste na determinação das alturas de seus pontos característicos e definidores da altimetria, relacionados com uma superfície de nível que se toma como elemento de comparação.

Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat, na sigla em inglês) é o satélite estadunidense da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA, na sigla em inglês), destinado a medir o balanço de massa da camada de nuvens na atmosfera,

mudanças na massa de gelo, bem como características da topografia e da vegetação terrestre (ZWALLY et al., 2002, p. 406). As medidas do ICESat fornecem detalhes sem precedentes de regiões costeiras, incluindo níveis d'água precisos, transições ininterruptas terra-água, e altura de vegetações costeiras. (URBAN et al., 2008, p. 16-17). O único instrumento do satélite foi o Sistema de Altimetria a Laser (GLAS), o primeiro a realizar altimetria a laser. O uso destes dados nesta pesquisa se dará principalmente nas medições em rios e lagos brasileiros. Segundo Schutz et al. (2005, p. 1), o eco do pulso emitido pelo satélite é capturado junto com seu registro digital. A altitude é determinada com base nessa resposta e no tempo de transmissão e recebimento do eco.

Após vasta busca, foram encontrados poucos trabalhos publicados no Brasil sobre o ICESat. Segundo O'Loughlin et al. (2016, p. 4), existem muito mais estudos que usaram altimetria de radar, apesar dos dados do ICESat serem a fonte de informação de altimetria mais precisa. Isto pode ser devido, em parte, aos dados de altimetria de radar pré-processados (somente observações válidas) estarem disponíveis facilmente na internet. Pesquisadores que pretendam usar o ICESat precisam baixar e processar seu próprio conjunto de dados, e desenvolver sua própria metodologia para remover quaisquer observações espúrias que possam existir.

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a utilidade dos produtos de altimetria do ICESat para aplicações hidrológicas em bacias brasileiras e seu uso para caracterização de processos hidrológicos. Assim, foi desenvolvida uma ferramenta (aplicativo ou programa de computador) para utilização dos dados de altimetria, através de uma rotina no Matlab de extração e visualização dos dados, então qualquer pesquisador poderá obter as medidas de maneira simples e rápida. São necessárias correções nos dados, devido a saturação, valores atípicos, presença de nuvens. A validação dos dados do ICESat foi feita através de uma comparação dos níveis d'água obtidos via sensoriamento remoto com as estações fluviométricas da ANA. Também foram apresentados estudos de caso aplicações dos dados altimétricos do ICESat para o estudo de perfil de rios, sistemas de lagos e sistemas rio/planície de inundação.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

A seguir são listadas as diretrizes utilizadas para elaboração deste Projeto de Pesquisa.

2.1 QUESTÕES DE PESQUISA

Neste trabalho, a questão de pesquisa é: como automatizar a extração, correção e disponibilização dos dados do satélite ICESat através de uma rotina computacional? Como esses dados podem ser úteis ao monitoramento de corpos d'água?

2.2 OBJETIVOS DOTRABALHO

Os objetivos deste trabalho são apresentados a seguir, divididos em principal e secundários.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a elaboração de um programa que, por meio dos parâmetros definidos pelo usuário, extraia os dados de medição de nível via sensoriamento remoto do satélite ICESat. Após, esses dados serão utilizados para avaliar as potencialidades para aplicações hidrológicas em corpos d'água (rios, lagos, várzeas de inundação).

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

a) avaliar a utilidade desses produtos de sensoriamento remoto dos níveis d'água para aplicações hidrológicas em bacias brasileiras;
b) realizar caracterização espaço-temporal de níveis d'água em bacias brasileiras baseado em sensoriamento remoto;
c) realizar monitoramento de níveis d'água, como em sistemas de rios e várzeas de inundação, lagos ou sistemas de lagos;
d) caracterizar perfis longitudinais de rios com altimetria.

2.3 PRESSUPOSTO

Esta pesquisa tem como pressuposto básico o Matlab ser um programa suficiente por si só e capaz de disponibilizar as ferramentas necessárias para o pleno desenvolvimento do trabalho.

2.4 DELIMITAÇÕES

A pesquisa está delimitada ao estudo e desenvolvimento de uma ferramenta computacional que faça a extração, correção e disponibilização dos dados de nível d'água do ICESat, e suas aplicações à hidrologia.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

a) utilização de um único satélite, o ICESat;
c) uso de uma única linguagem de programação, o *m-code*.
d) avaliação em alguns estudos de caso

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir:

a) pesquisa bibliográfica;
b) análise do problema;
c) desenvolvimento do programa;
d) validação do programa;
e) avaliação para aplicações em hidrologia;
f) considerações finais.

A sequência das etapas pode ser visualizada pelo diagrama esquematizado na Figura 1. A **pesquisa bibliográfica** foi realizada de maneira intensa no período inicial, e continuou ao longo de todo o trabalho. Foi utilizada uma vasta bibliografia técnica, como teses, dissertações, trabalhos de conclusão, artigos científicos e livros, para através das informações ali obtidas desenvolver o embasamento teórico necessário para a realização do estudo.

Figura 1 - Etapas de pesquisa

(fonte: elaborado pelo autor)

Durante a etapa de **análise do problema**, foram identificados quais recursos o *programa* deve ter, quais seriam as variáveis de entrada fornecidas pelo usuário e a maneira de apresentar os dados de saída.

Após, realizou-se o **desenvolvimento do programa** propriamente dito. Basicamente, esta etapa consistiu em escrever o código na linguagem de programação adotada, o *Matlab*. Além disso, foi criada a interface gráfica do programa, abrangendo desde a entrada de dados até a apresentação dos resultados.

A **validação do programa** serviu para comprovar a eficiência dos resultados apresentados pelo mesmo. Para isso, tais resultados foram comparados com aqueles fornecidos por estações fluviométricas em rios disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA). Também foi feita uma revisão de todo o algoritmo, objetivando reduzir ao máximo a possibilidade de erros que possam ocorrer durante a utilização do programa.

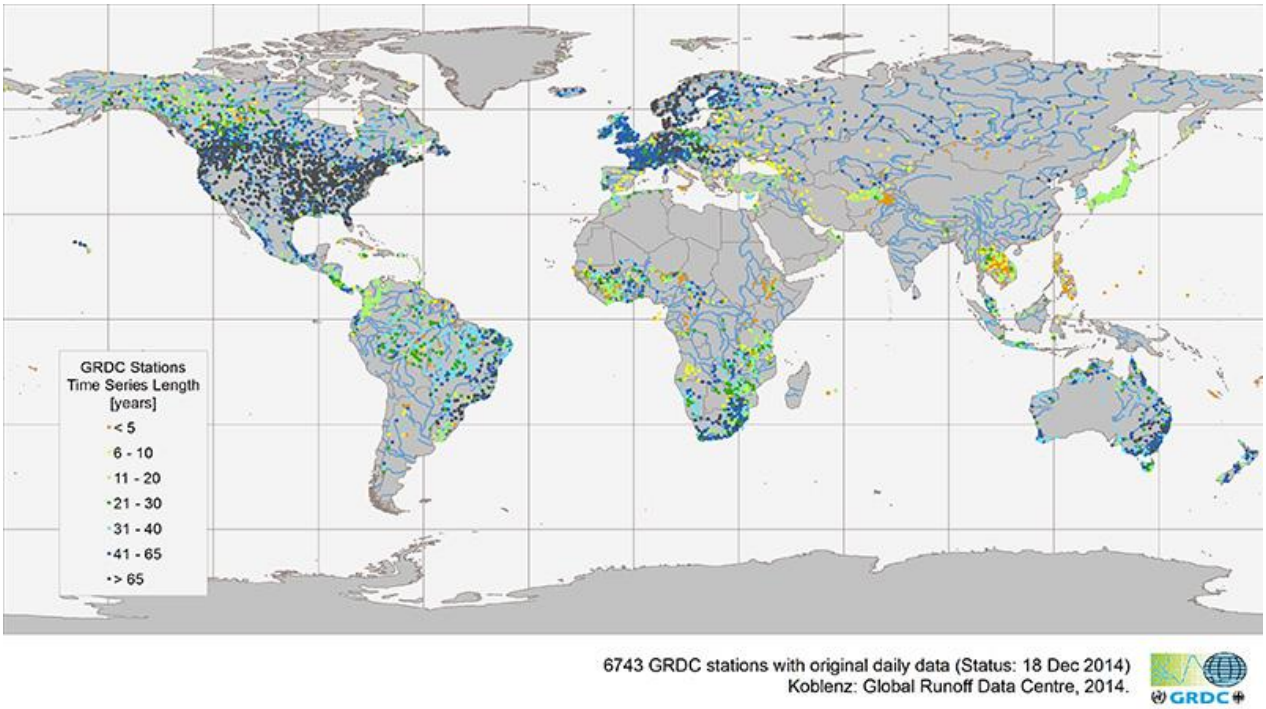
Na penúltima etapa, da **avaliação para aplicações em hidrologia,** se verificou a utilidade do satélite ICESat para caracterização de corpos d'água, monitoramento de níveis d'água, sistemas de rios, lagos, várzeas de inundação, as potencialidades do satélite para a hidrologia. Finalmente, nas **considerações finais**, concluiu-se este Projeto de Pesquisa.

3 ALTIMETRIA ESPACIAL

Altimetria é a técnica de medir a elevação da superfície. Visando medir a forma de nosso planeta, a altimetria espacial foi conceitualmente prevista nos anos 60 (BENVENISTE, 2011, p. 4). Foi constatado que a altimetria por satélite poderia ser usada para observação dos oceanos (por exemplo, os satélites Seasat, TOPEX/Poseidon). Após, aplicou-se a técnica para estudar as calotas polares desde o lançamento do ERS-1 em 1992 (Pritchard et al., 2010), e então foram desenvolvidas missões especificamente para esse fim, como o CRYOSAT e o ICESat, este último objeto deste estudo. Principalmente em regiões de difícil acesso, os níveis de corpos d'água continentais vêm sendo monitorados via satélite recentemente.

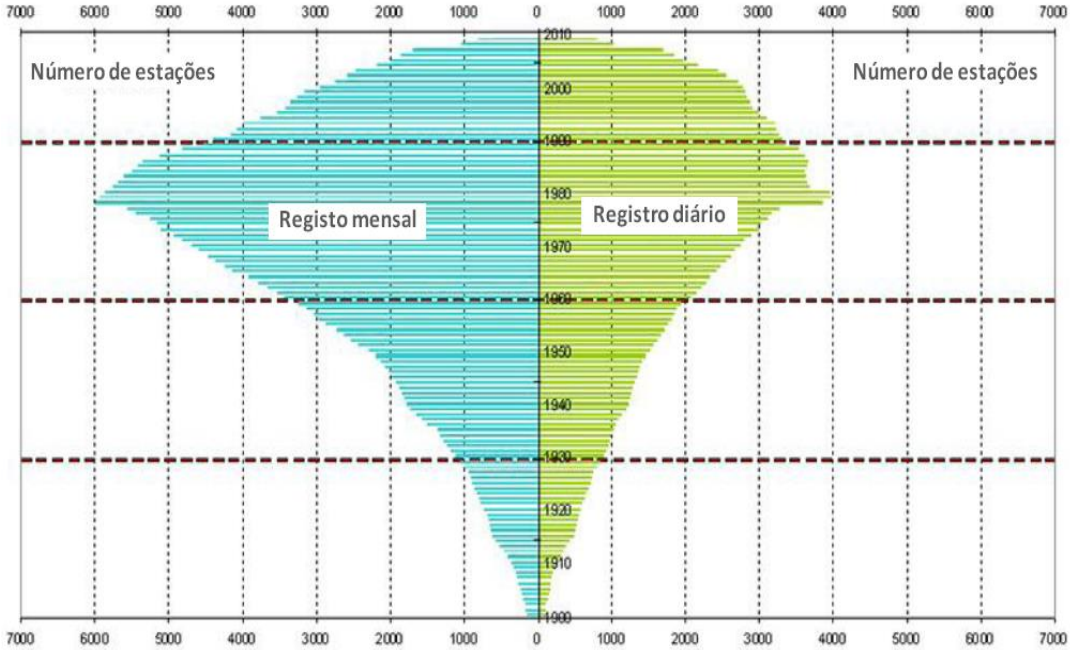
Uma vantagem da altimetria espacial em relação a altimetria *in situ* é a superior cobertura espaço temporal. A Figura 2 mostra as estações de nível no mundo todo. Percebe-se que a densidade dos postos é irregular sobre a superfície terrestre.

Figura 2 - Estações de medição de nível no mundo



Além disso, o número de estações de medição de nível vem diminuindo ao longo dos anos, como pode-se perceber pela figura 3.

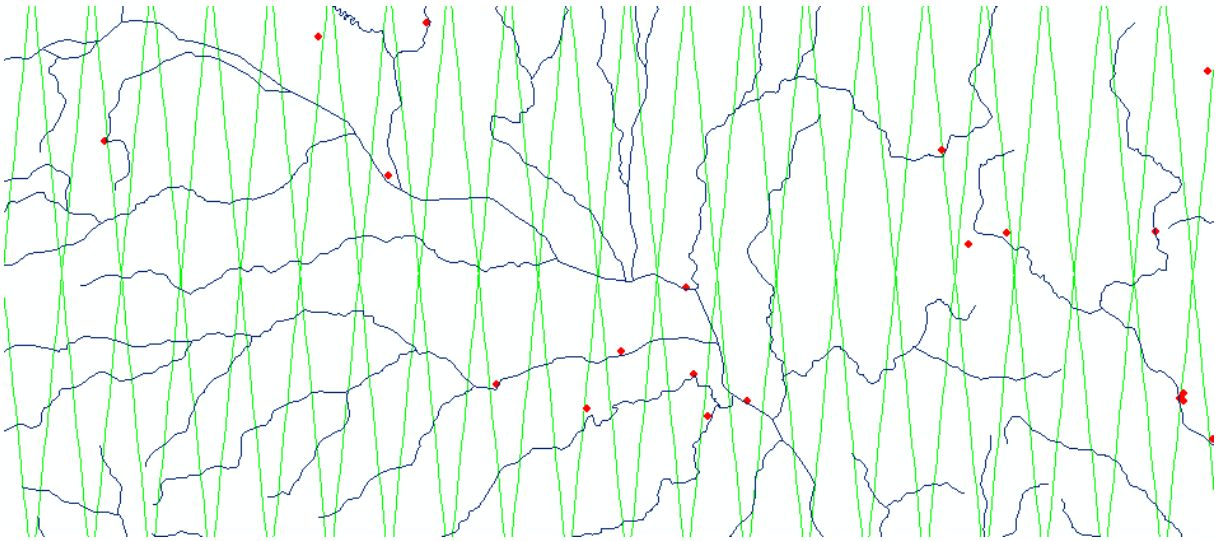
Figura 3 - Número de estações de medição de nível ao longo dos anos



(fonte: PARIS, 2015)

Um exemplo é a Amazônia brasileira, local remoto e de difícil acesso, mostrado na figura 4. É visível a diferença no número de estações *in situ* (em vermelho) para o número de passagens do satélite ICESat2 na região (em verde). Cada intersecção de um traço do ICESat com um corpo d'água é uma possível estação virtual de estimativa de nível via satélite.

Figura 4 - Cobertura espacial das estações fluviométricas (em vermelho) e órbitas do ICESat (em verde)



(fonte: elaborado pelo autor)

Segundo O'Loughlin et al., (2016, p. 3-4), todas as missões de satélites de altimetria medem a altura da superfície de maneira similar: um pequeno pulso de energia é transmitido, e então é refletido pela superfície da água de volta pro 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.

3.1 ALTIMETRIA POR RADAR

De maneira simples, é um emissor de radiação na faixa do micro-ondas que analisa o sinal que retorna da atmosfera ou da superfície terrestre. A seguir o modo de funcionamento de um altímetro por radar:

a) um gerador de pulsos produz pulsos (por exemplo, ≈4 mil por segundo – satélite TOPEX/Poseidon) na faixa espectral do micro-ondas (≈10 GHz) e os transmite à antena do sensor;
b) a superfície terrestre recebe os pulsos que vieram em sua direção, partindo da antena;
c) a superfície reflete o sinal, causando um eco, que retorna à antena do satélite e é então conduzido a um detector de pulsos.

A resposta da superfície ao pulso emitido pelo dispositivo está no eco, que chega ao detector. Sabendo a velocidade de propagação da onda emitida e o retardamento entre o tempo de emissão e o de coleta, pode-se estimar a distância entre o alvo e o sensor. Além disso, a forma do pulso recebido fornece indícios da rugosidade da superfície (SILVA, 2010, p. 71).

A área delimitada pelo tamanho do feixe é chamada de *beam limited footprint*, e é relacionada às emissões e às características dos equipamentos. Daqui em diante será chamado genericamente de "pegada*"* do satélite, que pode ser aproximada por:

$$r = \frac{H\ \Delta\theta}{2} \qquad (1)$$

Onde:
r = raio da pegada*;*
H = distância entre o satélite e a superfície;

$\Delta\theta$ = abertura angular do feixe em radianos.

Essa abertura pode ser estimada por:

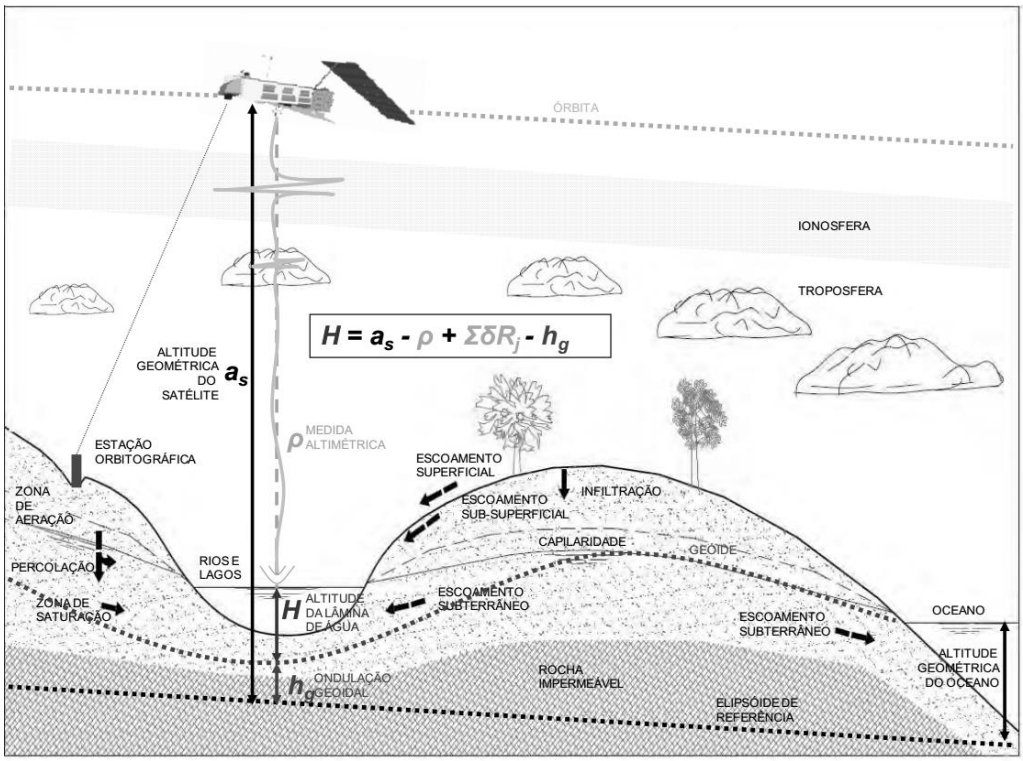
$$\Delta\theta = \frac{1{,}22\ \lambda}{D} \qquad (2)$$

Onde:
λ = comprimento de onda;
D = diâmetro da antena.

A altura de uma superfície pode ser calculada através da subtração entre a distância entre o satélite e a superfície e a altura da órbita do satélite em relação a um elipsoide de referência (a_s). Após uma série de correções instrumentais ($\sum \delta R_j$), ambientais e geofísicas, estima-se a distância entre superfície e satélite pela distância altimétrica (detectada pelo altímetro – ρ). A figura 5 mostra o cálculo da altitude de um hidrossistema continental e o processo de medição de altimetria espacial. Observa-se que para determinar a altitude da lâmina d'água no continente também foi descontado o valor da ondulação geoidal (h_g) (RESS, 2013).

Enquanto a pegada da banda Ku do RA-2/ENVISAT (radar) é de 1,7 km, o GLAS/ICESat (laser) produz uma pegada (limitada pelo feixe) de 70 m (O'LOUGHLIN et al., 2016, p. 4). Por apresentar uma pegada grande, as medições por radar contêm erros induzidos pela declividade da superfície e por observações fora do nadir, que são menores nas medições a laser (BRENNER et al., 2007, p. 321). Logo, a altimetria por radar não é indicada para regiões muito declivosas. Além disso, a altimetria por radar requer processamentos específicos para remoção de anomalias causadas por observações fora do nadir (fenômeno *hooking*, Maillard and Calmant 2015).

