

Comparação das Variações do Nível Médio do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Maregrafia em Fortaleza – CE

Comparison of Variations of Mean Sea Level from Satellite Altimetry and Tide Gauge Data in Fortaleza – CE

Raiane Rintielle Vaz Menezes , Larissa Messias Souza  & Ítalo Oliveira Ferreira 

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, MG, Brasil

E-mails: rintielle@gmail.com; larissamessiass@gmail.com; italo.ferreira@ufv.br

Resumo

Historicamente as variações do nível médio do mar têm sido estimadas a partir de dados provenientes de marégrafos instalados na costa. No entanto, diante da dificuldade de obtenção de longas séries de dados maregráficos, vê-se como alternativa a utilização de dados de sensoriamento remoto por satélites altimétricos (ALTSAT). Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar as variações relativamente do Nível Médio do Mar (NMM) a partir de dados ALTSAT e de maregrafia. Para este propósito, obteve-se dados da missão CryoSat-2 e da estação maregráfica EMFOR (Fortaleza-CE), pertencente a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), referentes ao período entre fevereiro de 2011 e maio de 2019. A análise relativa procedeu-se pela estimativa mensal do NMM obtido a partir de ambas as técnicas. Os resultados demonstraram que a metodologia proposta é viável e pode ser empregada alternativamente ao uso de estações maregráficas, reduzindo sobretudo, os custos de levantamentos de campo. A técnica ALTSAT também permite estimativas para locais em que dados maregráficos são inexistentes ou de baixa acurácia. Comparativamente ao emprego de dados maregráficos coletados in loco, ALTSAT mostrou-se bastante eficiente neste estudo, apresentando uma discrepância média, mínima e máxima de, respectivamente, 4 mm, - 4 cm e 3,9 cm. Além disso, ambas as técnicas concordaram indicando uma elevação média do nível do mar no período analisado.

Palavras-chave: Nível Médio do Mar; Altimetria por Satélites; Maregrafia

Abstract

Historically, mean sea level changes have been estimated from tide gauge station data on the coast. However, given the difficulty of maintenance and obtaining long series of tide data, using remote sensing by satellite altimetry data (ALTSAT) it's as an excellent alternative to obtain oceanic information. In this sense, the present study aims to evaluate relatively the variations and elevation of Mean Sea Level (MSL) from ALTSAT and tide gauge observation. For this purpose, data from CryoSat-2 mission and tide gauge station EMFOR (Fortaleza-CE), belonging to the Permanent Tide Network for Geodesy (RMPG), for the period from February 2011 to May 2019 were used. The relative analysis proceeded by the monthly estimate of the MSL obtained from both techniques. The results showed that the proposed methodology is feasible and can be used alternatively to the use of tide stations, reducing mainly the costs of field surveys. The ALTSAT technique also allows estimates for locations where tide data are lacking or low accuracy. Compared to the use of tidal data collected in loco, the ALTSAT proved to be quite efficient in this study, presenting a mean, minimum and maximum discrepancy of, respectively, 4 mm, - 4 cm and 3.9 cm. In addition, both techniques they agreed to indicating an elevation in sea level for the period analyzed.

Keywords: Mean Sea Level; Satellite Altimetry; Tide Gauge

1 Introdução

O conhecimento do comportamento do nível do mar é de grande interesse para estudos sobre as mudanças do clima na Terra, para as populações que vivem em regiões costeiras e para a segurança das atividades relacionadas à navegação em geral. Em uma metodologia clássica, o nível do mar pode ser registrado, basicamente, por meio da aquisição de dados de marégrafos (de boia, pressão, digitais, radar ou a laser) e réguas (Cazenave & Nerem, 2004).

Tradicionalmente, a régua e o marégrafo são as principais fontes para o registro local das oscilações diárias do nível do mar, com consequente estimativas dos componentes harmônicas de maré. Estes instrumentos fornecem medições relativas da maré (em relação a costa terrestre). Porém, podem ser afetados pela movimentação da crosta, além de apresentar problemas espaciais de distribuição, ou seja, se localizam nas margens continentais, em ilhas que geralmente estão distantes entre si (Nerem & Mitchum, 2002; Woodworth & Player, 2003; Coelho, 2016).

