

Processamento de dados do ICESat para aplicações hidrológicas

Otávio Augusto Passaia¹
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500 - 91501-970 - Porto Alegre – RS
otavio.passaia@ufrgs.br
rodrigo.paiva@ufrgs.br

Abstract. The proper water resources management follows the detailed comprehension of the physical process involved in the water cycle. Recently a large number of remote sensing techniques for observation of hydrological variables has been developed. That enables large and sparse areas monitoring (for example, the Amazon basin), with a superior temporal-spatial cover to the *in situ* observations. Altimetry is the study of altitude measurements, or the altitude representation in maps or topographical plans. The American satellite ICESat (ICE, Cloud and Elevation Satellite), developed by NASA, was used in this research to perform water level measurements in Brazilian rivers and lakes. The goal of this paper is to evaluate the ICESat utility in hydrologic applications. To reach it, a software was developed to process the ICESat altimetry data, through a routine in Matlab programming language. The resulting code and interface proved to be effective tools to process ICESat data. To validate the satellite data, a comparison was made between water levels obtained by remote sensing and the Agência Nacional de Águas (ANA) gauged stations in the Bananal Island region. It was noticed that the ICESat water level variation approached the ANA gauged stations data, with mean squared error smaller than 30 cm. Another potential applications: average slope of the waterline; flood plains monitoring; calibration of hydrodynamic models; leveling staff gauge.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, altimetria, altimetria à laser, hidrologia, remote sensing, altimetry, laser altimetry, hydrology

1. Introdução

A adequada gestão dos recursos hídricos e mitigação de impactos negativos de desastres hidrológicos, como as recentes cheias e secas extremas observadas nacionalmente, passam 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 a de observações *in situ*. Essas observações incluem estimativas por satélite de níveis d'água em rios, precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, entre outras.

Altimetria é o estudo ou técnica da medição de altitudes, ou a representação das altitudes em mapas ou plantas topográficas. Segundo O'Loughlin et al. (2016), todas as missões de satélites de altimetria medem a altura da água de superfície de maneira similar: um pequeno pulso de energia (ou feixe) é transmitido, e então é refletido pela superfície da água de volta 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. 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 *footprint* do satélite.

A vantagem da altimetria a laser é seu *footprint* menor em relação à altimetria por radar. Isso porque o altímetro a laser emite radiações com comprimento de onda muito menores ($\lambda = 1064 \text{ nm}$ – infravermelho) logo a abertura angular do feixe ($\Delta\theta$) e conseqüentemente seu *footprint* 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).

Segundo Schutz et al. (2005), a medida que o satélite orbita em torno da terra, o pulso do laser opera a 40 Hz, ou seja, 40 pulsos são emitidos por segundo, e são obtidos pontos sucessivos separados na superfície terrestre a cada 172 m.

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

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

Conforme Abshire (2005), 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), o período que o ICESat passa não é distribuído uniformemente ao longo do ano.

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), Version 34* (GLA14) (ZWALLY, 2014). HDF5 é a extensão do arquivo, que pode ser lido em softwares de cálculo científico como o Matlab.

Segundo O'Loughlin et al., (2016), dependendo da aplicação, a escolha do satélite de altimetria é extremamente importante. A Tabela 1 lista as características dos principais instrumentos de altimetria. Todos os principais instrumentos de altimetria tem footprint menor que 1 km, os corpos d'água precisam ser de 2 a 3 vezes mais largos que o footprint para a altura d'água ser bem amostrada.

Tabela 1 - Comparação das missões de altimetria mais populares para estimativa do nível d'água superficial. Baseada em O'LOUGHLIN et al. (2016).

Missão	Footprint (m)	Ciclo (dias)	Período	Precisão (m)
ICESat	~70	-	2003-2009	0.10 (Urban et al., 2008)
TOPEX/Poseidon	~43 400	9.9	1993-2001	0.35 (Frappart et al., 2006)
ERS-2	~10 000	35	1995-2003	0.55 (Frappart et al., 2006)
Envisat	~5 000	35	2002-2012	0.28 (Frappart et al., 2006)
Jason-1	~300	10	2002-2008	1.07 (Jarhani et al., 2013)
Jason-2	~300	10	2008-Presente	0.28 (Jarhani et al., 2013)
CryoSat-2	~300	369	2010-Presente	0.23 (Song et al., 2015)
SARAL/Altika	~173	35	2013-Presente	0.11 (Schwatke et al., 2015)

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 de saturação é provavelmente não confiável sobre cursos d'água (HALL et al., 2012).