Figura 5 - Medida altimétrica em hidrossistemas continentais



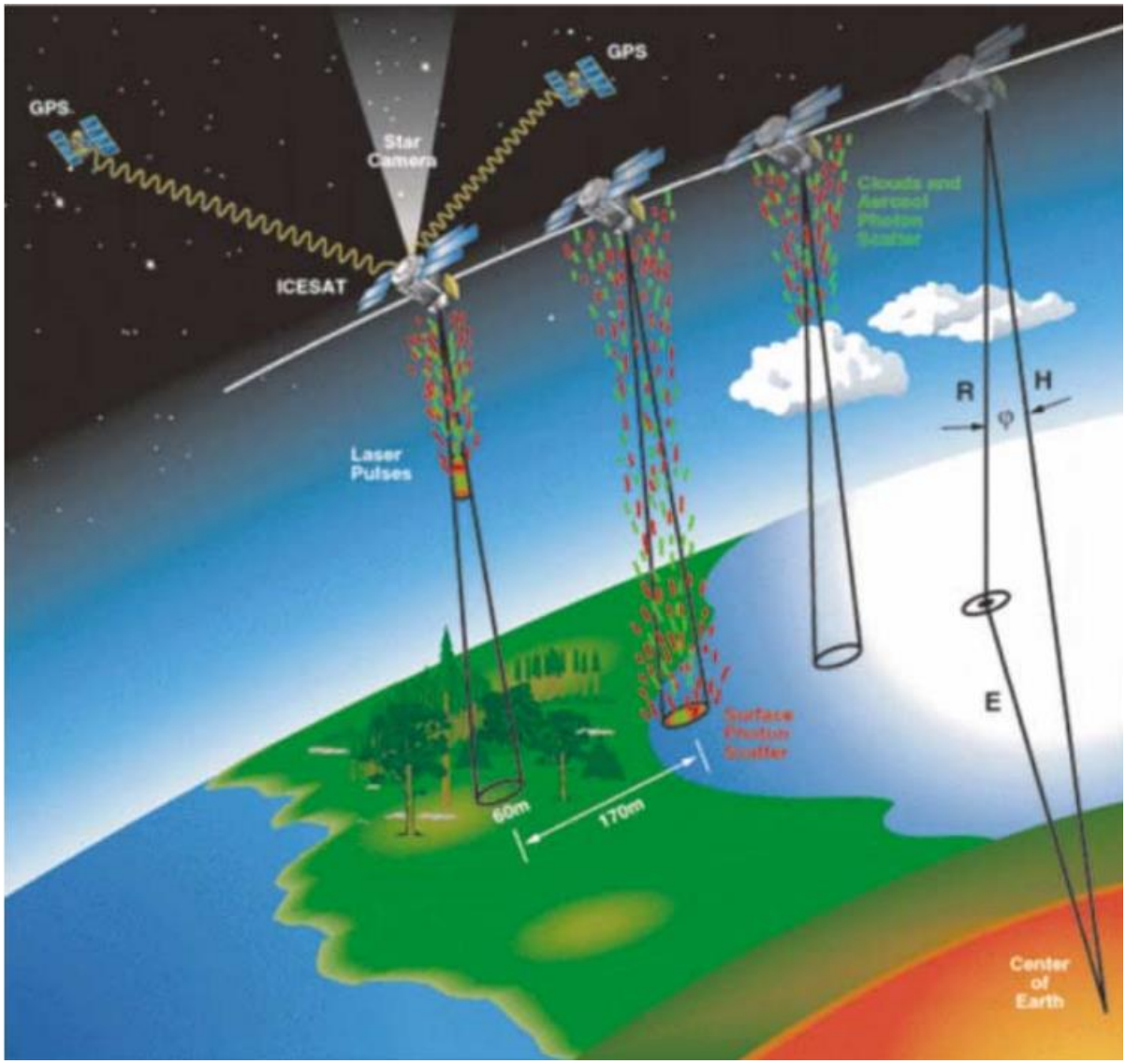
(fonte: SILVA, 2010, p. 62)

3.2 ALTIMETRIA A LASER

Funciona de maneira similar à altimetria por radar: o instrumento emite um pulso de “luz” no infravermelho ou visível em direção à superfície terrestre e seu eco é detectado um tempo depois. Sabendo a velocidade de propagação da luz na atmosfera e o tempo entre a emissão e o retorno do sinal é possível calcular a distância entre o satélite e a superfície. Além disso, há também o LIDAR (da sigla inglesa *Light Detection And Ranging*), que pode ser colocado sobre uma aeronave para a elaboração de mapas tridimensionais acurados e atualizados.

A vantagem da altimetria a laser é sua pegada menor em relação à altimetria por radar. Isso porque o altímetro a laser emite radiações com comprimento de onda muito menores, logo a abertura angular do feixe ($\Delta\theta$) e consequentemente sua pegada também são menores. Por outro lado, a altimetria a laser falha na modelagem de efeitos de espalhamento na atmosfera. Assim, a técnica a laser não consegue fazer medições através de nuvens grossas, enquanto o altímetro por radar pode ser usado sob qualquer condição climática (BRENNER et al., 2007, p. 324). A figura 6 mostra as grandezas envolvidas na altimetria a laser do ICESat.

Figura 6 - Esquema com as grandezas envolvidas na altimetria a laser do ICESat



(fonte: ZWALLY, 2002, p. 409)

O satélite objeto de estudo deste trabalho é o ICESat, que será descrito no capítulo seguinte.

4 O SATÉLITE ICESAT

O satélite utilizado no presente trabalho é o ICESat, desenvolvido pela NASA para medir a variação na espessura de gelo da Terra, bem como características da topografia e da vegetação terrestre. O sensor GLAS foi o primeiro altímetro a laser a orbitar a Terra, operado de 2003 a 2009 (HALL et al., 2012), segundo Schutz et al. (2005, p. 1), "possibilitou uma visão da Terra em três dimensões com precisão nunca antes vista". As medidas do laser altimétrico ICESat fornecem detalhes sem precedentes de regiões costeiras, incluindo níveis d'água precisos, transições ininterruptas terra água, e altura de vegetações costeiras (URBAN et al., 2008).

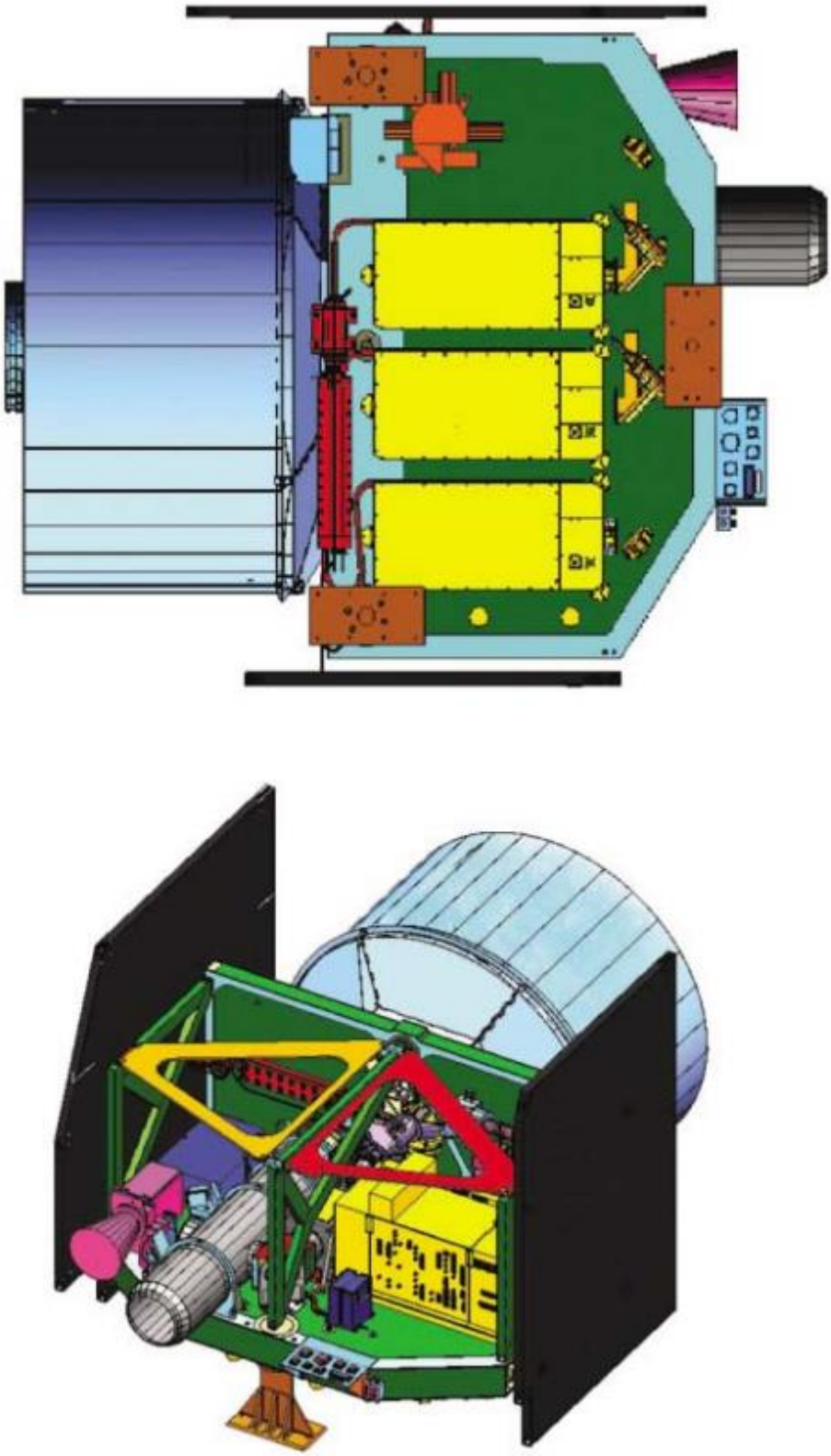
Apesar de sua precisão, o ICESat ainda não é muito utilizado, devido à dificuldade em processar seus dados. Segundo O'Loughlin et al., (2016, p. 4), outra razão é que a maioria dos hidrólogos tendem a pensar em termos de séries temporais de medidas repetidas regularmente, as quais o ICESat não produz. Os dados são irregulares no tempo.

4.1 FUNCIONAMENTO E CAMPANHA

O ICESat utilizou uma altimetria de laser de feixe estreito para determinar as coordenadas geodésicas de uma série de pontos nas calotas polares com precisão vertical da ordem de decímetros (SCHUTZ et al., 2005, p. 1).

O GLAS tem três lasers (chamados de Lasers 1, 2 e 3), montados sobre um banco ótico rígido, com apenas 1 laser operando de cada vez. (ZWALLY et al., 2002, p. 408). Cada laser operou com comprimento de onda de 1064 nm (infravermelho) para detecção de cota da superfície, e um duplicador de frequência criou um feixe simultâneo de 532 nm (verde visível) para detectar nuvens e aerossóis (URBAN et al., 2008, p. 2). A Figura 7 mostra onde estão posicionados os componentes no satélite. No topo do GLAS, três lasers (em amarelo) no banco ótico, o telescópio de 1 metro de diâmetro com sua proteção, tubo de calor (vermelho), radiadores laterais, e embaixo o rastreador do GLAS (rosa), caixas eletrônicas, e o pequeno telescópio (cinza) do sistema de referência estelar.

Figura 7 - esquema do GLAS do ICESat



(fonte: ZWALLY et al., 2002, p. 425)

Segundo Schutz et al. (2005, p. 1), o pulso do laser opera a 40 Hz e o pulso transmitido ilumina um ponto na superfície da Terra com diâmetro de aproximadamente 65 m, exceto quando nuvens espessas obscurecem a superfícies. A medida que o satélite orbita em torno da terra, são obtidos pontos sucessivos separados na superfície terrestre a cada 172m.

O laser 1 foi projetado para começar a emitir (pulsos de radiação) em 20 de fevereiro de 2003. Conforme Abshire (2005, p.1), depois do décimo dia, o Laser 1 mostrou um declínio de energia não usual e mais rápido que o esperado, causando sua falha no dia 38. A falha desse laser resultou numa modificação do plano da operação, para aproximadamente 30 dias de período de operação, 3 vezes ao ano (ABSHIRE, 2005; SCHUTZ et al., 2005).

Segundo Neal et al. (2012, p. 9), o período que o ICESat passa não é distribuído uniformemente ao longo do ano. O satélite operou durante os meses de setembro e outubro de todos os anos entre 2003 e 2009. O período de Fevereiro a Março foi também amostrado entre 2003 e 2009, e o período de Maio foi amostrado apenas em 2004 - 2006. Estes diferentes períodos de observação podem ser suficientes para estudar corpos d'água em diferentes estações do ano (e.g.: cheias, estiagens, vazões médias).

Tabela 1 - Operação dos Lasers/Resumo da campanha até 2005

Laser/ Campanha	**Data de Início**	**Data de Término**	**Repetição da Órbita (dias)**
1	20/02/2003	21/03/2003	8
1[a]	21/03/2003	29/03/2003	8
2a	25/09/2003	04/10/2003	8
2a	04/10/2003	18/11/2003	91/33
2b[b]	19/02/2004	21/03/2004	91/33
2c	18/05/2004	21/06/2004	91/33
3a	03/10/2004	08/11/2004	91/33
3b	17/02/2005	24/03/2005	91/33
3c	20/05/2005	23/06/2005	91/33

(fonte: baseada em SCHUTZ et al., 2005, p.2)

Duas órbitas de referência (ou caminhos) foram usadas pela missão (Tabela 1): uma repetição exata de 8 dias e uma repetição exata de 91 dias (com um subciclo de 33 dias). O intervalo de 8 dias foi adotado para permitir repetições frequentes de calibrações em terra e o intervalo mais longo foi adotado para fornecer uma cobertura mais densa para aplicações científicas (SCHUTZ et al., 2005, p. 2).

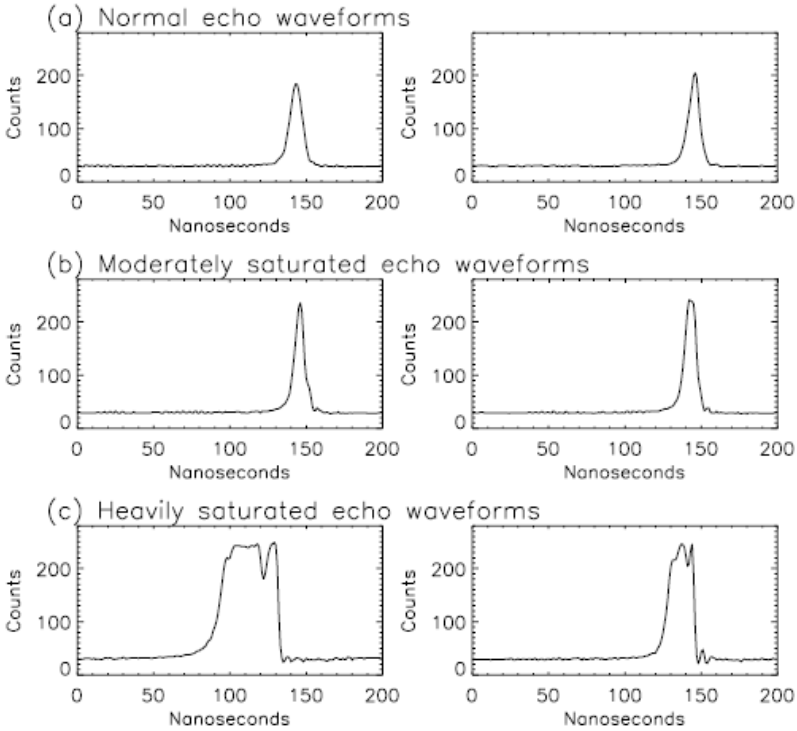
Existem 15 produtos gerados pela missão, numerados de 01 a 15. Por exemplo, o produto GLA13 fornece dados sobre a elevação dos oceanos e a refletância do laser. O conjunto que mais interessa aos hidrólogos é o *Global Land Surface Altimetry Data (HDF5),* Versão 34 (GLA14) (ZWALLY, 2014). HDF5 é a extensão do arquivo, que pode ser lido em programas de cálculo cientifico como o *Matlab*.

Cada observação pode ser composta por múltiplas observações do ICESat da superfície da água do rio em uma localização e instante particulares. O número delas depende da largura do rio e da orientação da trajetória em relação a superfícies d'água. A pegada do satélite de aproximadamente 70 m significa que são esperadas poucas interações com a topografia que circunda o rio (NEAL et al, 2012, p. 9).

Calibrações antes do lançamento foram feitas para determinar a localização de referência para as medidas de distâncias feitas pelo GLAS. A localização física do ponto de referência do GLAS para as medidas é o banco ótico, localizado próximo ao centro do telescópio (SCHUTZ et al., 2005, p. 2).

Quando a energia de retorno excede o alcance de resposta linear do receptor do GLAS, a forma de onda se torna saturada e então distorcida (achatada e alargada, seguida por uma diminuição do sinal abrupta e oscilações). Para minimizar essas ocorrências de **saturação**, o GLAS usa um detector automático de ajuste de ganho. Observações que mudam rapidamente de um pico de energia recebido baixo para alto (devido a transições de baixa para alta refletância, de relevo plano para íngreme, e/ou céu nublado para limpo), podem fazer o ganho ser muito alto, resultando numa saturação de "alto-ganho". Saturações de "baixo-ganho", quando a energia excede o alcance do receptor dinâmico no menor ganho, são raras para paisagens vegetadas (CARABAJAL e HARDING, 2005, p. 2).

Figura 8 - Amostras de onda do ICESat



(fonte: baseada em ZWALLY et al., 2008, p.3)

A Figura 8 mostra amostras de onda sobre gelo do mar: (a) formas de onda normais, sem saturação; (b) formas de onde levemente saturadas; (c) formas de onda profundamente saturadas. Topos planos e pulsos largos indicam formas de onda muito saturadas. São necessários mais estudos para aplicar uma correção na saturação para esse tipo de sinal.

4.2 PRECISÃO

Conforme O'Loughlin et al., (2016, p. 3-4), dependendo da aplicação, a escolha do satélite de altimetria é extremamente importante. A Tabela 2 lista as características dos principais instrumentos de altimetria. Todos os principais instrumentos de altimetria tem pegada entre 1 km e 10 km, os corpos d'água precisam ser de 2 a 3 vezes mais largos que a pegada para a altura d'água ser bem amostrada. A seguir, serão citados vários estudos que estimaram a precisão do satélite.

O conjunto de dados do ICESat pode fornecer detalhes sem precedentes sobre todos os tipos de cobertura: gelo, terra e superfícies d'água, e, mais importante, sua região de interface, graças a sua grande precisão (aproximadamente 3 cm) (URBAN et al., 2008, p. 17; O'LOUGHLIN et al., 2016, p. 5).

Tabela 2 - Comparação das missões de altimetria mais populares para estimativa do nível d'água superficial

Missão	Pegada (m)	Ciclo (dias)	Período	Distância máxima entre traços (km)	Precisão (m)
ICESat	~70	-	2003-2009	30	0.10 (Urban et al., 2008)
TOPEX/Poseidon	~43 400	9.9	1993-2001	315	0.35 (Frappart et al., 2006)
ERS-2	~10 000	35	1995-2003	80	0.55 (Frappart et al., 2006)
Envisat	~18 800	35	2002-2012	80	0.28 (Frappart et al., 2006)
Jason-1	-	10	2002-2008	315	1.07 (Jarihani et al., 2013)
Jason-2	~3 000	10	2008-Presente	315	0.28 (Jarihani et al., 2013)
CryoSat-2	~300	369	2010-Presente	-	0.23 (Song et al., 2015)
SARAL/Altika	~8 000	35	2013-Presente	80	0.11 (Schwatke et al., 2015)

(fonte: baseado em O'LOUGHLIN et al., 2016, p. 4)

Hall et al. (2012, p. 3) compararam os dados do ICESat com medidas de nível dos rios Mississipi e Danúbio. A diferença média para as 85 observações, as quais incluem aquelas que foram corrigidas pela saturação, é 16 mais ou menos 73 cm, com um erro médio absoluto de 54 cm. Quando observações que precisavam de correção na saturação foram excluídas, a diferença média das 32 observações restantes foi de 10 mais ou menos 27 cm, com um erro médio absoluto de 19 cm. A cota medida pelo ICESat foi maior que a da estação de nível na maioria dos casos. É uma possibilidade que algumas incertezas nos resultados sejam devidas a influências de maré.

Antigos estudos de validação mostraram que a medida de altura da água de superfície do instrumento do ICESat tem a melhor precisão vertical (erros médios absolutos de aproximadamente 10 cm para o ICESat, comparado, por exemplo, com 28 cm do Envisat) (O'LOUGHLIN et al., 2016, p. 3).

Grandes diferenças na cota entre a estação e o ICESat (mais de 2 m) podem ser vistas naquelas observações que requerem a aplicação de uma correção de saturação, indicando que a correção é provavelmente não confiável sobre cursos d'água (HALL et al., 2012).

5 METODOLOGIA

Neste capítulo 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:

i) indicando limites de latitude e longitude;

ii) entrando com um polígono dos limites da sua região, desenvolvido previamente num programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG)[1];

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, na sigla 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. A seguir o procedimento utilizado no tratamento dos dados do ICESat.

5.1 TRATAMENTO DOS DADOS

Existem alguns índices (*flags*) que contém informações sobre a observação, como a *elevation-use flag* (i_ElvuseFlg), utilizada para identificar observações adequadas. O índice de saturação foi também usado para remover ou corrigir observações saturadas. Observações com índice 3 ou maior foram removidas. Um índice de 0 ou 1 é adequado para usar sem correção, pois não há saturação ou há um nível sem importância de saturação, respectivamente. Aquelas com índice 2 tiveram correção de saturação aplicada a elas.

1 Geoprocessamento é as técnicas e tecnologias utilizadas no gerenciamento, visualização, cruzamento, manipulação e distribuição de dados e informações geográficas em formato digital. (D'ALGE, 2001). Sistemas de informação geográfica *(GIS*, na sigla em inglês*)*, são os sistemas computacionais usados para a realização do Geoprocessamento. Eles permitem realizar análises complexas ao integrar informações de diversas fontes com dados espacialmente referenciados (DAVIS & CÂMARA, 1991, p. 3).