A Altimetria por Satélite (ALTSAT) fornece medidas do nível absoluto do mar possibilitando, assim, a estimativa das marés de forma global. Apesar do ciclo de repetição, ou seja, a resolução temporal dos satélites serem de dias, suas observações são obtidas com alta resolução e essa viabilidade estimulou a comunidade científica a desenvolver melhorias na técnica ALTSAT, bem como na metodologia e modelagem das marés durante as últimas décadas (Nerem & Mitchum, 2001; Reis *et al.*, 2018).

A necessidade de se conhecer o nível médio e a variação do nível da água, é relevante em levantamentos hidrográficos, em projetos de engenharia desenvolvidos nas proximidades da costa oceânica no acompanhamento da evolução da linha de praia, entre outros. No entanto, em alguns locais não é possível obter dados mareográficos ou dispor de recursos financeiros para instalação de marégrafos ou réguas linimétricas. Logo, a obtenção do nível médio local e o conhecimento da variação do nível da água a partir da altimetria por satélites pode ser a resolução deste problema, pela obtenção de longas séries temporais e dados disponibilizados gratuitamente. Nos últimos anos vários estudos têm sido desenvolvidos com base em dados da altimetria por satélites, proporcionando conhecimento em escala global e regional (Dalazoana *et al.*, 2005; Reis *et al.*, 2018).

Daher *et al.* (2015) compararam três modelos clássicos de componentes da maré com componentes da maré extraídas de dados ALTSAT. A análise se deu através do método estatístico RSS (*Root Sum Squared*), resultando em diferenças de 12 cm nas regiões de águas profundas e exibiram resultados semelhantes em água rasas. Reis *et al.* (2018) discutiram qualitativamente

sobre a obtenção do nível médio do mar a partir da altimetria por satélites, visando a importância deste para a determinação da TNMM (Topografia do Nível Médio do Mar). Pajak & Kowalczyk (2018) avaliaram as variações sazonais do nível do mar no Mar Báltico a partir de dados ALTSAT no período entre 1993 e 2015. Os resultados foram comparados aos dados de marégrafos e apontam para diferenças nas amplitudes anuais entre a altimetria por satélite e o marégrafo, respectivamente, entre 0,33 cm e 1,53 cm. Da Silva e De Freitas (2019) analisaram a evolução temporal do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba a partir de séries temporais da associação de dados de posicionamento GNSS, observações mareográficas e altimetria por satélites (multimissões de 1991 a 2015). Os resultados se apresentaram em consonância com a visão de integração do IHRS (*International Height Reference System*) e evidenciaram uma taxa de elevação do NMM correspondente a +2,24 mm/ano para a região do *Datum*. Na Austrália, Karimi *et al.* (2020) utilizaram dados de sete anos da missão CryoSat-2 a fim de determinar a TNMM e comparar com dados de maregrafia e dois modelos de TNMM globais. Comparado aos modelos globais, a TNMM_{CryoSat-2} exibiu altos valores, justificado pela elevação do nível médio do mar; em relação aos dados mareográficos, a TNMM_{CryoSat-2} apresentou resultados semelhantes e estatisticamente melhores do que os modelos globais na representação regional.

Diante do exposto, este trabalho objetivou ampliar as possibilidades de obtenção de informações sobre o comportamento recente do nível do mar, como subsídio ao planejamento de usos e gestão da zona costeira. Para isso, foi realizada uma avaliação em relação ao uso de dados do satélite altimétrico CryoSat-2 na obtenção do nível médio do mar da estação mareográfica EMFOR (Fortaleza-CE) para uma série temporal de 9 anos (2011-2019).

2 Princípio da Altimetria por Satélite

A altimetria por satélites é uma técnica de sensoriamento remoto que tem sido aplicada com eficácia em monitoramentos da superfície do mar, rios, lagos, camadas de gelo e até mesmo da superfície terrestre (Bosch, 2003). O princípio de medida da ALTSAT é baseado na emissão de pulsos de energia na frequência das micro-ondas e mede o tempo desde a emissão até o retorno do sinal refletido pela superfície do mar. Em geral, o radar altímetro trabalha na Banda Ku, que tem uma frequência de aproximadamente 13,5 GHz, correspondendo a um comprimento de onda (λ) de aproximadamente 2,2 cm (Seeber, 2003).