Há um desenvolvimento de trabalhos na área altimetria laser de níveis d'água, seu uso é incomum. O objetivo geral desta pesquisa é descrever desenvolvimento de software para processamento de dados de altimetria do ICESat e avaliar sua potencialidade para aplicações em hidrologia.

2. Metodologia de Trabalho

Foi desenvolvida uma ferramenta (aplicativo ou *software*) para utilização dos dados de altimetria, através de uma rotina no Matlab de extração e visualização dos dados.

2.1 Tratamento dos Dados

Primeiramente, é necessário baixar os dados do site do *National Snow and Ice Data Centre* (NSIDC), disponível em <<http://nsidc.org/data/icesat/>> (ZWALLY, 2014). A *elevation-use flag* (*i_ElvuseFlg*) é 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. Após, os dados são convertidos do Elipsoide¹ T/P para o elipsoide do *World Geodetic System* de 1984 (WGS84), e então para o *datum* vertical *Earth Gravitational Model* de 1996 (EGM96). O Geoide² 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) 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 (*outliers*). Na tentativa de removê-los, um novo critério foi utilizado: comparar as medidas do ICESat com o SRTM. O estudo de Carabajal e Harding (2005) 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 *software* desenvolvido neste estudo, se a diferença for maior do que 50 m, a observação é removida. Após, desenha-se um polígono (*shapefile*, num *software* GIS, por exemplo) da região de interesse, aplica-se um buffer de 80 m (Segundo Hall et al. (2012), devido a erros de geolocalização do ICESat e resolução do footprint e da máscara d'água).

1 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)

2 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."

2.2 Estações Virtuais

Segundo Silva (2010), “Cada intersecção de um traço do satélite altimétrico com superfície reflexiva do plano de água consiste numa estação virtual, sendo potencialmente possível obter uma série temporal da altura do nível d'água”.

Para cada intersecção, o ICESatProcessor calculará a média, mediana e desvio padrão da série, e identificará os *outliers* de duas maneiras (além das já mencionadas): a) serão identificados e removidos os pontos com probabilidade de fazer parte da população menor ou igual a 5% (considerando uma distribuição normal); e b) observações fora do limite do quartil mais 1,5 vezes a amplitude interquartil.

2.3 Validação

Para validação dos dados do satélite ICESat, foi feita uma comparação das séries temporais obtidas via sensoriamento remoto com as estações fluviométricas da ANA. A escolha da observação de nível da ANA utilizada durante a comparação foi feita com base em Hall et al. (2012), utilizar a medida mais próxima no tempo da passagem do ICESat.

3. Resultados e Discussão

Primeiramente será mostrada a interface do software de processamento de dados do ICESat e os arquivos de saída e, após, a validação.

3.1 ICESatProcessor

A Figura 1 mostra a interface do ICESatProcessor. A interface foi toda escrita em inglês, para possibilitar a utilização no mundo todo. O pesquisador usuário poderá escolher: a) o período desejado; b) o local de estudo, de duas maneiras: i) indicando limites de latitude e longitude; ii) entrando com um desenho dos limites da sua região (*shapefile*); c) utilizar o SRTM como critério de remoção de pontos, ou não.