Figura 9 - Logo do ICESat

Após, é necessário mudar o sistema de referência. Logo, os dados serão convertidos do Elipsoide[2] T/P para o elipsoide do Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS84), e então para o *datum* vertical Modelo Gravitacional da Terra de 1996 (EGM96). O Geoide[3] EGM96 foi escolhido para este estudo devido ao seu uso comum, particularmente em modelagem hidrodinâmica de planícies de grandes rios onde os dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)[4], que também é referenciada ao WGS84 EGM96, são comumente fontes de dados topográficos (HALL, 2012; O'LOUGHLIN, 2016).

Entretanto, apenas com esses critérios de remoção de dados espúrios, ainda restam muitos dados inutilizáveis. É necessário removê-los para retirar o ruído de nuvens, por exemplo, onde sabemos que a diferença entre o terreno e o ICESat é muito elevada. Para tal, um novo critério será utilizado: comparar as medidas do ICESat com o SRTM (mencionado no parágrafo acima). O estudo de Carabajal e Harding (2005, p. 3) mostrou que a diferença entre as observações das duas missões para o pior caso (muita vegetação encobrindo o solo) é de, em média, 21,77 +- 19,44 m (média e desvio padrão). Portanto, no programa desenvolvido neste trabalho, se a diferença for maior do que 50 m, a observação é removida.

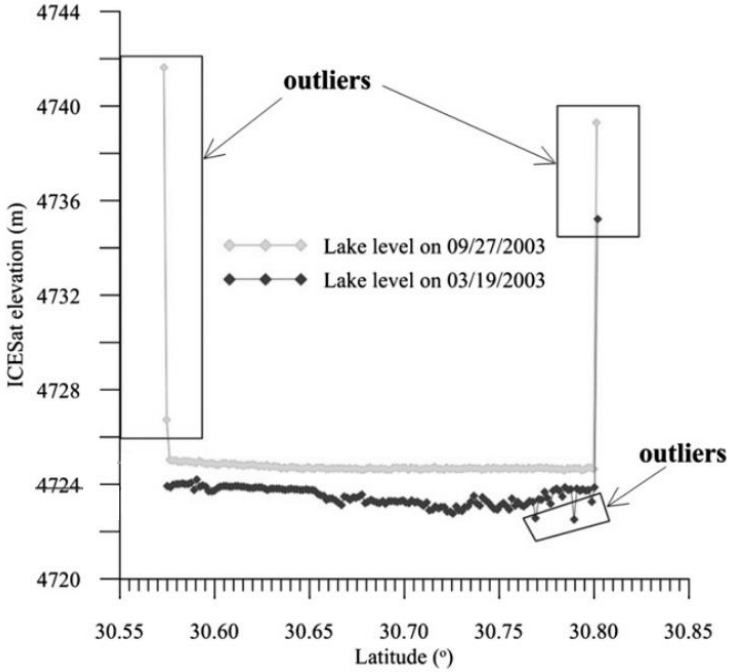
---

2 Como a Terra é ligeiramente achatada nos polos e alargada no equador, a figura geométrica usada na geodesia que mais se aproxima do geoide -a verdadeira figura da Terra- é o elipsoide de revolução. O elipsoide de revolução é uma figura que se pode obter pela rotação de uma elipse pelo seu semieixo menor. (FREITAS e BLITZKOW, 1999)

3 Ainda segundo Freitas e Blitzkow (1999), "O geoide é limitado pela superfície geoidal, entendida até o momento como sendo materializada pela superfície equipotencial melhor ajustada com o nível médio não perturbado dos mares."

4 Farr et al. (2000 e 2007) afirmam que "A SRTM produziu o Modelo Digital de Elevação (MDE) mais completo e com maior resolução da Terra". A missão usou duas antenas para obter dados de interferometria por radar, processados para dados de topografia digital com resolução de 1 arco de segundo (aproximadamente 30 m).

Figura 10 - Remoção de valores atípicos



(fonte: baseado em ZHANG et al., 2011a, p. 1735)

Zhang et al (2011a, p. 1734) ainda utilizaram mais duas maneiras para remover valores atípicos. A primeira é simplesmente uma inspeção visual de cada perfil de elevação do ICESat para remover aquelas observações que estão obviamente em desacordo com as outras. O segundo passo é calcular o desvio padrão das restantes e remover os pontos que causam um valor anormalmente alto de desvio. Na seção 4.2 – precisão, mostrou-se que, geralmente, um valor normal de desvio é da ordem de 10 +- 30 cm. Na figura 10 é possível visualizar os valores atípicos removidos visualmente e os removidos pelo desvio.

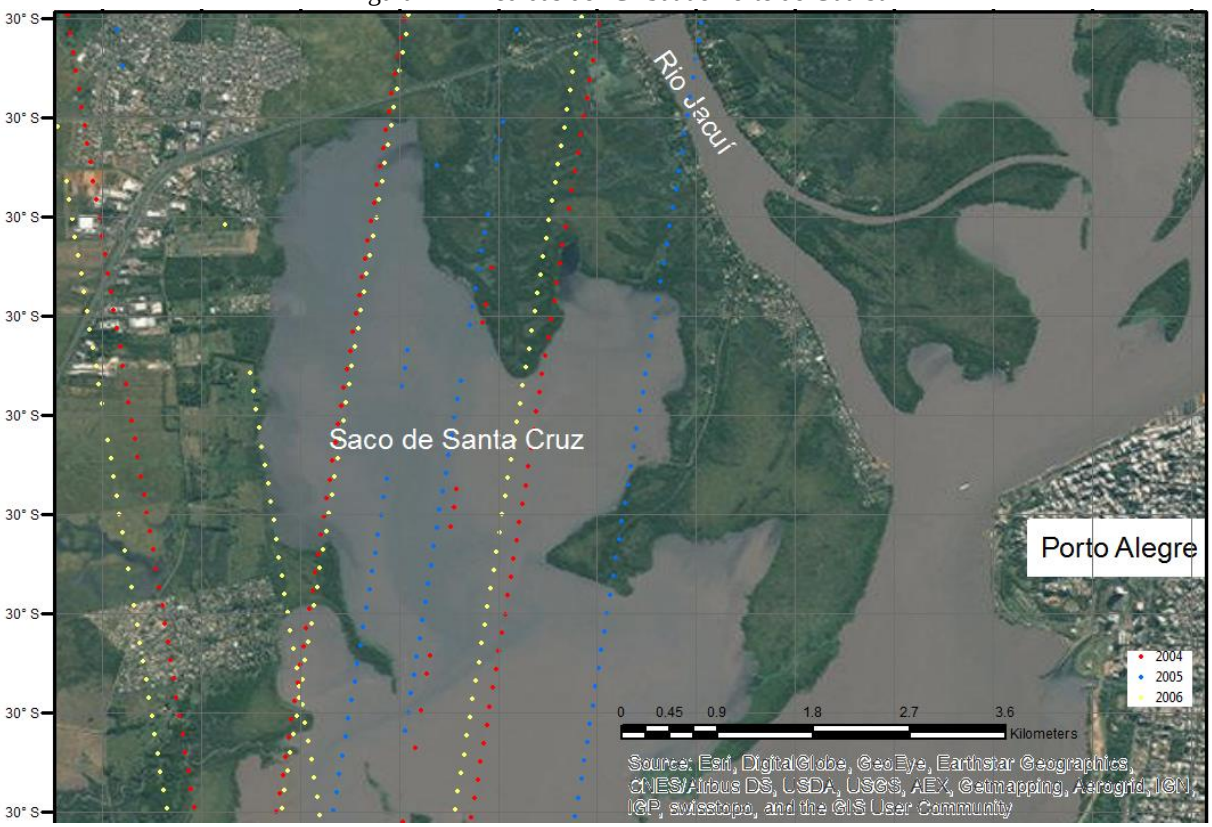
A inspeção visual não será utilizada no presente estudo, pois o critério de comparação com o SRTM já elimina aqueles valores atípicos. Porém, a remoção de valores que causam um desvio padrão alto será empregada.

5.2 A REGIÃO DE ESTUDO

Obviamente, é necessário que o satélite tenha passado sobre o corpo d'água. Então, o primeiro passo é extrair os dados e colocá-los sobre uma imagem georreferenciada (por exemplo, do Landsat), ou mesmo comparar os dados com o Modelo Digital de Elevação (MDE) do SRTM, e verificar qual a distribuição espacial dos pontos. Pode-se fazer isso com o auxílio de um

programa SIG. Faz-se o descrito acima somente com os pontos utilizáveis, segundo os critérios descritos em 4.3 – Tratamento dos dados. Se não houver medidas suficientes do nível d'água, torna-se inviável estudar aquela região. Na figura 11 é possível visualizar que o ICESat passa pela região norte do Guaíba, tornando possível estudar o nível d'água ali.

Figura 11 - Medidas do ICESat ao norte do Guaíba



(fonte: elaborado pelo autor)

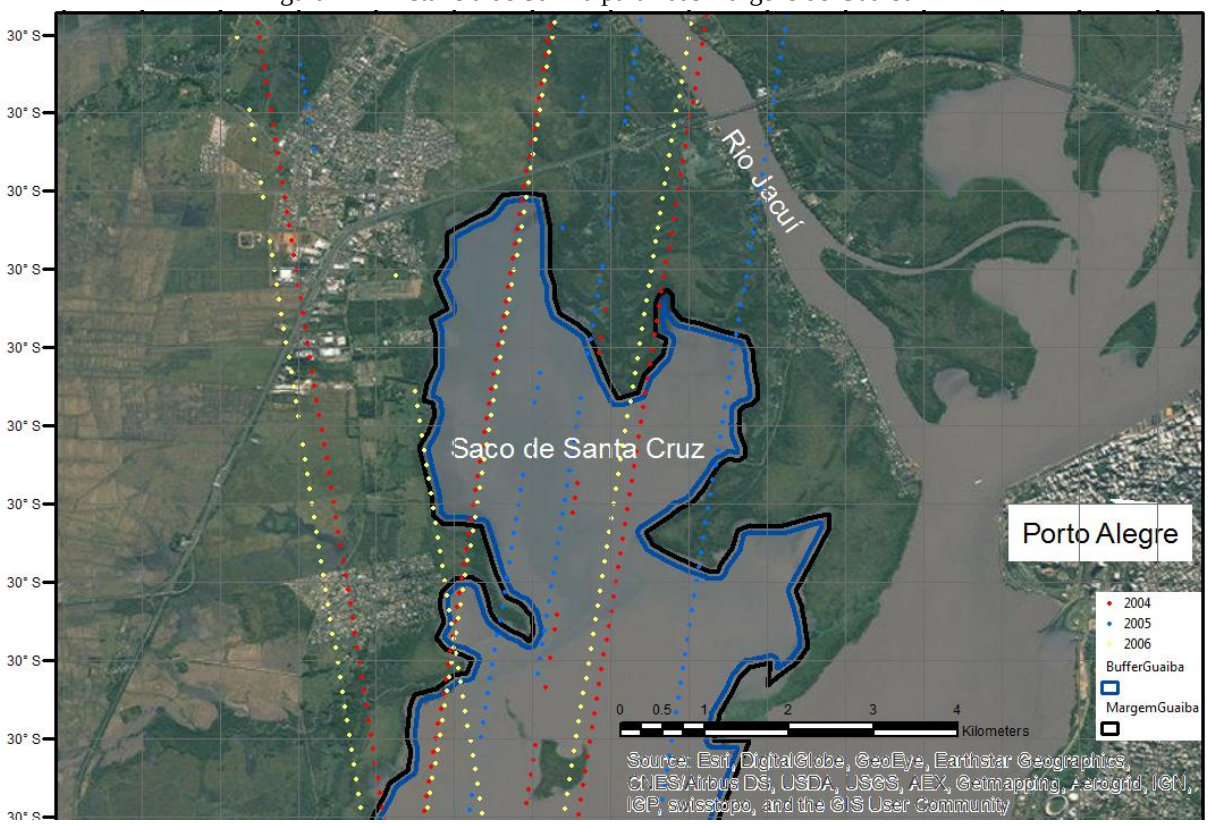
Como se vê na imagem, há certas irregularidades na distância entre pontos sucessivos. Isso se deve à falha do Laser 1, descrito no 4º parágrafo do item 4.1 deste estudo, e a remoção de dados inutilizáveis, descrita no item 4.3 - Tratamento dos dados. Além disso, os traços sucessivos da missão podem não se sobrepor perfeitamente. Cada passada não se refere à mesma posição no corpo de água, logo as medidas de nível também não, sendo ainda influenciadas pela declividade. Silva (2010, p. 85) descreveu esse fenômeno para a altimetria de radar, entretanto ele se aplica também à altimetria à laser. A autora ainda sugere como resolver: “Esse efeito é corrigido empiricamente, incorporando o valor da declividade e corrigindo-a para cada diferença de altura entre a posição média da passagem e a posição retida [...]”. Para regiões planas, a declividade é muito baixa (por exemplo, menor do que 10

cm/km na maior parte do Guaíba), então essa correção torna-se insignificante. Em regiões montanhosas, pode ser importante e deve ser avaliada.

Após, define-se que pontos serão utilizados para realizar as aplicações já descritas. O'Loughlin et al. (2013, p. 5063-5064) optaram por não utilizar qualquer ponto a 65 m da margem do corpo d'água. A área do rio foi extraída com base na máscara de água criada a partir de imagens do satélite Landsat. Estes 65 m incluem 30 m da resolução da máscara d'água e 35 m do raio da pegada do ICESat. Diferentemente, Hall et al., (2012, p. 2) usaram 80 m da margem. Os mesmos 35 m do raio da pegada e os 30 m da resolução do Landsat. Entretanto, somaram ainda 2.4 +- 7.3 m de erros de geolocalização do ICESat, com base no trabalho de Carabajal and Harding (2005, p. 2). O critério utilizado aqui será o de Hall, uma distância de 80 m das margens, por ser mais completo e conservador.

Na prática, o polígono distante das margens será feito da seguinte maneira: desenhar-se-ão as margens do corpo d'água, manualmente, com o auxílio de um programa SIG. Após, com o auxílio das ferramentas já embutidas no programa SIG, delimita-se a distância de 80 m a partir das margens já desenhadas. A Figura 12 ilustra este procedimento.

Figura 12 - Distância de 80 m a partir das margens do Guaíba



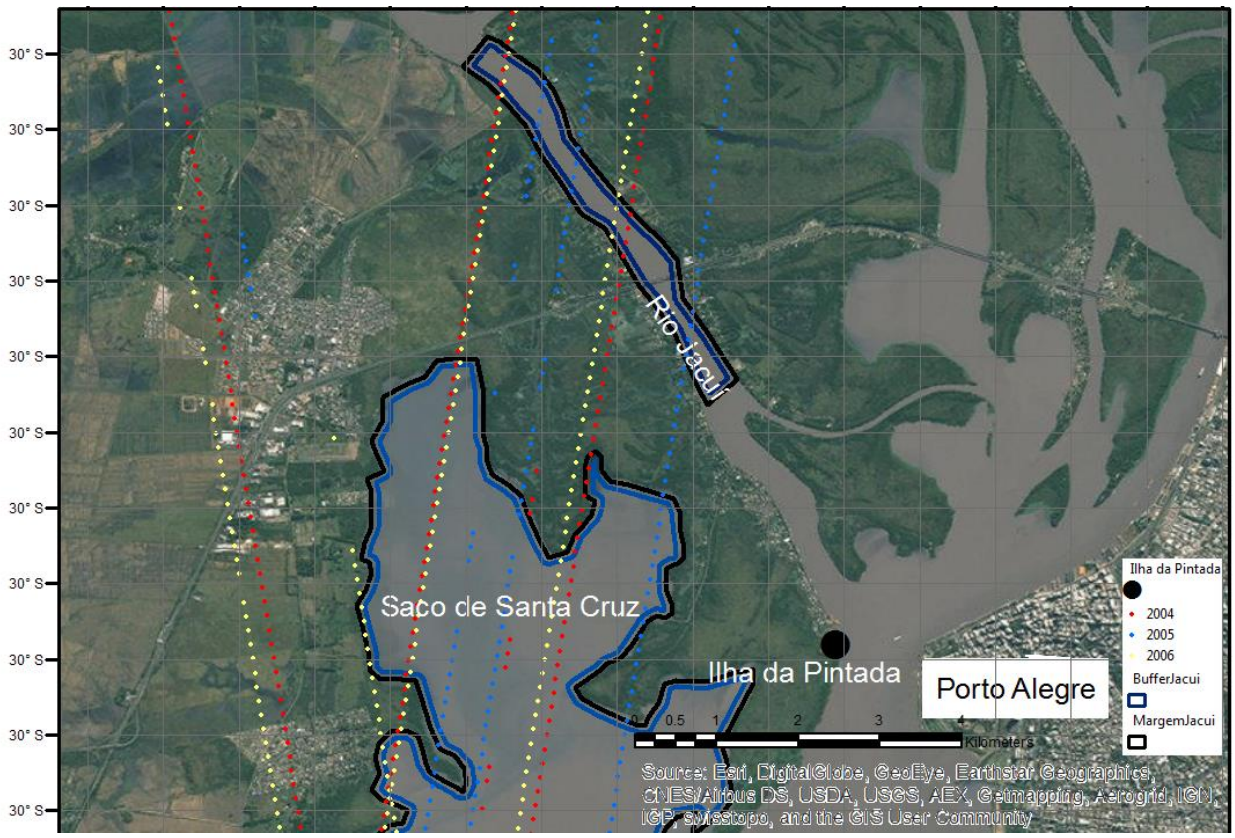
Finalmente, somente com as observações dentro da área de estudo, é possível começar a aplicar os dados.

5.3 ESTAÇÕES VIRTUAIS

Seguem duas definições do conceito: (i) “Lugares onde a pegada do radar do satélite atravessou o corpo d'água” (LEON et al., 2005, p. 2) e (ii) “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” (SILVA, 2010, p. 97). Apesar dos autores referirem-se à altimetria por radar, a ideia é aplicável em sua plenitude também à altimetria a laser.

Então, após toda a retirada de observações espúrias e aplicação do polígono distante das margens, conforme mostrado anteriormente, serão identificadas as possíveis estações virtuais da região de estudo. Finalmente, serão obtidas séries temporais do nível d'água naquela localização. A Figura 13 mostra uma estação virtual logo ao norte do Guaíba, no rio Jacuí. A estação compreende toda a região interna ao polígono distante da margem.

Figura 13 - Estação Virtual no Rio Jacuí



Silva (2010, p. 98) descreve minuciosamente em sua tese o procedimento para a criação das estações virtuais através do programa VALS (*Virtual Altimetry Station*). Ele foi validado por Roux et al. (2010, p. 114-119). Os passos serão brevemente expostos a seguir:

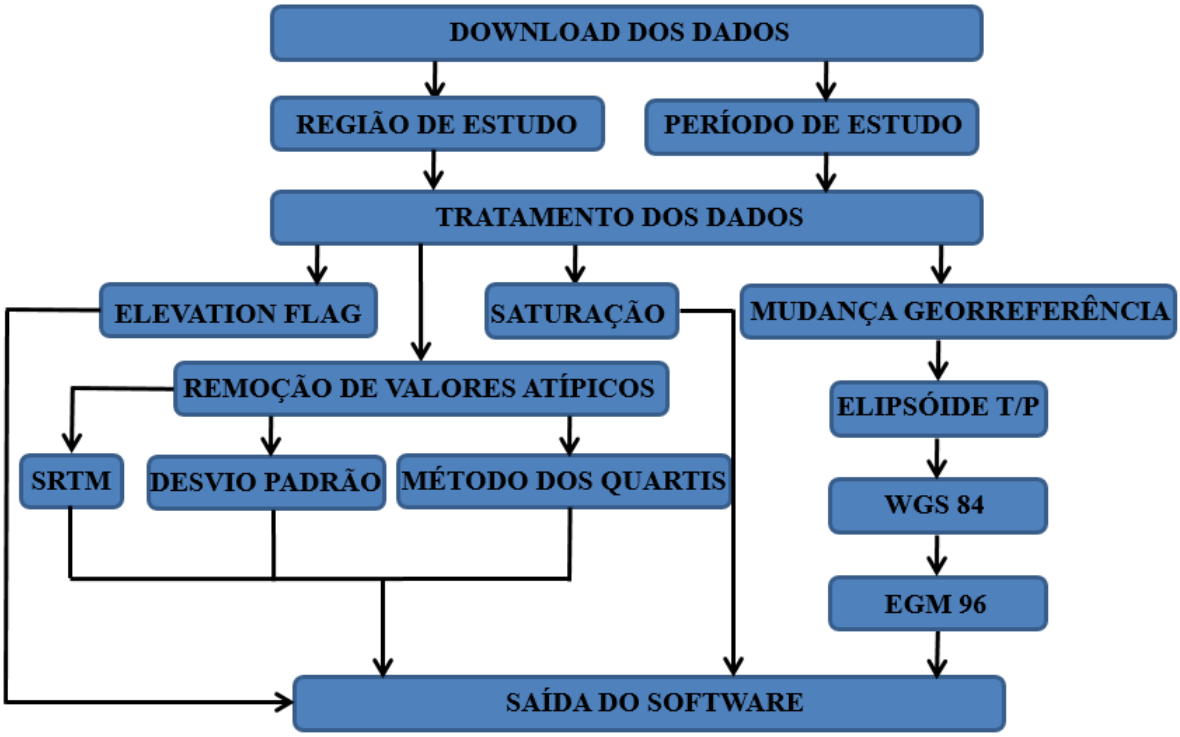
a) plotar os dados sobre uma imagem georreferenciada (procedimento já descrito no início deste capítulo);
b) visualizar, noutra janela, o perfil hidrológico altimétrico para selecionar os dados e eliminar valores atípicos (neste trabalho os critérios utilizados para a remoção já foram explicados);
c) finalmente, "para cada passagem do satélite estimar as séries temporais de altura do nível d'água, calculando-se a média e a mediana para cada ciclo."

Além da média e da mediana, optou-se por calcular o desvio padrão da série, e utilizá-lo para identificar valores atípicos. Para eliminá-los, avalia-se cada ponto, verificando se é mais provável que pertença à população de pontos ou se é de fato um valor atípico. Considerando-se que os pontos seguem a distribuição normal, então 95% dos pontos estão no intervalo media +-1.96 desvio padrão. Isso quer dizer que um ponto fora desse intervalo tem apenas 5% de probabilidade de fazer parte da população. Ou seja, 95% de probabilidade de ser de fato um valor atípico. Assim, excluir-se-ão todos esses pontos que estão muito longe da média.

Também será utilizado o método dos quartis (HIMMELBLAU, 1970), que que consiste em analisar o quão distantes estão os extremos da sua base de dados (mínimo e máximo) do 1º e do 3º quartil (Q1 e Q3, respectivamente). Basicamente, um ponto é considerado um dado espúrio, e deve ser removido da base de dados, se ele está 1,5 vezes a amplitude interquartil (IEQ = Q3 – Q1) distante do Q1 ou Q3.

O fluxograma a seguir (figura 14) ilustra todos os passos realizados no programa.

Figura 14 - Fluxograma do funcionamento do programa



5.4 ESTUDOS DE CASO

Observações de níveis d'água podem ser utilizados para inúmeras aplicações em hidrologia. Nem todas essas aplicações serão realizadas, entretanto estão aqui descritas para mostrar o potencial do satélite, e possível realização de estudos futuros.

a) criar "estações virtuais", locais onde o satélite passa sobre um corpo d'água, será observado sistematicamente o nível naquele ponto;

b) monitorar sistemas de lagos

c) traçar um perfil longitudinal do terreno e corpos d'água;

d) estimar a declividade da linha d'água de corpos hídricos;

e) monitorar várzeas de inundação.

5.4.1 Validação através de estação da ANA

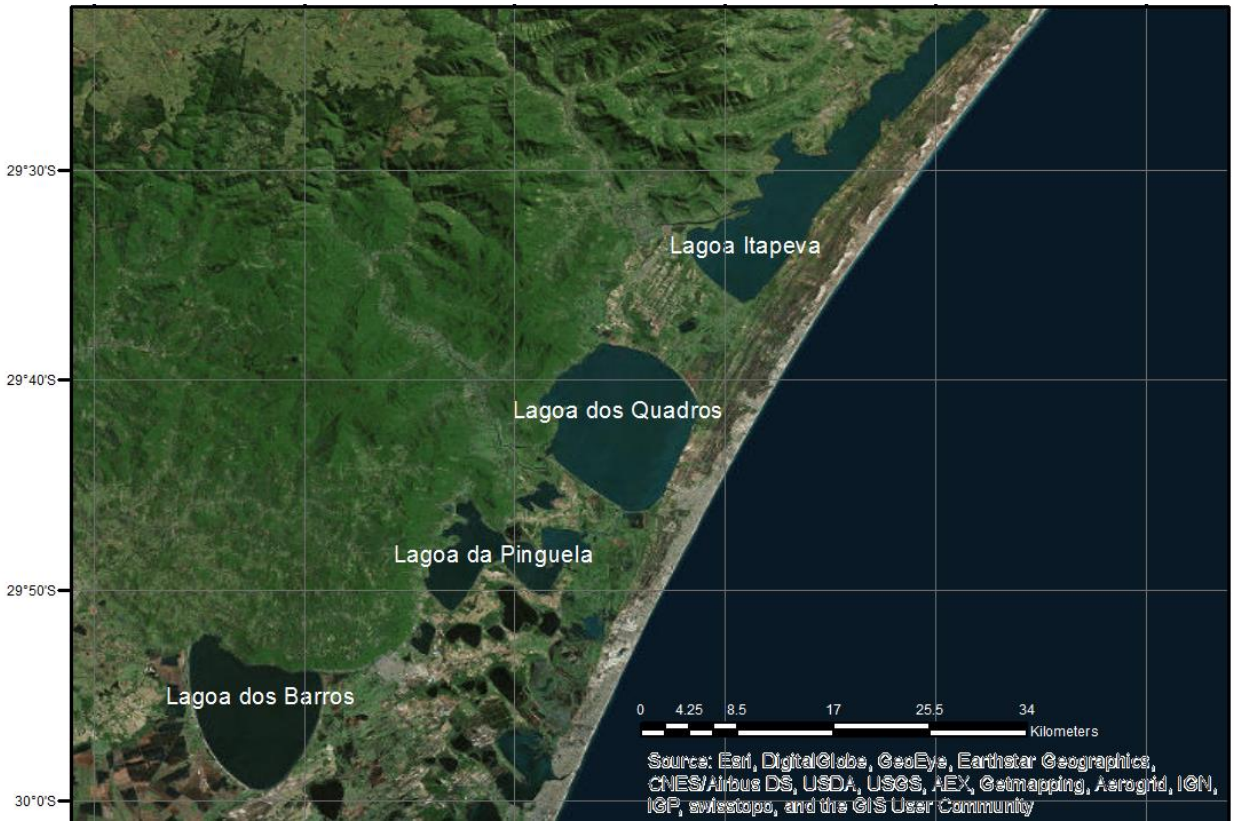
Em princípio, os dados de altimetria necessitam de validações para avaliação de sua acurácia. Para tal, a séries temporais obtidas serão comparadas com as medidas de nível de estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Utilizou-se, novamente, o mesmo critério de Silva (2010, p. 101): considerou-se que a estação fluviométrica está abaixo do

traço do satélite, quando a menos de 2 km do mesmo, e que entre o traço do satélite e a posição da estação da ANA não existem mudanças hidrológicas evidentes. A escolha da observação de nível da ANA utilizada durante a comparação foi feita com base em Hall et al. (2012, p. 2), que sugerem utilizar a medida mais próxima no tempo da passagem do ICESat. Na Figura 13 vê-se a estação fluviométrica chamada Ilha da Pintada, a mais próxima à estação virtual do ICESat do Rio Jacuí, na região utilizada como exemplo.

5.4.2 Sistemas de lagos

Foram utilizadas estações virtuais dentro de cada lago para realizar o monitoramento. Zhang et al. (2011a, 2011b, 2012, 2013), 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. A área dos lagos foi extraída do estudo de Ma et al.(2010), e o volume calculado com base nestas duas informações (nível e área). Com isso, eles podem estimar qual a taxa de variação das grandezas mencionadas, o balanço de armazenamento de água nos lagos, e observaram que há uma forte relação entre a variação de nível d'água e do volume medidos. A figura 15 mostra um exemplo de sistema de lagoas no Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul que poderia ser estudado com o uso de altimetria por satélite.

Figura 15 - Lagoas do Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul

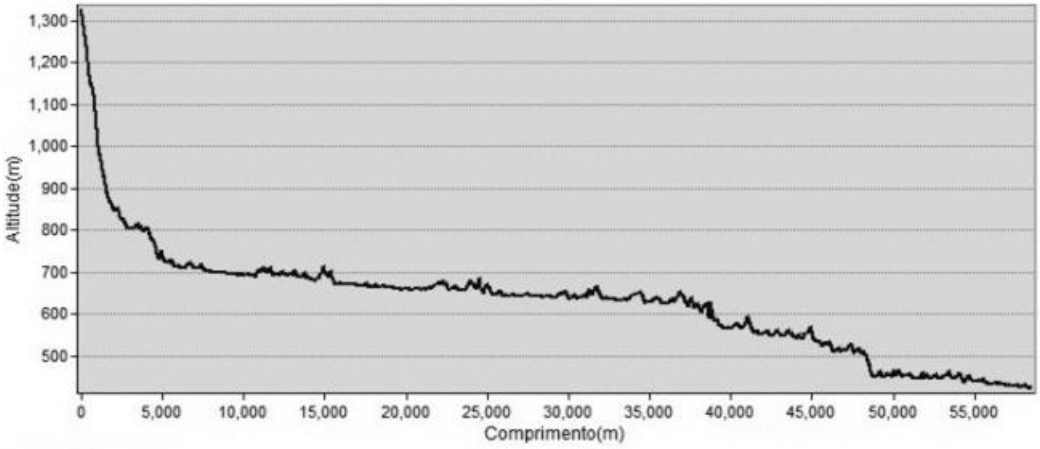


Este estudo limitou-se a observar somente a variação de **nível** dos lagos, se a altura d'água está aumentando ou diminuindo, e qual a taxa e amplitude de variação. E também, para sistemas de lagos, como a variação de nível de um se relaciona com a do outro. Assim, se espera obter conclusões sobre como é a interação entre eles. Uma hipótese: quando o nível da Lagoa da Pinguela aumenta, o que ocorre na Lagoa dos Quadros? Elas são independentes ou dependentes? No segundo caso, qual tem maior nível, indicando a água flui desta para a outra? Pode ser o contrário? Ou não há relação alguma? Estas são as perguntas que poderiam ser respondidas.

5.4.3 Perfil Longitudinal

"O ICESat tem a capacidade de determinar o nível d'água [...], mas em uma região plana, regular e seca, ele pode ser também utilizado para medir a topografia vertical, da qual pode derivar-se um "pseudo" MDE através de interpolação em duas dimensões" (CRÉTAUX et al., 2007, p. 1). Ou seja, para traçar o perfil longitudinal do terreno, basta extrair um dos traços do satélite, para determinado dia, e fazer um gráfico no qual o eixo X corresponde a distância (em graus, ou metros) e o eixo Y à altura do terreno (ou da água). Com isso, tem-se a informação de como varia a topografia ao longo da intersecção da reta de passagem do satélite com o solo. Na situação improvável de um rio retilíneo passando exatamente sob o traço do satélite, seria possível identificar seu perfil longitudinal, como mostrado na figura 16.

Figura 16 - Perfil topográfico do talvegue do Rio do Carmo



(fonte: FARIA et al., 2012)

5.4.4 Declividade da linha d'água

O'Loughlin et al. (2013, p. 5060-5061) publicaram um artigo com 4 objetivos principais, e o último deles é "produzir um perfil detalhado de declividade da superfície da água do trecho médio do Congo usando os dados do ICESat." Resumidamente, o autor determinou a declividade da linha d'água para 3 períodos do ano, centrados nos meses de Março, Junho e Novembro, correspondendo à recessão da onda de cheia, ao período de vazões baixas e à ascensão da onda de cheia. Para isso, ele classificou os dados de maneira similar à já descrita aqui, e obteve a média para cada localização/tempo de observação, totalizando 280 valores. Então, dividiu-as por data e local e, se as observações estavam no máximo 2 dias uma da outra, e a segunda a jusante da primeira, a declividade foi calculada para esse par. Concluiu-se que a declividade varia muito no espaço, e relativamente pouco no tempo. Este estudo não será realizado nesta pesquisa, entretanto é uma sugestão para trabalhos futuros.

5.4.5 Várzeas de inundação

Existem muitas áreas onde o fluxo temporal e espacial de água na planície de inundação é pouco entendido, como, por exemplo, na Amazônia. Há poucas estações fluviométricas, todas situadas no canal principal, tornando difícil o entendimento da dinâmica de fluxo da várzea de inundação (HALL, 2013, p.1). Trigg et al. (2013, p. 1) afirma:

> Geralmente, os canais dominam o fluxo durante o período inicial de ascensão da onda de cheia e durante a recessão. A vazão difusiva de extravasamento é então adicionada ao fluxo canalizado e domina a inundação na fase média da ascensão, nas águas altas (fase de cheias) e durante o início da recessão. Entretanto, essa simples visão da interação entre o canal principal e a várzea não explica por si só a heterogeneidade complexa que é observada em muitas características das planícies de inundação, como os níveis d'água e a morfologia do canal na inundação.

Como já mencionado, pode-se utilizar o ICESat para medir o nível no canal principal e na planície de inundação. Hall (2013, p.1) e Trigg et al. (2013, p. 1) fizeram isso para a Amazônia, ambos com auxílio do Landsat para observar as variações temporais e espaciais de nível d'água na várzea, e interpretar a dinâmica de fluxo. O ICESat forneceu detalhes sem precedentes desses fluxos em uma parte especifica da Amazônia, contribuindo para o avanço no conhecimento dos processos em grandes planícies de inundação. Além disso, Schumman et al. (2013, p. 6253) usaram as medidas de nível do ICESat para calibrar seu programa que modela inundações, mostrando uma concordância aceitável com as imagens do Landsat.

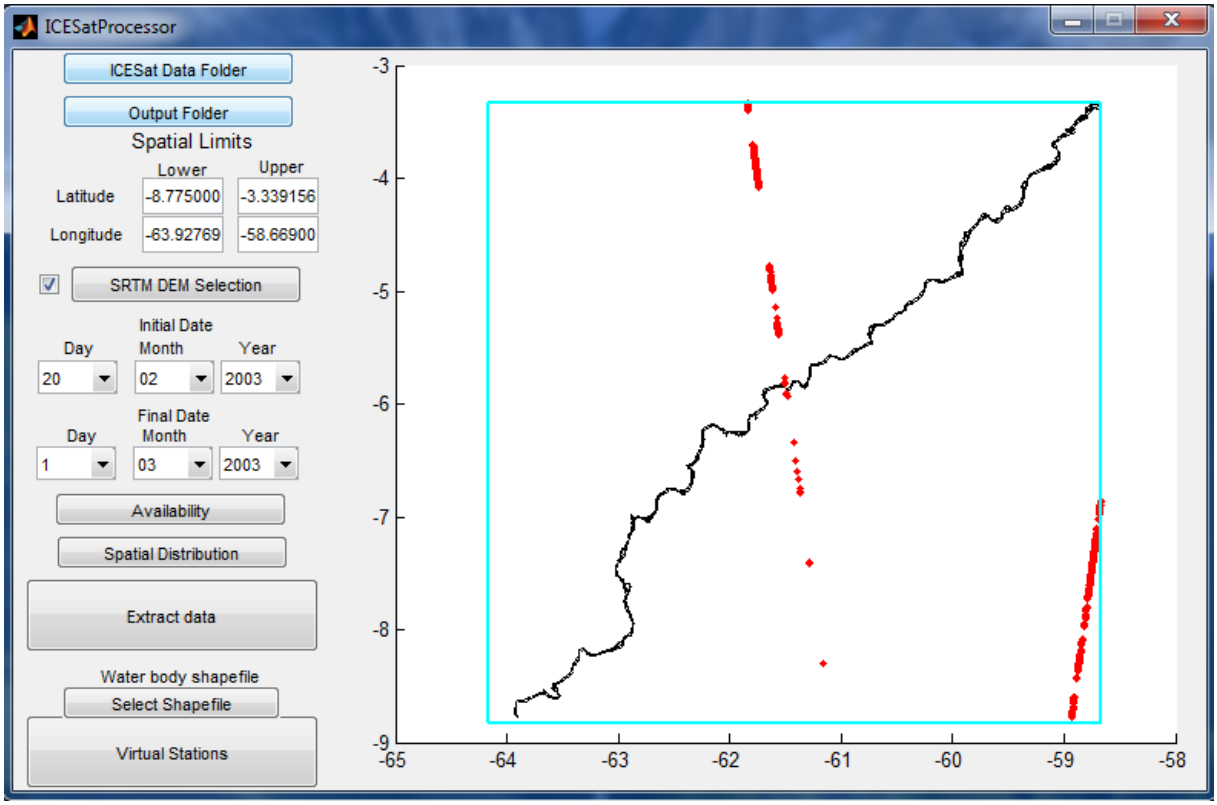
6 RESULTADOS

Primeiramente será mostrada a interface do programa de processamento de dados do ICESat e os arquivos de saída e, após, sua validação e as aplicações realizadas através dele.

6.1 ICESAT PROCESSOR

O programa foi assim denominado pois, além de extrair os dados e tratá-los, ele os processa e realiza aplicações. A interface foi toda escrita em inglês, para possibilitar o uso internacional. Ela realiza as operações descritas em 4.3.1, de maneira intuitiva e simples. Na figura 17, o quadrado azul claro é o limite da quadrícula do MDE da SRTM; os traços vermelhos, as passagens do ICESat para alguns dias; e os limites em preto, a delimitação do Rio Madeira.

Figura 17 - Interface do Programa

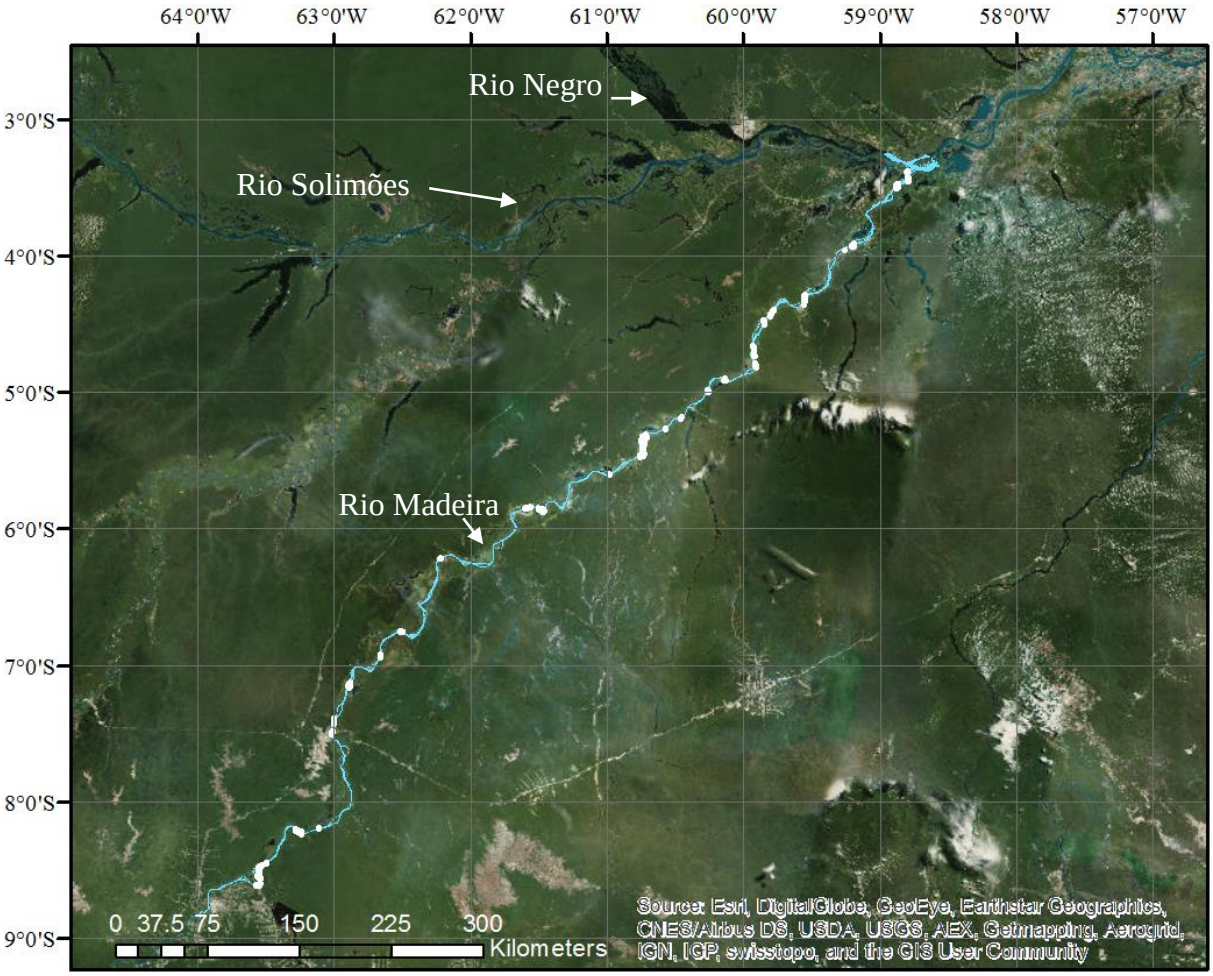


(fonte: elaborado pelo autor)

Com a ferramenta concluída foram realizados testes buscando aferir tanto a qualidade dos resultados quanto o tempo total de processamento. Tais rodagens foram feitas em um desktop com 6 GB de memória RAM, processador Intel(R) Xeon(R) W3520 de 2.6 GHz com sistema operacional de 64 Bits.

Esses testes foram realizados para a região do Rio Madeira, com aproximadamente 5,4º de latitude de extensão, e 5,3º de longitude, já mostrado na Figura 18 - Interface do Programa. Abaixo é possível visualizar uma imagem de satélite do curso d'água na Figura 18, colorido artificialmente em azul claro para melhor identificação, e as passagens do ICESat sobre ele (todo o período do satélite) representadas sob a forma de pontos brancos.

Figura 18 - Imagem de satélite do Rio Madeira



(fonte: *basemap* do ARCGIS)

Os tempos de processamento obtidos para a referida região na máquina já descrita foram os seguintes, para cada função da interface:

a) Availability - 5 s;

b) Spatial Distribution - 210 s;

c) Extract Data - 150 s;

d) Virtual Stations - 240 s.

A seleção do MDE (opcional), demorou 31.17 segundos. Os seguintes passos demoram centésimos de segundo para serem executados: ICESat Data Folder, Output Folder, Definição de Latitude e Longitude, *Select Shapefile*. O programa é considerado relativamente rápido.