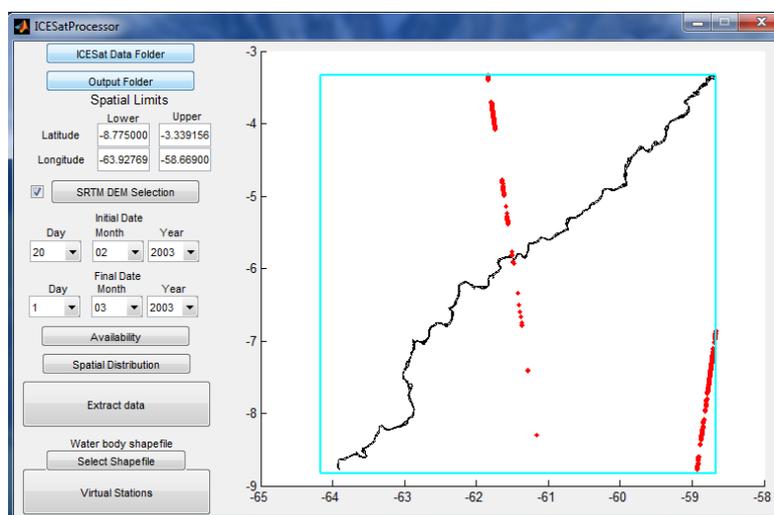


Figura 1 – Interface do programa. O quadrado azul claro é o limite da quadrícula do MDE da SRTM; os traços vermelhos, as passagens do ICESat; e os limites em preto, a delimitação do Rio Madeira.

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

3.1.1 Spatial Distribution

Na opção *Spatial Distribution* o usuário pode visualizar as órbitas do satélite sobre a região de interesse. Os dados não são tratados, apenas são extraídos para aquela área. A saída é um arquivo de texto com a informação da longitude; latitude; elevação; ano; mês e dia.

3.1.2 Extract Data

Neste botão o programa trata os dados, conforme descrito em 2.1. As saídas são três arquivos de texto: *READ-ME*; *Results*; e *ICESat and SRTM*. O arquivo *READ-ME* 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*. O arquivo *Results* tem o mesmo formato do *Spatial Distribution*. Já o arquivo de saída do tipo *ICESat and SRTM* traz: longitude; latitude; elevação do ICESat; elevação do SRTM; elevação utilizada; ano; mês e dia.

3.1.3 Virtual Stations

Semelhante ao *Extract Data*, além de tratar os dados e gerar o arquivo *READ-ME*, há mais dois documentos de texto, chamados *ResultsShapefile* e *Virtual Stations*. O primeiro é igual ao *Results*, entretanto somente com as observações no interior do polígono. O segundo é feito conforme 2.2. 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 onde foi feita a estação.

3.2 Validação

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 (situada entre as latitudes 9°44'S e 12°49'S e entre as longitudes 49°52'O e 50°44'O). 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 São Felix do Araguaia (lat. -11.618°, long. -50.661°), e desenhadas as margens do Rio (em preto na imagem). Após, aplica-se um *buffer* de 80 m (em azul), A média dos pontos dentro do *buffer*, em cada passagem, é o nível. Também foram obtidos os dados para outras duas estações da ANA, ao sul (Figura 2).

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 2.

Percebe-se que a estação virtual ao norte, a mais próxima, é a que obteve melhores resultados. As duas estações ao sul estão muito 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.