A saída do programa é alguns arquivos de texto, conforme o botão selecionado. São eles:

6.1.1 Spatial Distribution

Nessa opção o pesquisador pode visualizar as órbitas do satélite sobre a região de interesse. Os dados não são tratados, apenas são extraídos para aquela área, para que se possa saber se é possível estudar os níveis naquela região. A Tabela 3 mostra um exemplo do arquivo de texto gerado nesta etapa, chamado *Raw Data* (Dados Brutos). As colunas mostram, da esquerda para a direita: longitude; latitude; elevação; ano; mês e dia.

Tabela 3 - Arquivo de Saída do Spatial Distribution

1	-49.845273	-29.369988	1486.952	2003	3	2
2	-49.845721	-29.373104	1465.474	2003	3	2
3	-49.845955	-29.374666	1412.691	2003	3	2
4	-49.846198	-29.376223	1441.214	2003	3	2
5	-49.846449	-29.377780	1457.491	2003	3	2
6	-49.851188	-29.404098	1498.832	2003	3	2
7	-49.851424	-29.405648	1514.317	2003	3	2
8	-49.851649	-29.407196	1458.996	2003	3	2
9	-49.851866	-29.408739	1446.168	2003	3	2
10	-49.852077	-29.410282	1417.549	2003	3	2
11	-49.852282	-29.411821	1447.399	2003	3	2
12	-49.852481	-29.413362	1440.100	2003	3	2
13	-49.852678	-29.414907	1370.929	2003	3	2
14	-49.858213	-29.449091	1347.724	2003	3	2
15	-49.858500	-29.450639	1425.103	2003	3	2
16	-49.858780	-29.452194	1320.738	2003	3	2

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.2 Extract Data

Aqui, o programa ICESatProcessor trata os dados, conforme descrito no item 4.3. As saídas são três arquivos de texto: *READ-ME; Results; e ICESat and SRTM*. Está escrito em inglês para facilitar a difusão por todo o mundo. Na figura 21 visualiza-se o arquivo *READ-ME*. Ele mostra os dias em que o satélite passou sobre a região de interesse, quantas observações ("pontos") haviam na área, quantos foram excluídos com base na *elevation flag* e quantos foram removidos com base na *saturation flag*.

Figura 19 - Arquivo de saída READ-ME

```
55      8/3/2003 19
56        There are no data for this day in the region
57
58      9/3/2003 20
59        There are no data for this day in the region
60
61     10/3/2003 21
62       Data found in the region
63
64 Number of observations inside the area, number of excluded observations by the elevation
   flag criteria, and number of excluded observations by the saturation flag criteria,
   respectively:          236   118     0
65
66
67
68  Data found in the shapefile"s polygon number  1
69
70  There are no data for this day in the shapefile"s polygon number  2
71
72     11/3/2003 22
73        There are no data for this day in the region
74
75     12/3/2003 23
76        There are no data for this day in the region
77
78     13/3/2003 24
79        There are no data for this day in the region
80
```

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Tabela 4 vê-se o arquivo *Results*. As colunas mostram, da esquerda para a direita: longitude; latitude; elevação; ano; mês e dia. Já na Tabela 5, um exemplo de arquivo de saída do tipo *ICESat and SRTM*. As colunas mostram, da esquerda para a direita: longitude; latitude; elevação do ICESat; elevação do SRTM; elevação utilizada; ano; mês e dia.

Tabela 4 - Arquivo de saída Results

-49.851188	-29.404098	1498.827	2003	3	2
-49.851424	-29.405648	1514.312	2003	3	2
-49.851649	-29.407196	1458.991	2003	3	2
-49.851866	-29.408739	1446.163	2003	3	2
-49.852077	-29.410282	1417.544	2003	3	2
-49.852282	-29.411821	1447.394	2003	3	2
-49.852481	-29.413362	1440.472	2003	3	2
-49.852678	-29.414907	1371.538	2003	3	2
-49.865671	-29.497158	1280.127	2003	3	2
-49.867139	-29.504880	1287.204	2003	3	2
-49.868900	-29.515680	1259.828	2003	3	2
-49.880018	-29.588536	1250.500	2003	3	2
-49.880252	-29.590101	1255.388	2003	3	2
-49.880493	-29.591664	1261.415	2003	3	2
-49.880743	-29.593218	1297.793	2003	3	2
-49.881000	-29.594771	1265.847	2003	3	2
-49.881265	-29.596300	1608.284	2003	3	2
-49.881535	-29.597846	1628.431	2003	3	2
-49.883852	-29.610248	1653.229	2003	3	2
-49.884139	-29.611803	1717.477	2003	3	2

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 5 - Arquivo de Saída ICESat and SRTM

-62.752900	-8.062126	88.527	85.000	88.527	2003	10	18
-62.753115	-8.060569	93.069	90.000	93.069	2003	10	18
-62.753329	-8.059012	93.856	93.000	93.856	2003	10	18
-62.753543	-8.057455	93.905	92.000	93.905	2003	10	18
-62.753756	-8.055900	94.023	92.000	94.023	2003	10	18
-62.753970	-8.054346	90.312	90.000	90.312	2003	10	18
-62.754183	-8.052793	86.315	85.000	86.315	2003	10	18
-62.754396	-8.051239	80.890	80.000	80.890	2003	10	18
-62.754609	-8.049683	77.963	81.000	77.963	2003	10	18
-62.754823	-8.048127	94.123	93.000	94.123	2003	10	18
-62.755036	-8.046569	94.022	93.000	94.022	2003	10	18
-62.755463	-8.043451	89.959	92.000	89.959	2003	10	18
-62.755677	-8.041890	55.726	74.000	55.726	2003	10	18
-62.755890	-8.040331	45.317	52.000	45.317	2003	10	18
-62.756104	-8.038773	63.900	69.000	63.900	2003	10	18
-62.756317	-8.037216	85.914	79.000	85.914	2003	10	18
-62.756530	-8.035660	95.718	92.000	95.718	2003	10	18
-62.756955	-8.032547	94.217	92.000	94.217	2003	10	18
-62.757167	-8.030990	92.097	93.000	92.097	2003	10	18
-62.757380	-8.029432	94.467	94.000	94.467	2003	10	18
-62.757593	-8.027874	97.404	96.000	97.404	2003	10	18

(fonte: elaborado pelo autor)

6.1.3 Virtual Stations

Semelhante ao *Extract Data*, além de tratar os dados e gerar o arquivo de texto *READ-ME*, há mais dois documentos de texto, *ResultsShapefile* e *Virtual Stations* (Tabela 6). O primeiro é igual ao *Results*, entretanto somente com as observações no interior do polígono. O segundo é feito conforme a seção estações virtuais. Possui cabeçalho, para facilitar a obtenção de séries temporais e análise em programas como excel, matlab, ou como o usuário preferir. As colunas mostram, da esquerda para a direita: média das elevações; mediana; desvio padrão; longitude; latitude; ano; mês; dia; número de pontos utilizados; e índice do polígono da estação.

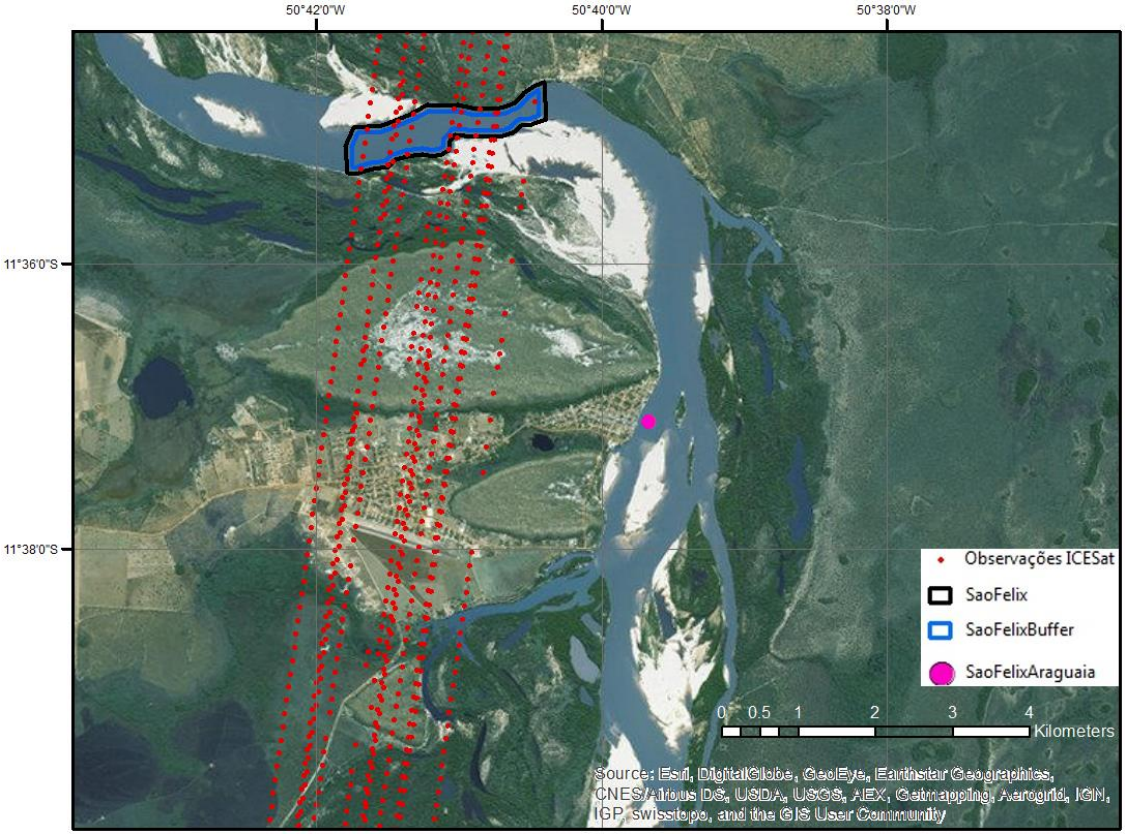
Tabela 6 - Arquivo de Saída Virtual Stations

	Mean	Median	Std	Longitude	Latitude	yyyy	mm	dd	Points	Polygon
1	1.474	1.518	0.098	-49.865117	-29.437988	2003	3	10	16	1
2	1.504	1.504	0.023	-49.861256	-29.438759	2003	3	18	17	1
3	232.029	231.502	18.920	-49.868833	-29.445264	2003	10	4	4	1
4	0.861	0.857	0.014	-50.035259	-29.698084	2004	10	11	6	2
5	-0.148	-0.133	0.104	-50.045303	-29.670215	2005	2	26	7	2
6	0.608	0.549	0.310	-50.040965	-29.683621	2005	5	27	29	2
7	0.890	0.912	0.095	-50.040847	-29.689023	2006	3	1	35	2
8	0.309	0.287	0.153	-50.050188	-29.694195	2006	11	1	4	2
9	1.738	1.738	0.100	-50.041591	-29.713563	2007	3	19	2	2
10	1.429	1.387	0.098	-50.040866	-29.687209	2007	10	9	5	2
11	0.776	0.766	0.120	-50.039074	-29.681129	2008	2	24	24	2
12	1.485	1.473	0.074	-50.047864	-29.686724	2009	3	16	21	2

6.2 VALIDAÇÃO

A validação dos dados do ICESat foi feita através de uma comparação dos níveis d'água obtidos pelo satélite com as estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). Na figura 20, a estação de São Felix do Araguaia (lat. -11.618º, long. -50.661º). Para tal, foi preciso criar "estações virtuais", conforme descrito em 5.1. Foi identificado um local sobre o Rio Araguaia, próximo à estação da ANA, e desenhadas as margens do Rio (em preto na imagem). Após, aplica-se um polígono distante 80 m das margens (em azul), A média dos pontos dentro deste polígono, em cada passagem, é o nível.

Figura 20 - Estação Virtual e a Estação da ANA (lat. -11.618º, long. -50.661º) no Rio Araguaia

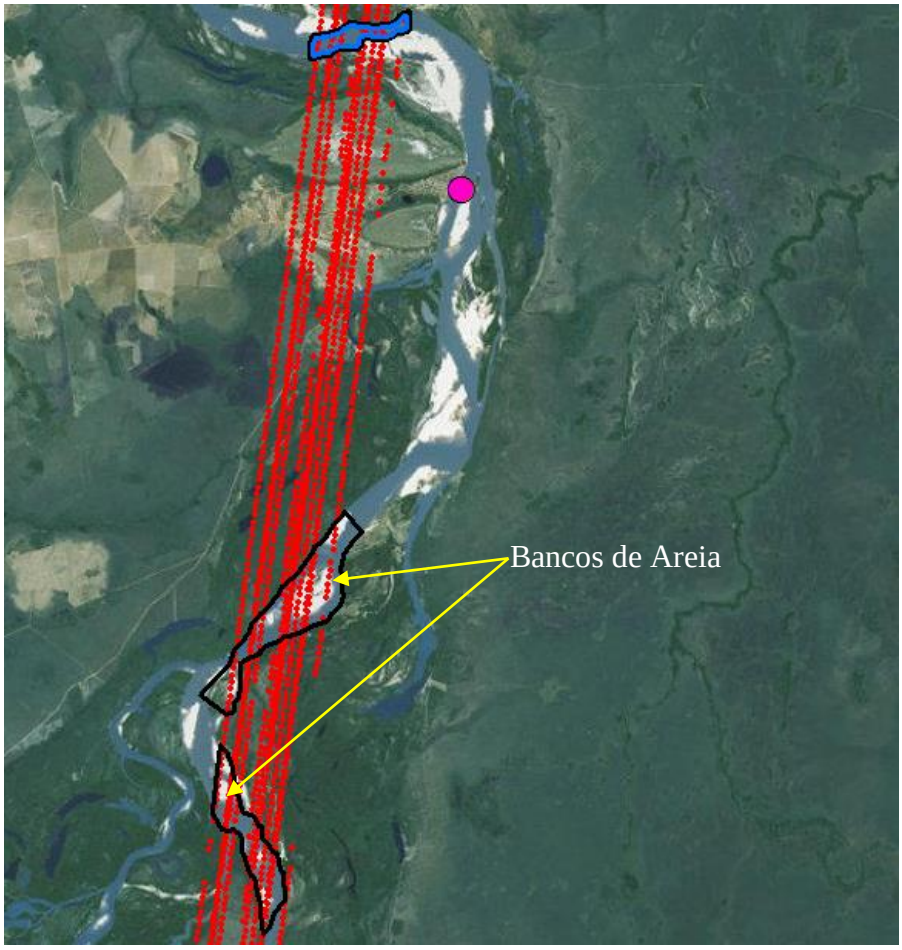


(fonte: elaborado pelo autor)

A estação virtual ao norte da São Felix do Araguaia é a mais próxima. Também foram obtidos os dados para outras duas, ao sul. Na figura 21 a localização destas. A referência de nível do ICESat é o EGM96, diferente do zero da régua da ANA. Para poder comparar os dois, foi obtida a média de cada uma das séries temporais, e de cada valor esta foi subtraída. Assim, é possível observar as variações na medida. Elas foram comparadas através do erro médio quadrático e da correlação entre ambas. As comparações estão resumidas na tabela 7 com os

mesmos dados da figura 22. Percebe-se que a estação virtual ao norte, a mais próxima, é a que obteve melhores resultados. As duas estações ao sul estão demasiado distantes da estação fluviométrica da ANA para obter-se uma relação aceitável. Além disso, os polígonos foram desenhados somente com as margens, não foi observado que há bancos de areia no meio do Rio. Isso certamente causou um erro na média do nível d'água do corpo hídrico, pois o que foi medido foi o banco de areia, e não a superfície da água. As variações de níveis d'água obtidas com o ICESat se aproximam das observações das estações da ANA.

Figura 21 - Estações virtuais ao Sul da estação São Felix do Araguaia da ANA (lat. -11.618º, long. -50.661º), no Rio Araguaia



(fonte: elaborado pelo autor)

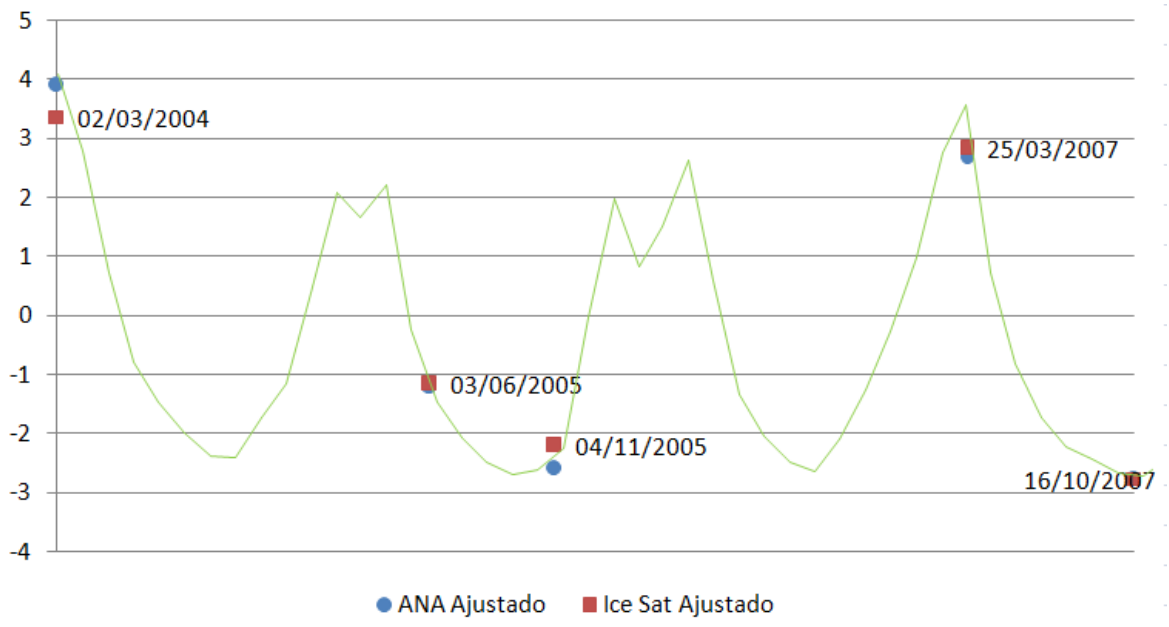
Tabela 7- Erro e Correlação das estações

Estação Virtual	Raiz do erro médio quadrático (m)	Correlação
Norte	0,305	0,996
1ª ao Sul	0,892	0,939
2ª ao Sul	0,711	0,982

(fonte: elaborado pelo autor)

Abaixo na Figura 22 o gráfico com as datas para as quais o ICESat passou sobre a estação virtual ao norte da São Felix do Araguaia, e as medidas da ANA e do satélite, subtraídas de suas médias (ajustadas). Em verde, a série mensal de medição de vazões da ANA, apenas para se observar o comportamento do Rio Araguaia.

Figura 22 - Gráfico comparando estação virtual e a da ANA



(fonte: elaborado pelo autor)

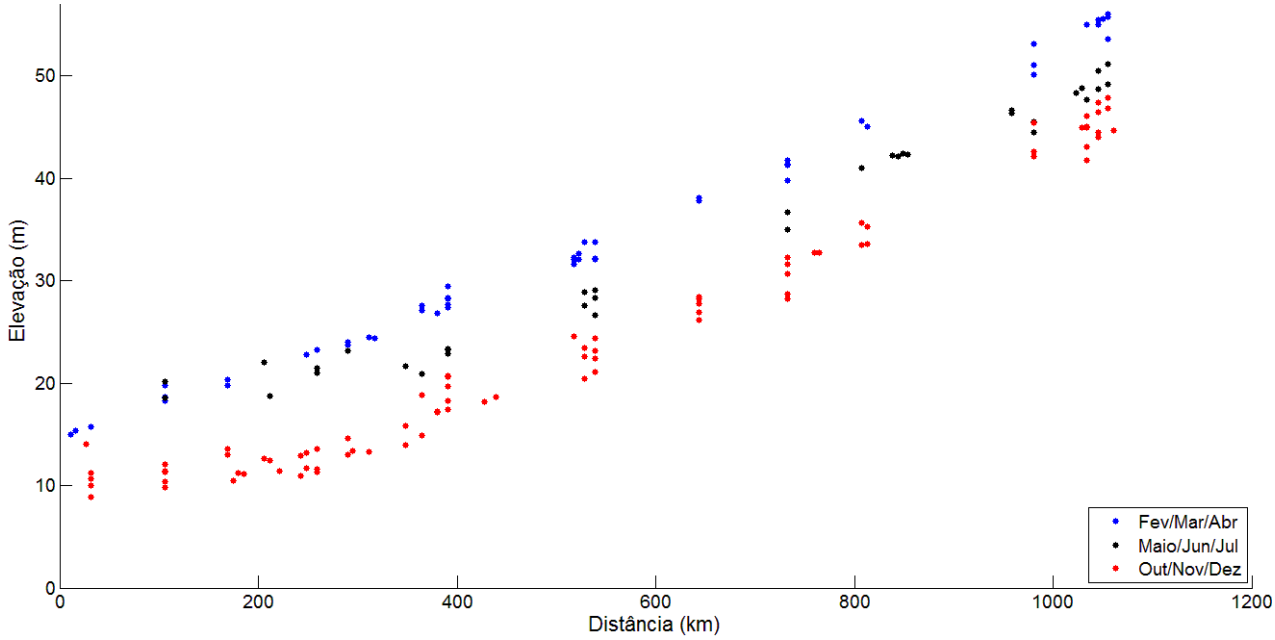
6.3 APLICAÇÃO NO RIO MADEIRA

Segundo Freitas et al. (2013), o Rio Madeira está numa extensa área de floresta tropical, onde a variação anual do nível d'água é grande, ocasionando frequentes aparecimentos de áreas sujeitos à inundação sazonal. O Rio é o maior tributário da margem direita do Rio Amazonas. Sua largura varia de 440 a 9900 m. e a partir da confluência dos Rios Mamoré e Beni, seus formadores, até a foz no Rio Amazonas, possuem 1.459 km de extensão (SILVA et al, 2013).

A figura 18 mostra a região na qual foi feita a aplicação. É 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. Utilizando a banda 5 (infravermelho próximo), foi feita uma classificação da imagem, para saber onde há água e, manualmente, foi recortado o trecho do rio principal. Essa máscara foi fornecida por João Fialho (informação verbal) do grupo Hidrologia de Grande Escala – HGE, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

Novamente utilizando os procedimentos descritos em 5.1, foram feitas estações virtuais em cada passagem do satélite sobre o curso d'água. Com essa informação, e através do enunciado em 5.3 - Perfil Longitudinal, foi realizado o perfil do talvegue do Rio Madeira (figura 23). Cada um dos pontos da imagem é uma passagem do ICESat sobre o curso d'água, para todo o período do satélite, de 2003 a 2009. Dividiu-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). É visível a diferença de altitude entre a cabeceira do Rio, à direita na imagem, e a foz no Rio Amazonas, à esquerda.

Figura 23 - Perfil Longitudinal do Rio Madeira



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.

6.4 APLICAÇÃO NAS LAGOAS DO LITORAL NORTE DO RS

O objetivo desta aplicação foi avaliar a potencialidade do ICESat para monitorar o Sistema de Lagos do Litoral Norte do estado do Rio Grande do Sul, conforme descrito em 5.2 - Sistemas de Lagos. Primeiramente, ver-se-á se a órbita do satélite passa sobre as lagoas. Infelizmente,

como se pode observar na figura 24, 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. Para tal, a Lagoa Itapeva foi denominada polígono 1, e a Lagoa dos Quadros, polígono 2.

Figura 24 - Passagem do ICESat sobre as Lagoas do Litoral Norte do RS

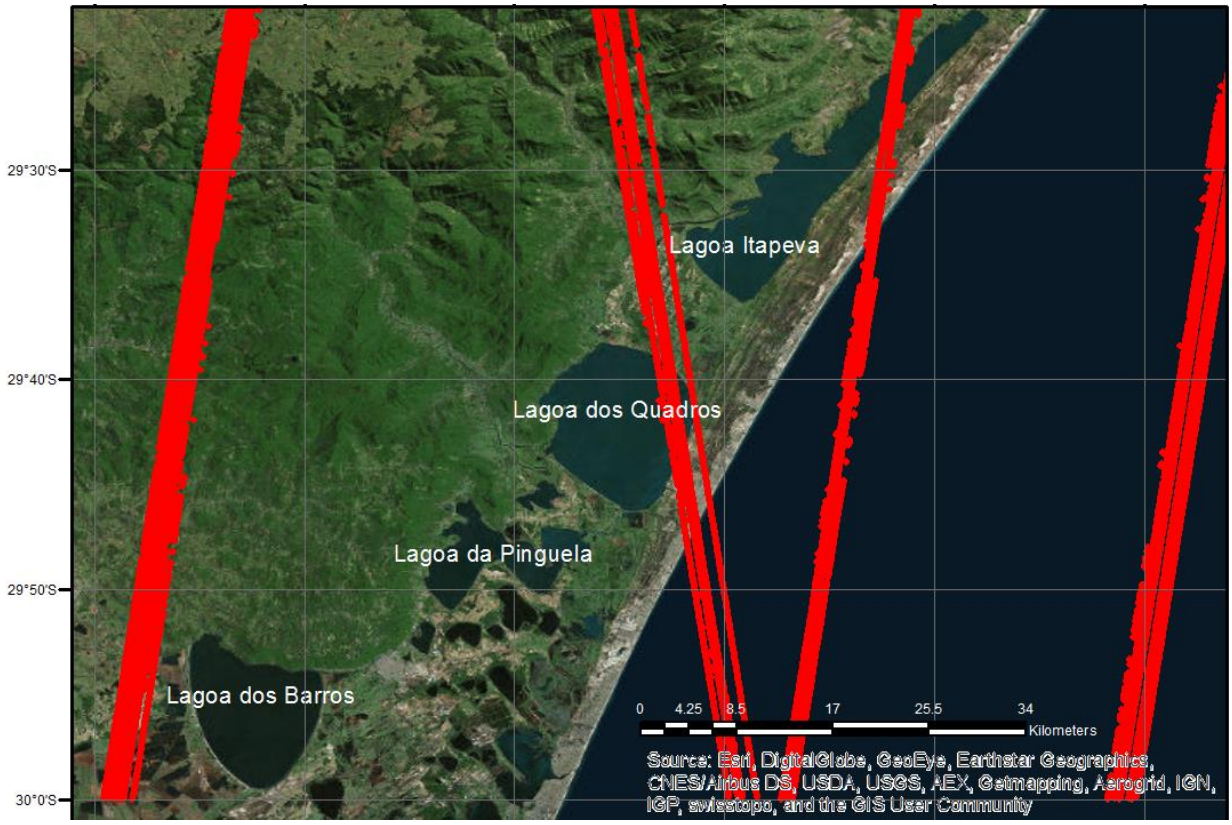


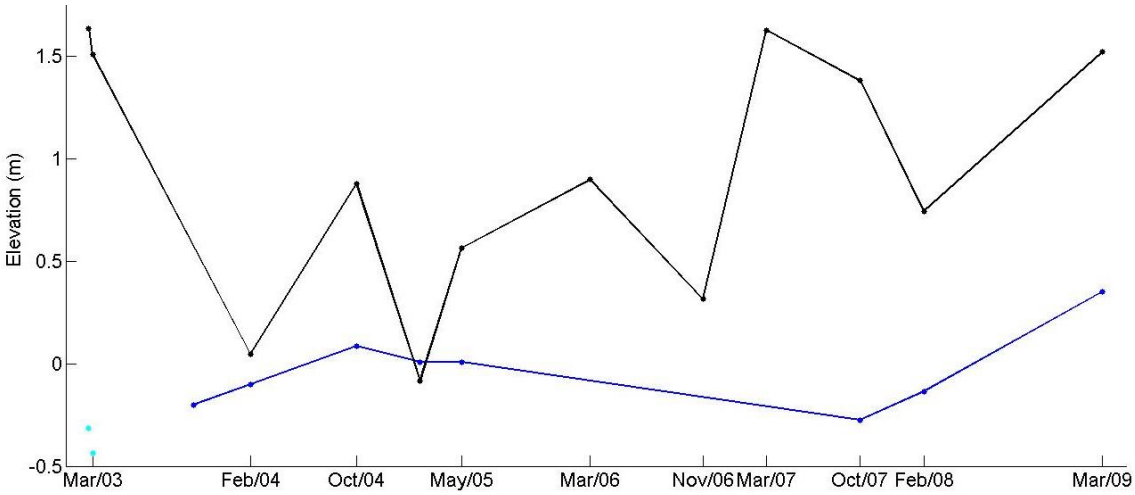
Tabela 8 - Resultados para as Lagoas Itapeva e dos Quadros

Mean	Median	Std	Longitude	Latitude	yyyy	mm	dd	Points	Polygon
1.474	1.518	0.098	-49.865117	-29.437988	2003	3	10	16	1
1.504	1.504	0.023	-49.861256	-29.438759	2003	3	18	17	1
0.861	0.857	0.014	-50.035259	-29.698084	2004	10	11	6	2
0.608	0.549	0.310	-50.040965	-29.683621	2005	5	27	29	2
0.890	0.912	0.095	-50.040847	-29.689023	2006	3	1	35	2
0.309	0.287	0.153	-50.050188	-29.694195	2006	11	1	4	2
1.738	1.738	0.100	-50.041591	-29.713563	2007	3	19	2	2
1.429	1.387	0.098	-50.040866	-29.687209	2007	10	9	5	2
0.776	0.766	0.120	-50.039074	-29.681129	2008	2	24	24	2
1.485	1.473	0.074	-50.047864	-29.686724	2009	3	16	21	2

(fonte: elaborado pelo autor)

Desafortunadamente, como pode-se perceber na Tabela 8, 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, se elas são independentes ou não. Entretanto, o nível será comparado ao nível do mar. Na Figura 25 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. Conforme a figura 25, 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.

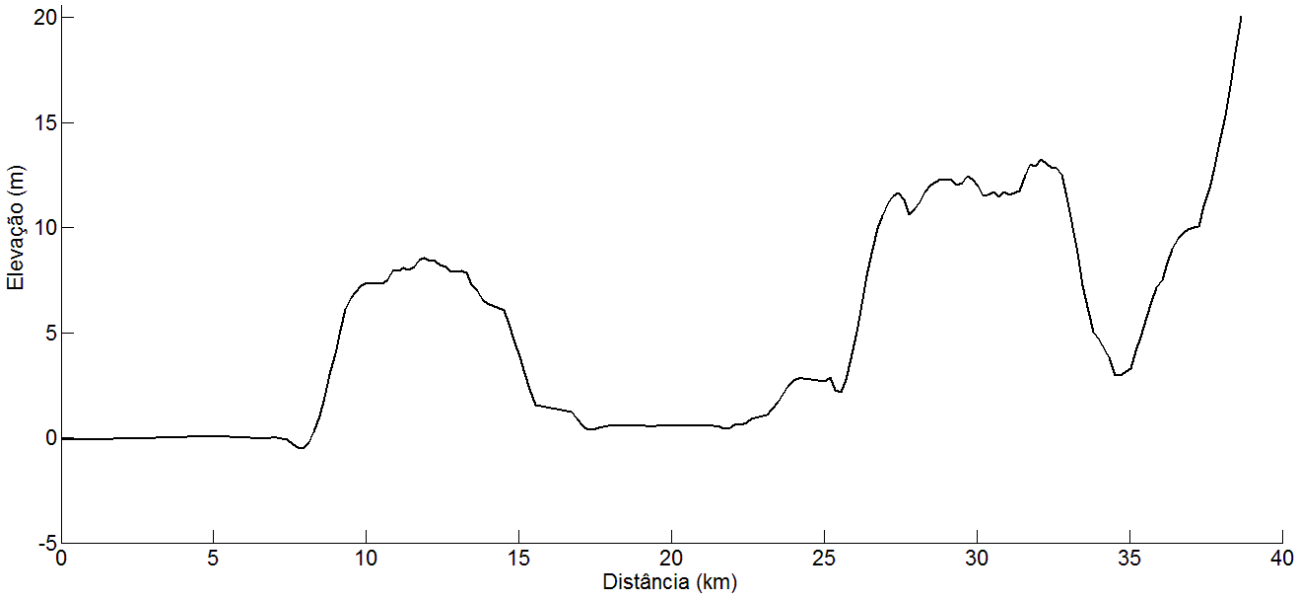
Figura 25 - Nível Lagoa dos Quadros, Lagoa Itapeva (em preto) e Mar (pontos azuis)



(fonte: elaborado pelo autor)

Também foi feito um perfil do terreno, de toda **uma** a passagem do ICESat sobre a Lagoa dos quadros (figura 26). Da esquerda para a direita, percebe-se que no mar o nível é próximo de zero. Após, há uma elevação de até 10 m e, ao entrar na Lagoa dos Quadros, o nível se encontra em torno de 1 m, e então volta a subir quando o satélite sai da lagoa e volta para o solo. Esse perfil foi suavizado para melhor representar o terreno.

Figura 26 - Perfil do Terreno numa passagem do ICESat sobre a Lagoa dos Quadros

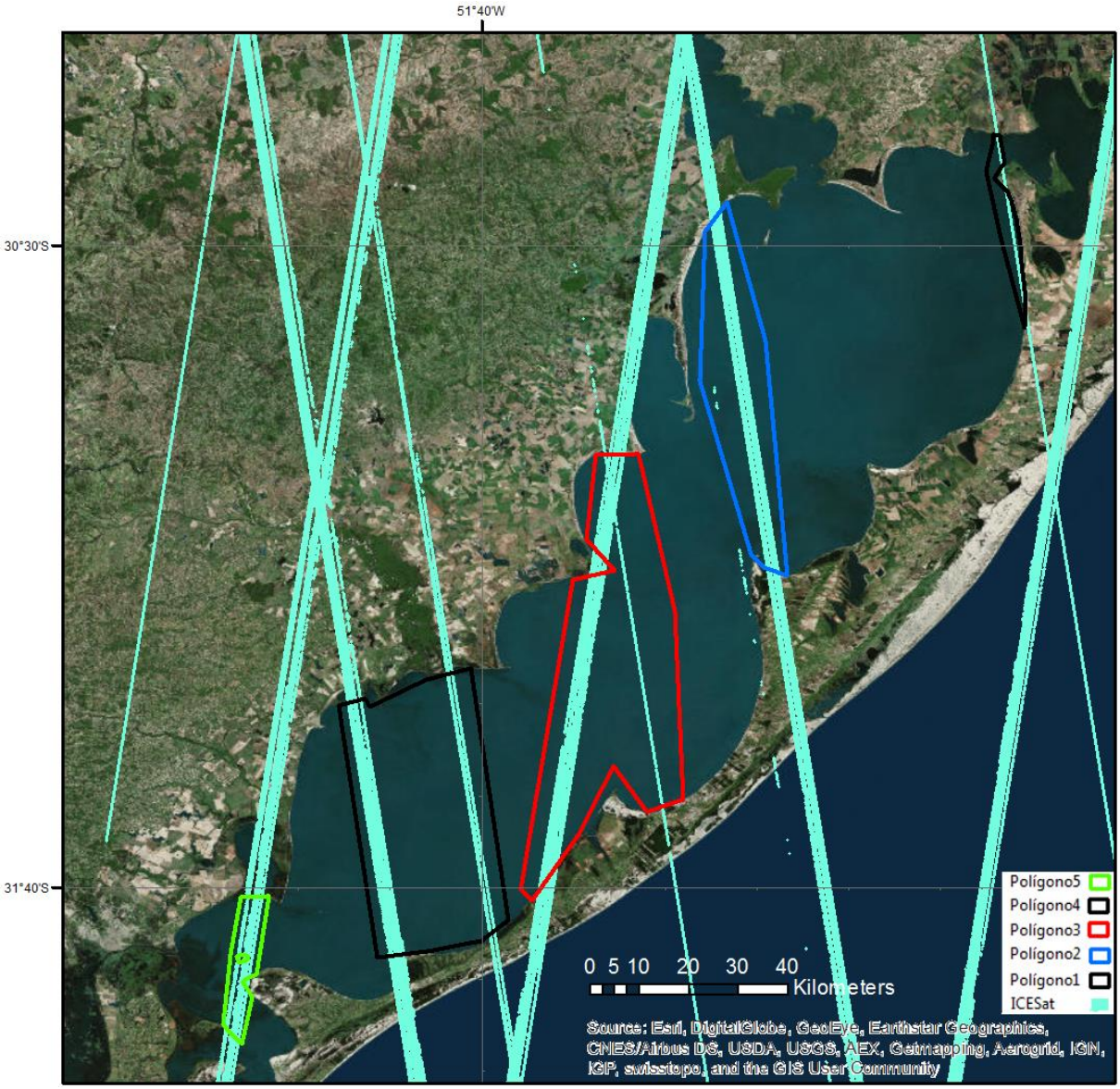


(fonte: elaborado pelo autor)

6.5 APLICAÇÃO NA LAGOA DOS PATOS

Também chamada Laguna dos Patos, é maior lagoa costeira do Brasil com aproximadamente 10360 km². Está localizada no leste do Rio Grande do Sul, entre 30° e 32° de latitude sul. A lagoa foi dividida em 5 regiões, verificando-se se as diferenças nos níveis ao longo de sua extensão. Na figura 27 há as passagens do satélite sobre a Lagoa, e também cinco polígonos desenhados, as divisões para observar a variação no nível. Os polígonos foram numerados de 1 a 5, da direta para a esquerda. No polígono número 1, o satélite passa apenas uma vez, por isso ele não foi utilizado nas comparações. Os outros possuem mais dados.

Figura 27 - Passagem do ICESat sobre a Laguna dos Patos



(fonte: elaborado pelo autor)

Foi feita uma comparação entre o nível em cada polígono (figura 34), seguindo as mesmas cores da figura 27 (exceto polígono 1, não utilizado). É possível visualizar que o nível a montante é maior, em média, que o de jusante. A região do polígono 3 (vermelho) é que a possui a maior amplitude de variação do nível d'água.

Também foi feita a média para cada um dos polígonos, e então gerado um perfil longitudinal médio da Laguna dos Patos (figura 29). Ele foi feito através de *boxplots*, onde a linha vermelha é a mediana, os limites da caixa do *boxplot*, os valores correspondentes a 25 e 75 % dos dados, e a linha preta acima e abaixo representa os valores máximos e mínimo,

respectivamente. É necessário lembrar que essas médias foram obtidas com dados de diferentes dias, não são simultâneas, por isso há diferenças entre elas.

Figura 28 - Níveis nos diferentes polígonos da Laguna dos Patos, com as mesmas cores da figura 33

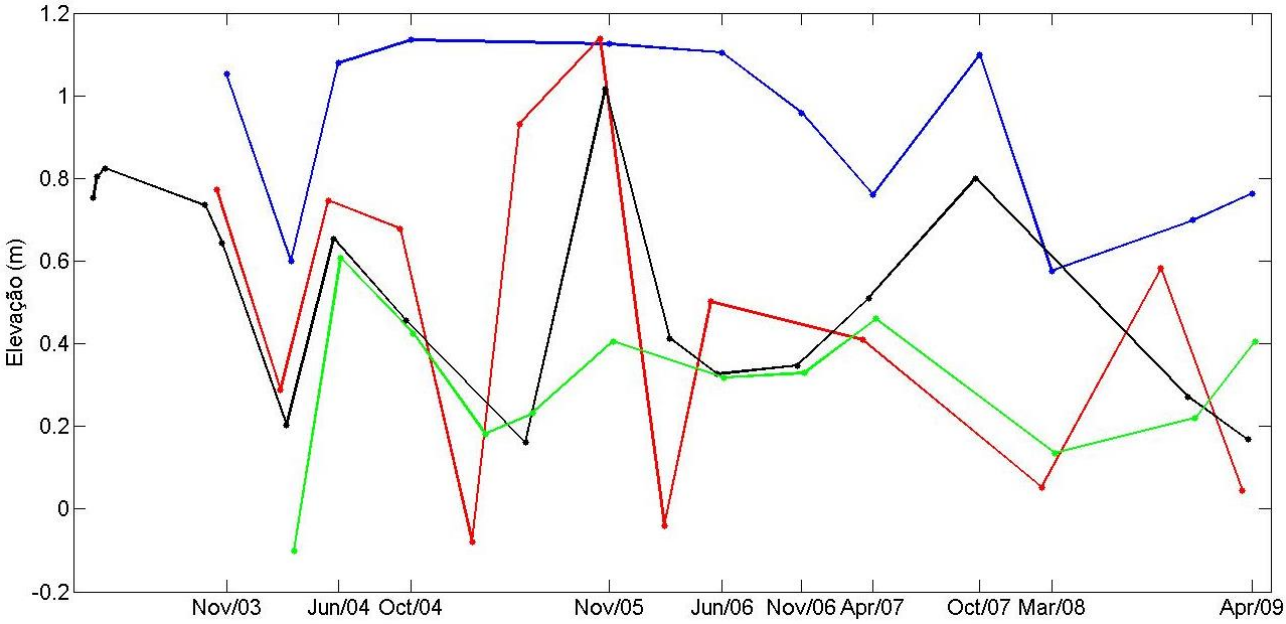
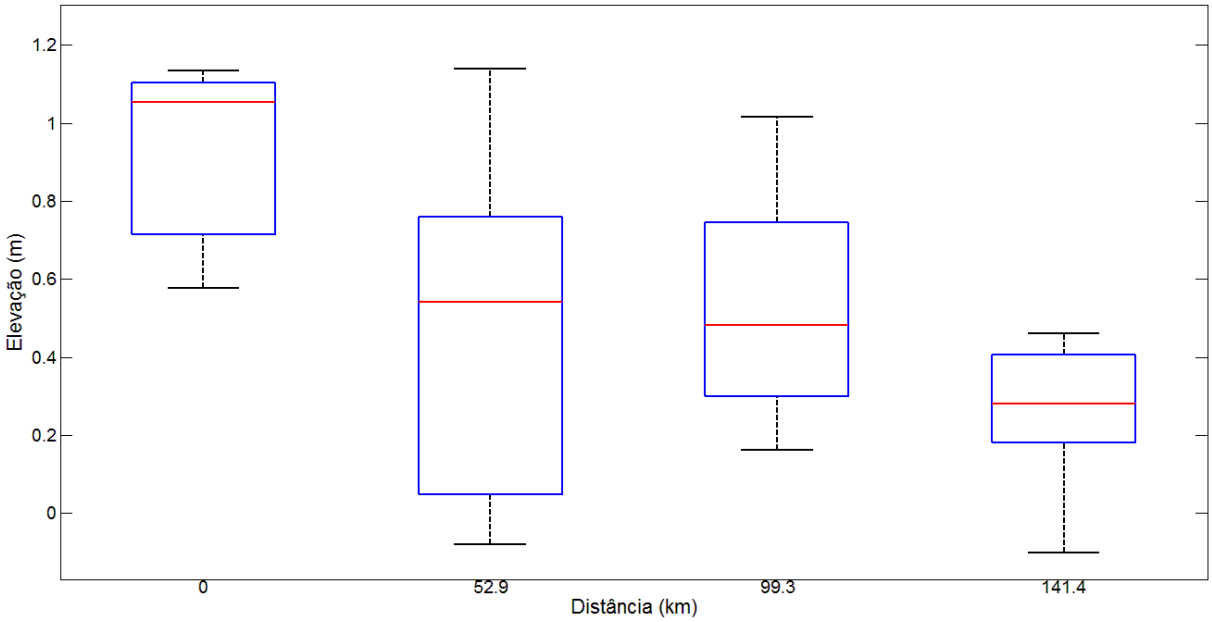