Tabela 2 - 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

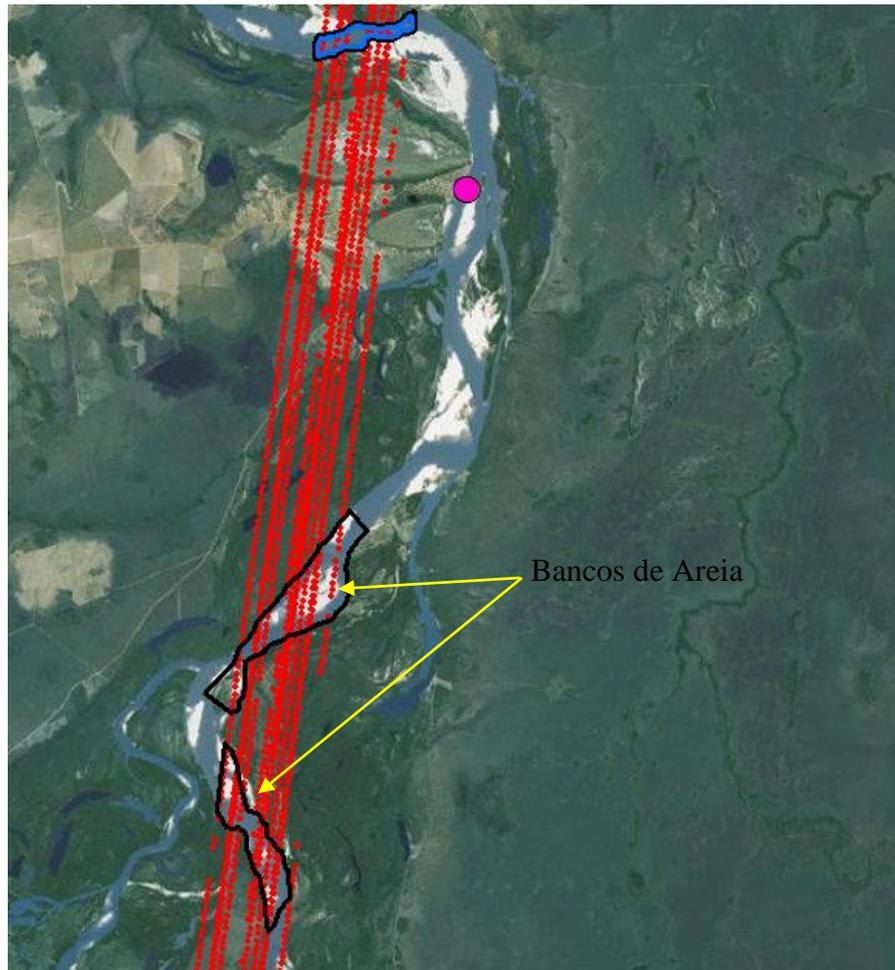


Figura 2 – Estação Virtual e a Estação da ANA

Abaixo na Figura 3 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.

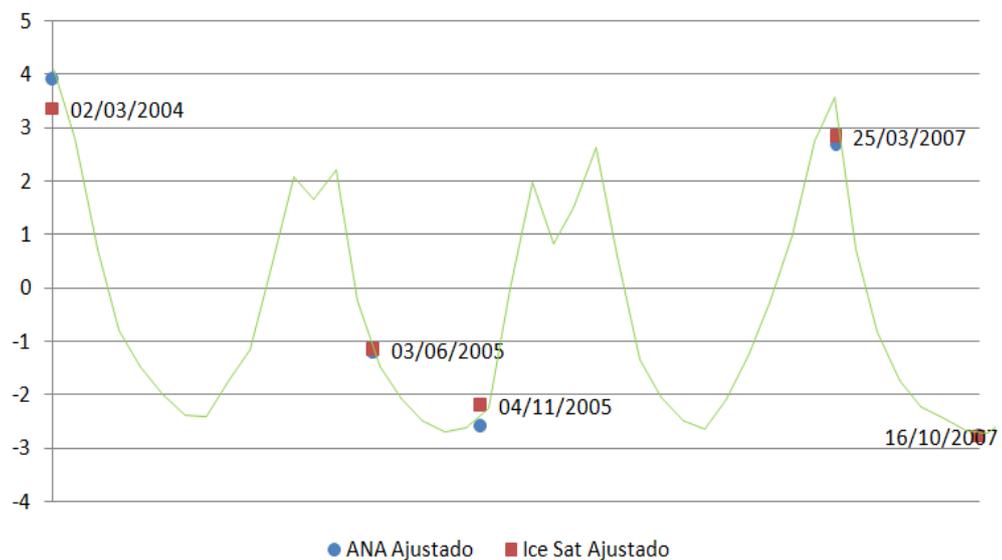


Figura 3 - Gráfico comparando estação virtual e a da ANA

4. Conclusões

O código e interface produzidos no matlab mostraram ser boas ferramentas para utilizar os dados do ICESat. 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.

Ainda 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.

Agradecimentos

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

Referências Bibliográficas

- Abdalati, W. et al. The ICESat-2 laser altimetry mission. **Proceedings of the IEEE**, v. 98.5, n. 5, p. 735-751, 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, 2005.
- 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.
- 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.
- 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.; Neal, J.; Yamazaki, D., Bates, P. ICESat derived inland water surface spot heights. **Water Resources Research**, Florida, v. 52, n. 4, p. 3276-3284, Abr. 2016.
- Schutz, B. E.; Zwally, H. J.; Schuman, 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
- Zwally, H. J. *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.