Figura 29 - Boxplots da Lagoa dos Patos



(fonte: elaborado pelo autor)

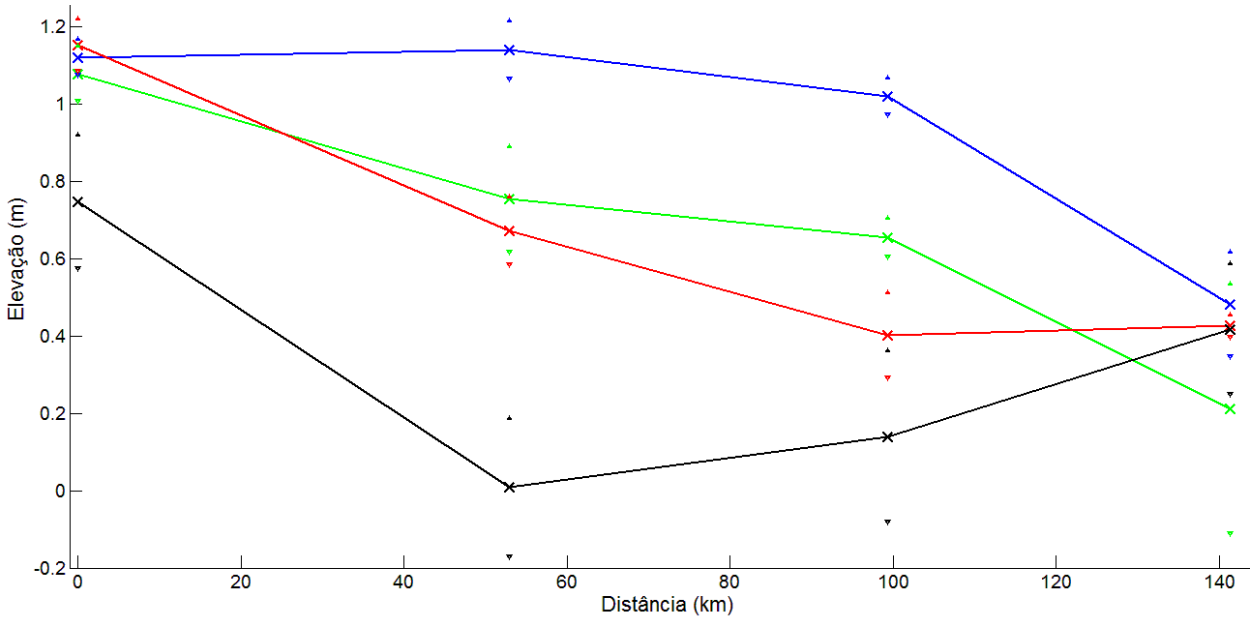
Além das figuras 28 e 29, foi feita uma comparação entre níveis para diferentes datas, utilizando dados próximos no tempo. Os dados gerados pelo ICESatProcessor nesta aplicação estão na tabela 9. A figura 30 mostra as observações plotadas com as mesmas cores da tabela, onde o "x" é a mediana, e os pontos acima e abaixo são o desvio padrão.

Surpreendentemente, alguns níveis a montante estão menores que os de jusante, e há uma variação não muito bem compreendida entre os perfis. É importante frisar que isso pode ser causado pela campanha irregular no tempo do ICESat, motivo pela qual a janela temporal aqui é de aproximadamente 20 dias, o que pode ocasionar diferença nos níveis. Há a influência da maré no último polígono e, além disso, o satélite pode estar refletindo o fundo da Lagoa, ao invés da superfície d'água (esse efeito acontece quando a lâmina d'água é muito clara e pouco profunda).

Tabela 9 - Dados das estações virtuais para a Lagoa dos Patos

	Média	Mediana	Desvio	Longitude	Latitude	Ano	Mês	Dia	Pontos
LP2	1.125	1.122	0.046	-51.158338	-30.921500	2005	11	14	83
LP3	1.139	1.141	0.076	-51.490508	-31.285327	2005	10	26	424
LP4	1.015	1.021	0.047	-51.845095	-31.612016	2005	11	6	223
LP5	0.405	0.482	0.135	-52.111281	-31.804393	2005	11	20	150
LP2	1.079	1.079	0.071	-51.225589	-30.550236	2004	6	11	99
LP3	0.747	0.754	0.136	-51.461819	-31.115622	2004	5	22	19
LP4	0.654	0.655	0.049	-51.859859	-31.568521	2004	6	2	280
LP5	0.232	0.212	0.322	-52.105028	-31.817880	2005	6	19	47
LP2	1.135	1.154	0.068	-51.195171	-30.765142	2004	10	28	394
LP3	0.678	0.672	0.088	-51.485271	-31.296112	2004	10	8	407
LP4	0.455	0.403	0.110	-51.868249	-31.558273	2004	10	19	293
LP5	0.425	0.426	0.029	-52.098075	-31.813774	2004	11	2	144
LP2	0.764	0.748	0.172	-51.185670	-30.837591	2009	4	2	217
LP3	0.045	0.008	0.179	-51.472775	-31.261807	2009	3	13	319
LP4	0.168	0.140	0.222	-51.857335	-31.589935	2009	3	24	214
LP5	0.404	0.418	0.169	-52.097904	-31.813438	2009	4	7	112

Figura 30 – Níveis em diferentes dias nas estações virtuais da Lagoa dos Patos. Cada cor indica um dia diferente de passagem do ICESat, igual a Tabela 9



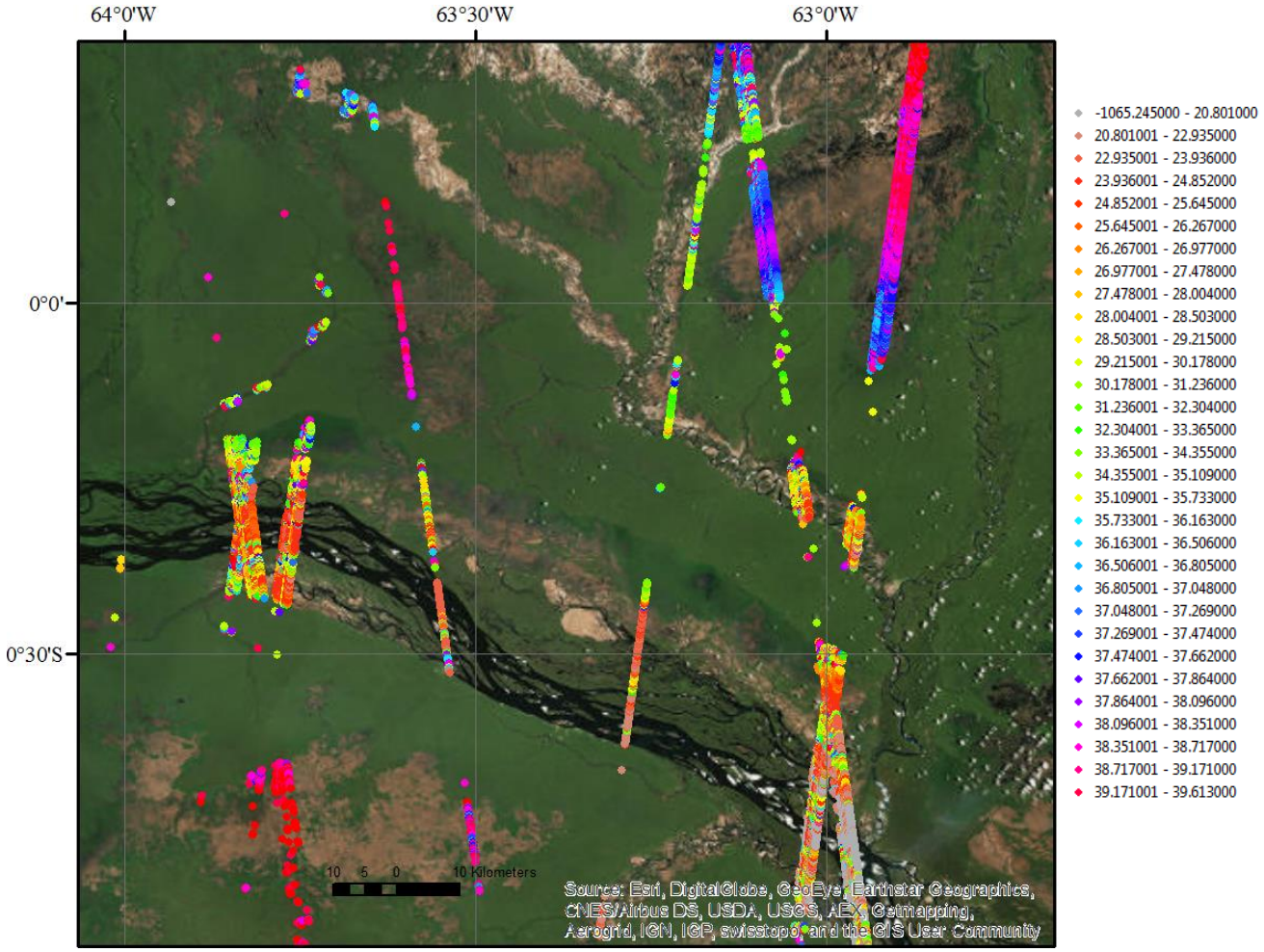
(fonte: elaborado pelo autor)

Em resumo, percebe-se que a amplitude de variação dos níveis é da ordem de 50 cm a 1 m. Os níveis vão de 1 m a montante a cerca de 0.5 m a jusante, o que resulta em uma declividade da linha d água menores que 1cm/km

6.6 APLICAÇÃO NA AMAZÔNIA – RIOS NEGRO E BRANCO E VÁRZEAS DE INUNDAÇÃO

Nesta aplicação, será feito como descrito em 5.5 – Várzeas de inundação. O objetivo é comparar dados de nível do Rio principal com a planície de inundação, e então estudar como se dá a hidrologia nesta região. Na figura 31 é possível identificar as órbitas do ICESat ali, bem como uma legenda em escala de cores para diferentes altitudes.

Figura 31 - Passagens do ICESat sobre a região do Rio Negro



(fonte: elaborado pelo autor)

Foram utilizadas duas imagens de radar SAR do satélite Alos-Palsar para identificar as regiões onde há um espelho d'água (cor preta), e várzea inundada sob vegetação (cor mais clara). É visível a mudança na área inundada e na área de água livre entre as figura 32 e 33.

Figura 32 - Imagem do Alos-Palsar no período de águas baixas

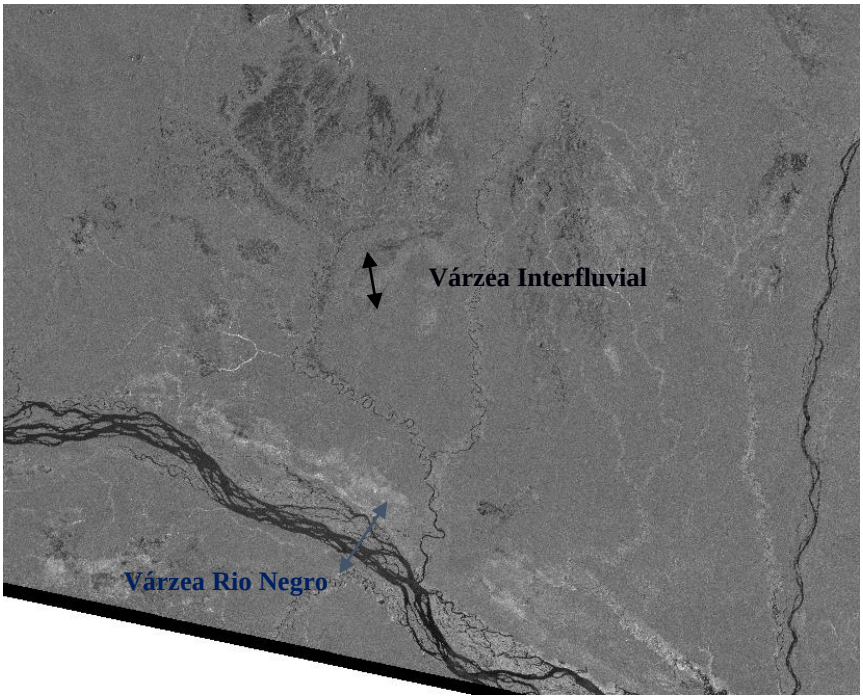
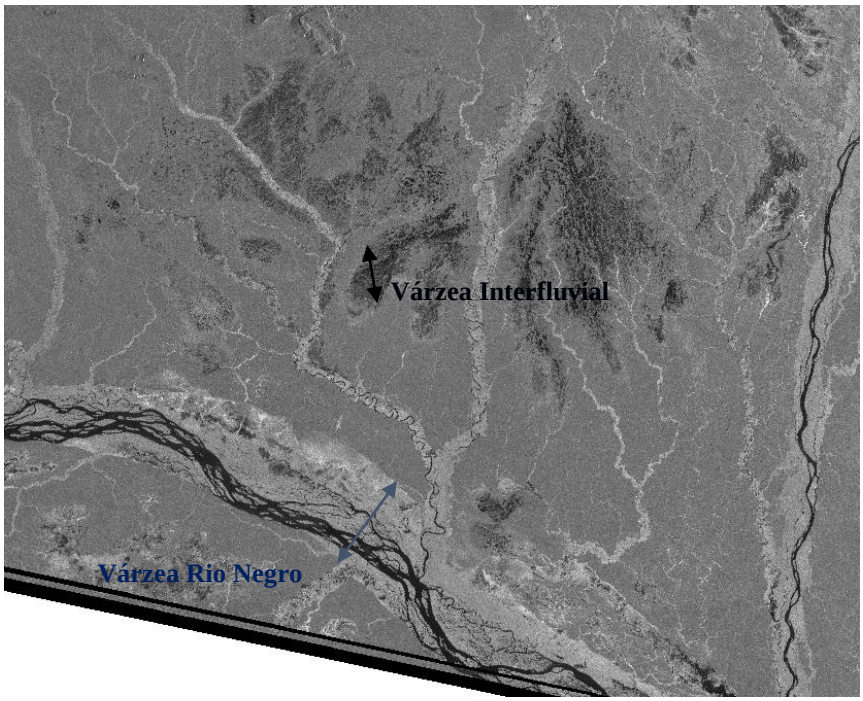


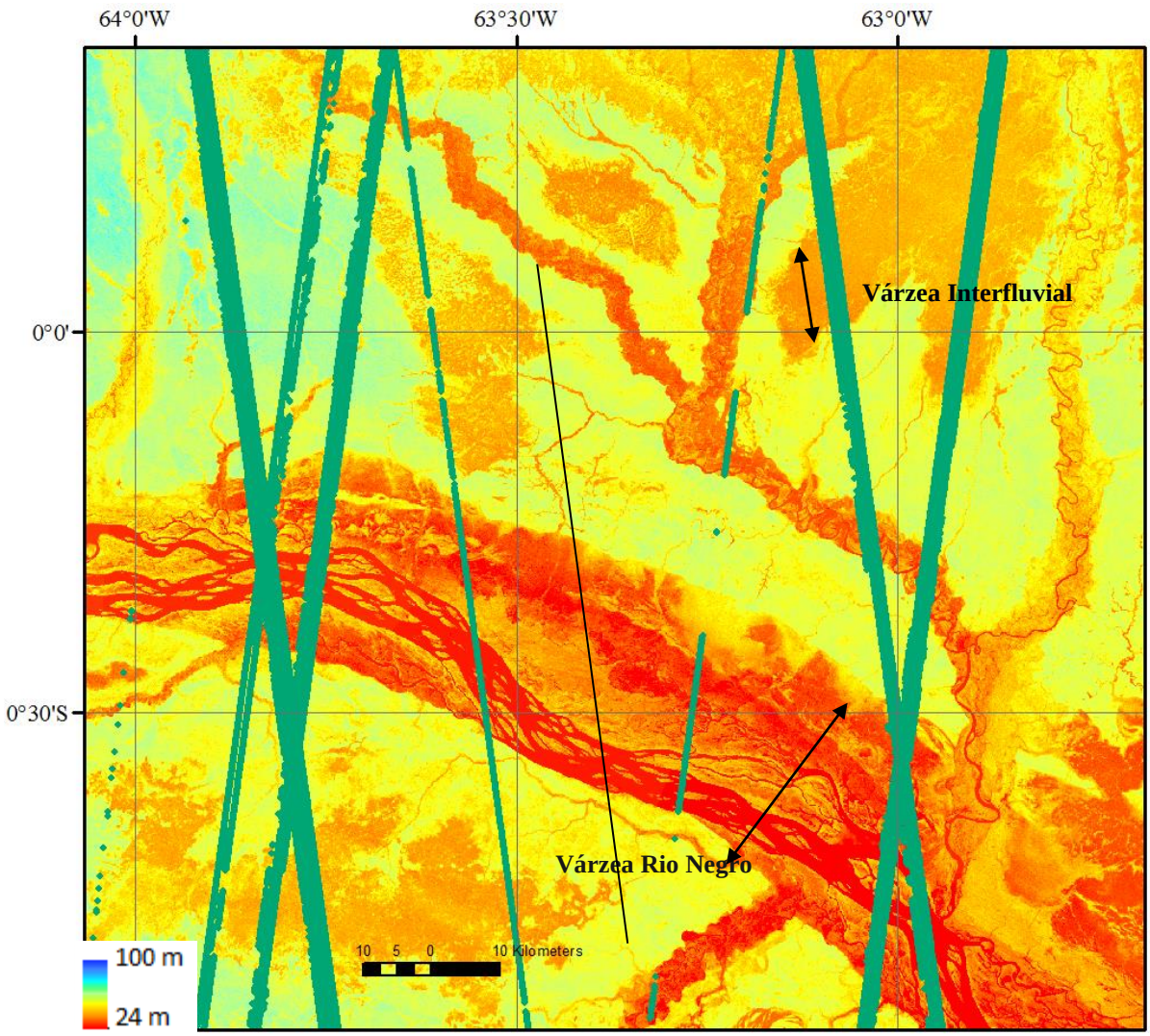
Figura 33 - Imagem do Alos-Palsar no período de águas altas



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 34 mostra o MDE da SRTM para a região. Quanto mais próximo a cor vermelha, menor o nível do terreno, e quanto mais azul, mais alto. As linhas verdes são as passagens do ICESat, e a linha preta, a delimitação do perfil que será mostrado a seguir.

Figura 34 - SRTM para a região da confluência dos Rios Negro e Branco



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 36 mostra um perfil de cada uma das imagens do Alos-Palsar. O eixo y mostra o coeficiente de retroespalhamento, sigma zero (σ0) em decibéis. Quanto mais alto o valor, mais próximo do branco (planície inundada sob vegetação), e quanto mais baixo o valor de σ0, mais preta é a imagem (água livre), e valores intermediários mostram vegetação não inundada. São claras as mudanças no perfil do período de águas baixas (linha verde) para o de águas altas (linha preta). As regiões entre as distâncias de 0 e 35 km, e 110 e 135 km, apresentam baixos valores de σ0, indicando água a superfície livre no rio Negro e na várzea interfluvial. Além disso, na região entre 110 e 135 km ocorre uma diminuição entre os períodos de águas baixas e altas, indicando a passagem entre uma situação não inundada para inundada. Já a região entre 33 e 55 km sofreu um aumento de σ0, o que mostra que uma floresta antes seca passa a ficar inundada. A figura 35 mostra, em vermelho, a diferença entre

a linha verde e a preta da figura 36. Onde a diferença é menor que zero, houve uma mudança de vegetação para água aberta, e onde é maior do que zero, uma área vegetada inundou. Em preto, a linha de tendência.

Figura 35 - diferenças entre σ0 para as duas imagens do Alos-Palsar, na região do Rio Negro

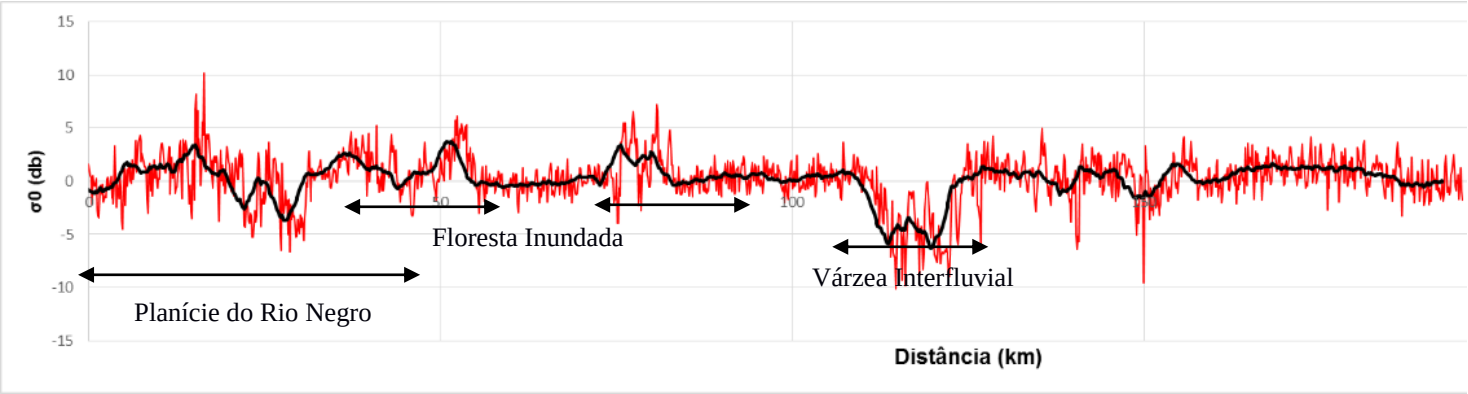
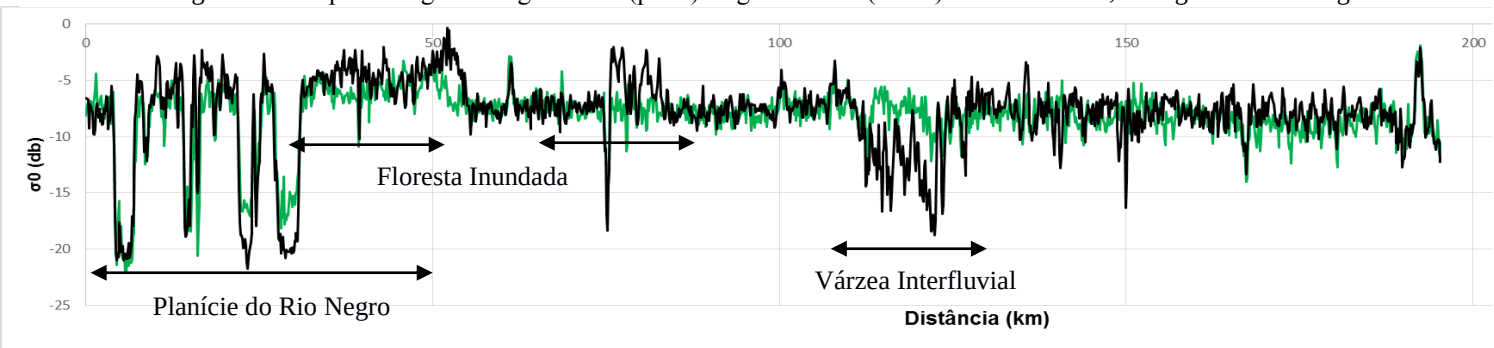
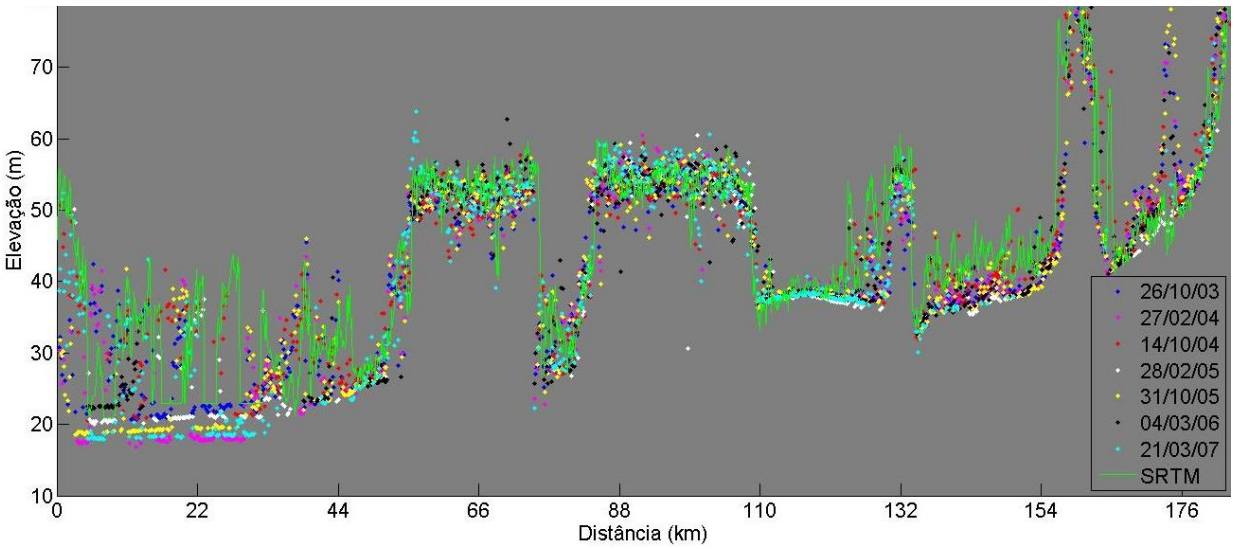


Figura 36 - σ0 para imagem de águas altas (preta) e águas baixas (verde) do Alos-Palsar, na região do Rio Negro



Voltando ao ICESat, para o mesmo perfil desenhado na figura 34, 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 37). Há pequenas diferenças entre o ponto inicial (o zero, ou referência) do MDE e das diferentes passagens do ICESat. Percebe-se que as medidas aproximam-se 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 37 - Perfis com medidas do ICESat e o MDE da SRTM, na região do Rio Negro



(fonte: elaborado pelo autor)

Agora, será mostrado um *zoom* da imagem para cada um dos locais, para melhor visualização. A figura 38 mostra a floresta inundada mais ao norte, com variação máxima aproximada de nível de 1 m. Ali, o nível varia muito menos, o que poderia indicar que a inundação é causada pela precipitação direta, e não pelo extravasamento de um rio. Já na figura 39, que mostra o Rio Negro e sua várzea, há uma variação de aproximadamente 10 m no nível.

Figura 38 - ICESat e MDE na Floresta Inundada, na região do Rio Negro

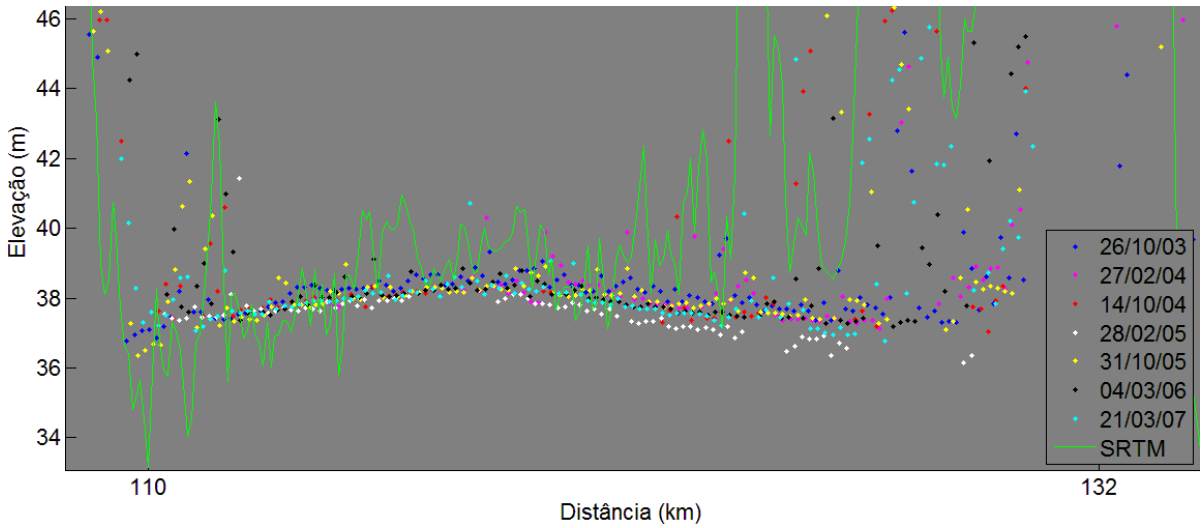
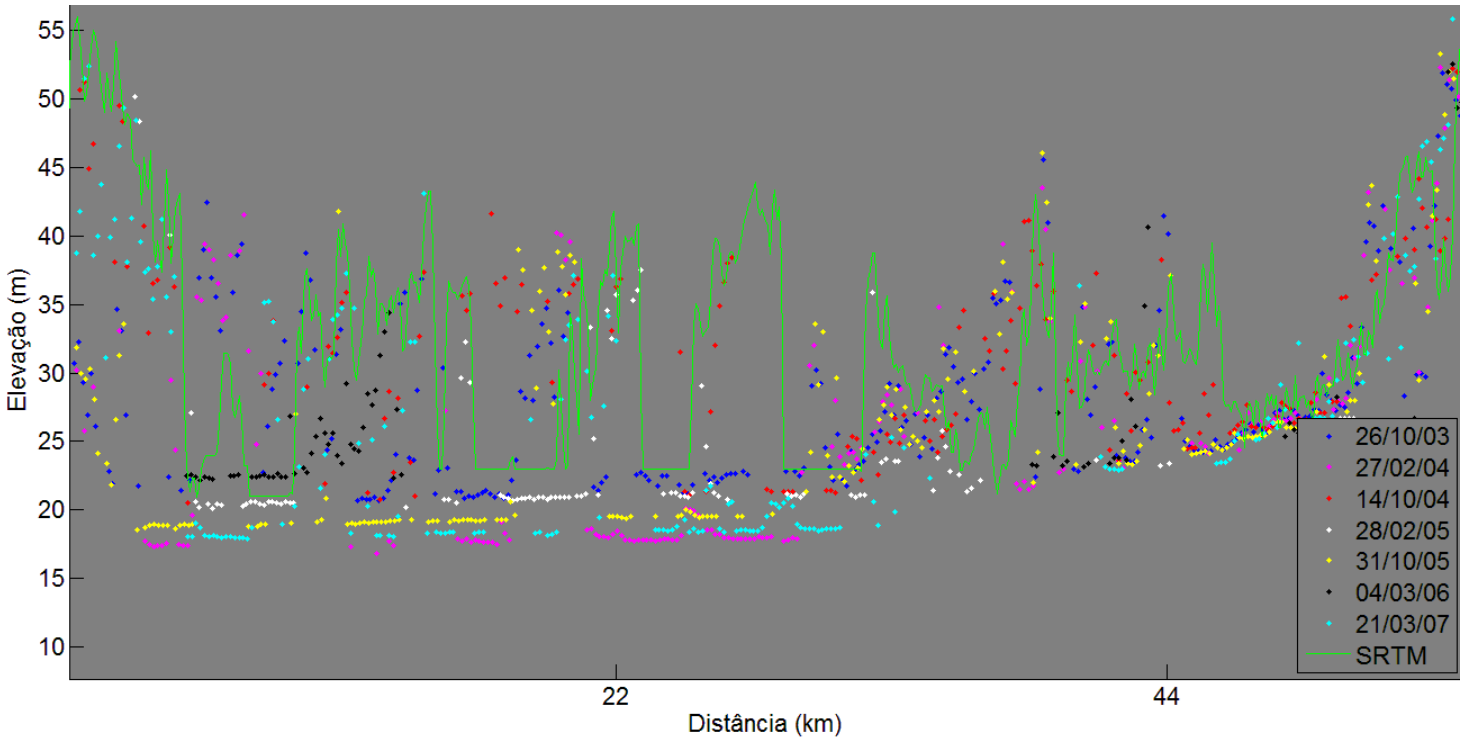


Figura 39 - ICESat e MDE no Rio Negro e sua várzea

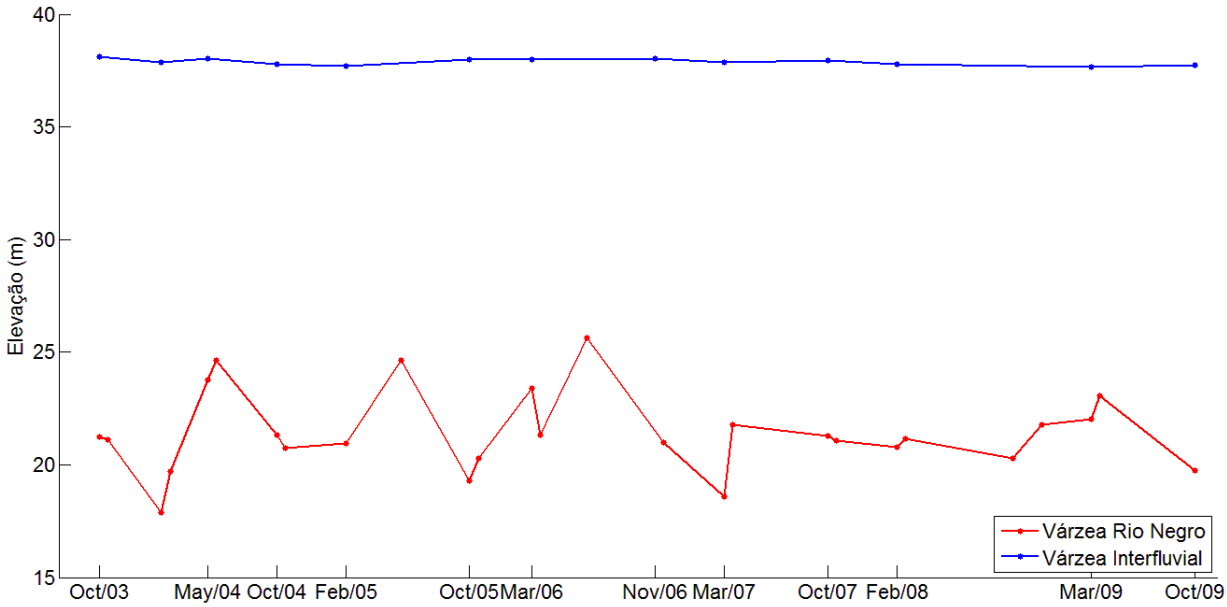


(fonte: elaborado pelo autor)

Percebe-se a partir desses dados que há uma grande variação nos níveis do Rio Negro, e uma variação menor na várzea interfluvial. Há um ruído nos dados, apesar de todos os critérios de remoção de valores atípicos utilizados no ICESatProcessor.

Foram feitas duas estações virtuais, uma na várzea do Rio Negro, e outra na Várzea Interfluvial. A figura 40 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.

Figura 40 - Estações Virtuais na várzea do Rio Negro e na Várzea Interfluvial



(fonte: elaborado pelo autor)

Estas analises demonstram como os dados do ICESat podem ser uteis para elucidar processos hidrológicos em regiões com complexa rede de rios e várzeas inundáveis, como a bacia do rio Negro.

7 CONCLUSÕES

O código e interface produzidos mostraram ser boas ferramentas para utilizar os dados do ICESat. O programa é considerado relativamente rápido, como foi demonstrado através dos tempos de processamento, para uma máquina mediana em termos de *hardware*.

Percebe-se que as variações de níveis d'água obtidas com o ICESat se aproximam das observações das estações da ANA, com erros médios quadráticos menores do que 30 cm.

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.

Há ainda muito potencial a ser explorado, em outras aplicações, como:

a) MDE;
b) declividade média da linha d'água;
c) várzeas de inundação;
d) calibração de modelos hidrodinâmicos;
e) nivelamento de Réguas.

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.

REFERÊNCIAS

ABDALATI, W. et al. The ICESat-2 laser altimetry mission. **Proceedings of the IEEE**, v. 98.5, n. 5, p. 735-751, Maio 2010.

ABSHIRE, J. B. et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: on- orbit measurement performance. **Geophysical Research Letters**, Florida, v. 32, n. 21, p. 1-4, Nov. 2005.

BENVENISTE, J. Radar altimetry: past, present and future. **Coastal Altimetry**, Berlin, p. 1-17, 2011.

BRENNER, A. C.; DIMARZIO, J. P.; ZWALLY, H. J. Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 2, p. 321-331, Fev. 2007.

CARABAJAL, C. C.; HARDING, D. J. ICESat validation of SRTM C- band digital elevation models. **Geophysical research letters**, Florida, v. 32, n. 22, p. 1-5, Nov. 2005

CRÉTAUX, J. F. et al. Combining of radar and laser altimetry, MODIS remote sensing and GPS for the monitoring of flood events: application to the flood plain of the Diamantina River. **Geophysical Research Abstracts**, Florida, v. 9, p. 1-2, 2007.

D'ALGE, Júlio César Lima. Cartografia para geoprocessamento. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, p. 32, 2001.

DAVIS, C.; CÂMARA, G. **Arquitetura de sistemas de informação geográfica.** São José dos Campos, INPE, p. 1-36, 2001.

DE FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. **International Geoid Service Bulletin N.9**, v. 47, n. 62, p. 1-15, 1999.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2015: Ano Base 2014**. Rio de Janeiro, 2015.

FARIA, R. M.; SANTOS, E. E.; FARIA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; FARIA, A. L. L. A influência da geologia na bacia do Rio do Carmo, Mariana(MG): Uma análise da relação declividade extensão (RDE) do seu canal principal. In: 9º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, n. 9, 2012, Rio de Janeiro. **Anais: Geomorfologia fluvial**, Não paginado. Disponível em http://www.sinageo.org.br/2012/trabalhos/2/2-590-283.html. Acesso em: 27 maio 2016.

FARR, T. G., KOBRICK, M. Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 81, n. 48, p. 583-585, 2000.

FARR, T. G. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-33, 2007.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa.** Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1988, p. 50.

FREITAS, F. M. et al. Análise sazonal da precipitação e nível d'água utilizando dados do produto Merge e satélite Envisat na bacia do rio Madeira. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, p. 5620-5627, Abr. 2013.

FRICKER, H. A. et al. Assessment of ICESat performance at the salar de Uyuni, Bolivia. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 21, p. 1-5, 2005.

HALL, A. C.; SCHUMANN, G.; BAMBER, P. D.; BATES, P. A.; TRIGG, M. A. Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry. **Water Resources Research**. Florida, v. 48, n. 10, p. 1-6, Jun. 2012.

_____. **Observing water level dynamics in the Amazon using satellite altimetry.** University of Bristol, 2013.

HIMMELBLAU, D. M. **Process Analysis by Statistical Methods**. New York: John Wiley & Sons Inc, 1970.

LEON, J. G. et al. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. **Journal of hydrology**, v. 328, n. 3, p. 481-496, Dez. 2006.

MA, R.; YANG, G.; DUAN, H. et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. **Science China: Earth Science**, v. 54, n. 2, p. 283-289, Out.2011.

NEAL, Jeffrey; SCHUMANN, Guy; BATES, Paul. A subgrid channel model for simulating river hydraulics and floodplain inundation over large and data sparse areas. **Water Resources Research**, v. 48, n. 11, p. 1-16, 2012.

O'LOUGHLIN, F.; TRIGG, M. A.; SCHUMANN, G. J.-P.; BATES, P. D. Hydraulic characterization of the middle reach of the Congo River. **Water Resources Research**, Florida, v. 49, n. 8, p. 5059-5070, Ago. 2013.

_____. ICESat derived inland water surface spot heights. **Water Resources Research**, Florida, v. 52, n. 4, p. 3276-3284, Abr. 2016.

PARIS, A. **Utilisation conjointe de données d'altimétrie satellitaire et de modélisation pour le calcul des débits distribués dans le bassin amazonien**. 2015. 289 p. Tese Doutorado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação IPH/UFRGS - Université de Toulouse, 2015

PRITCHARD, H. D.; LUTHCKE, S. B.; FLEMING, A. H. Understanding ice-sheet mass balance: progress in satellite altimetry and gravimetry. **Journal of Glaciology**, v. 56, n. 200, p. 1151-1161, 2010

RESS, W. G. Chapter 8: Ranging Systems. **Physical Principles of Remote Sensing.** Third ed., Cambridge University Press, p. 250-280, 2013.

ROUX, Emmanuel et al. 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.

SCHUMANN, GJ- P. et al. A first large-scale flood inundation forecasting model. **Water Resources Research,** v. 49, n. 10, p. 6248-6257, Out. 2013.

SCHUTZ, B. E.; ZWALLY, H. J.; SHUMAN, C. A.; HANCOCK, D.; DIMARZIO, J. P. Overview of the ICESat Mission. **Geophysical Research Letters**, Florida, v. 32, n. 21, p. 1-4, Nov. 2005.

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

SILVA, Mylena Vieira et al. Nivelamento de estações linimétricas do rio Madeira com dados altimétricos. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, p. 5832-5839, Abr. 2013.

TRIGG, M. A. et al. Observations of Amazon floodplain channel dynamics using Landsat images and ICESat elevations. **AGU Spring Meeting Abstracts,** Vol. 1, Maio 2013.

URBAN, T. J.; SCHUTZ, E. B.; NEUENSCHWANDER, A. L. A Survey of ICESat Coastal Altimetry Applications: Continental Coast, Open Ocean Island, and Inland River. **Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences**, Taipei, v. 19, n. 1-2, p. 1-19, Abr. 2008.

ZHANG, G.; et al. Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003–2009). **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 7, p. 1733-1742, 2011a.

_____. Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 5, n. 1, p. 53532, Jun. 2011b.

_____. Snow cover dynamics of four lake basins over Tibetan Plateau using time series modis data (2001-2010). **Water Resources Research**, v. 48, n. 10, p. 1-22, Out. 2012.

_____. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data. **Chinese Science Bulletin**, v. 58, n. 31, p. 3815-3829, Maio 2013.

ZWALLY, H. J.; SCHUTZ, B.; ABDALATI, W.; ABSHIRE, J.; BENTLEY, C.; BRENNER, A.; BUFTON, J.; DEZIO, J.; HANCOCK, D.; HARDING, D.; HERRING, T.; MINSTER, B.; QUINN, K.; PALM, S.; SPINHIRNE, J.; THOMAS, R. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. **Journal of Geodynamics**, Amsterdam, v. 34.3, n. 3-4, p. 405-445, Nov. 2002.

_____.ICESat measurements of sea ice freeboard and estimates of sea ice thickness in the Weddell Sea. **Journal of Geophysical Research**: Oceans, v. 113, n. C2, p. 1-17, 2008.

_____. *GLAS/ICESat L2 Global Land Surface Altimetry Data (HDF5), Version 34*. GLA14. Boulder, Colorado USA. **NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center**. doi: http://dx.doi.org/10.5067/ICESAT/GLAS/DATA211.. Acessado dia 26/05/2016, 2014.