Expressa-se a altitude (R) desde a antena do altímetro até a superfície do oceano conforme Chelton *et al.* (2001):

$$R = \frac{1}{2}c\Delta t - \sum \Delta e \quad (1)$$

em que:

c: velocidade de propagação da luz no vácuo;

Δt : tempo de percurso do sinal emitido e refletido;

Δe : correções necessárias.

A altitude (R) é estimada considerando que o sinal do radar se propaga com a velocidade da luz. No entanto, a velocidade de propagação do sinal na atmosfera sofre um atraso, resultando na superestimação da medida. Desta forma, por convenção, considera-se que todas as correções sejam positivas (Chelton et al., 2001).

O somatório das correções envolve uma série de correções necessárias para eliminar efeitos que afetam as medidas do altímetro e é expressa por Luz (2008):

$$\sum \Delta e = \sum e_{inst} + \sum e_{atm} + \sum e_{sup} + \sum e_{geof} \quad (2)$$

As principais correções instrumentais (e_{inst}) referem-se a distância entre o centro de fase da antena do radar e o centro de massa do satélite, à deriva do temporizador, às variações de atitude do satélite, às alterações de frequência do sinal refletido, aos ajustes introduzidos pelos próprios sistemas de coleta e tratamento do sinal refletido, embarcados no satélite (Chelton et al., 2001; Seeber, 2003). Segundo Luz (2008), estes últimos erros influenciam no momento de transição de superfície, por exemplo quando o satélite passa a receber sinais de retorno de áreas terrestres após ter sobrevoado a superfície oceânica, afetando assim as aplicações específicas da ALTSAT em áreas costeiras, como as pretendidas neste projeto.

A influência da ionosfera e troposfera na velocidade de propagação do sinal são as principais responsáveis pelos erros atmosféricos (e_{atm}). As correções de superfície (e_{sup}) faz referência a irregularidade da superfície oceânica em função das ondas, introduzindo um desvio em relação ao NMM instantâneo conhecido como SSB (*Sea State Bias*). Já as marés terrestres e oceânicas, o nível dinâmico do mar, as alturas geoidais e o efeito do barômetro inverso (variação da pressão atmosférica) representam as correções geofísicas (e_{geof}) (Seeber, 2003; Luz, 2008).

Conhecendo-se a órbita do satélite em relação a um elipsoide de referência, a altitude do satélite sobre um elipsoide de referência (h_{clip}) também é conhecida (Figura 1) e a partir desta é possível obter a altitude da superfície instantânea do mar (SSH – *Sea Surface Height*) pela Equação 3 (Seeber, 2003).

$$SSH = h_{clip} - R \quad (3)$$

Além do SSH outras informações a partir da medida do altímetro são comumente utilizadas em diversas

aplicações, conforme Equações 4, 5 e 6 (Biroi et al., 2004; Pajak & Kowalczyk, 2018):

$$SLA = SSH - MSS \quad (4)$$

$$ADT = SLA + MDT \quad (5)$$

$$MDT = MSS - N \quad (6)$$

em que SLA (*Sea Level Anomaly*) é anomalia do nível do mar, MSS (*Mean Sea Surface*) é a superfície média do mar, ADT (*Absolute Dynamic Topography*) é a topografia dinâmica absoluta e MDT (*Mean Dynamic Topography*) é a topografia do nível médio do mar. A altura geoidal (N) pode ser extraída de alguns modelos globais geopotenciais disponíveis, como, EGM2008, EIGEN-6C4 e GOCO05C.

3 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se dados da estação maregráfica EMFOR, localizado dentro das instalações do Porto de Macuripe em Fortaleza no Estado do Ceará (Figura 2).

Considerou-se os seguintes fatores para a determinação da área de estudos: i) a faixa litorânea do estado do Ceará ser em sua maioria linear, sendo interrompidas por apenas algumas pontas e promontórios que se projetam para o mar, como é o caso do Porto de Macuripe (local onde se encontra o marégrafo); ii) em razão da localização geográfica do marégrafo possuir baixa influência dos efeitos de borda do sensor ALTSAT na interface oceano/continente; iii) disponibilidade de longas séries temporais contínuas nas técnicas de ALSTAT e maregrafia; e por fim, iv) de acordo com o relatório do IBGE (2016), a EMFOR apresentou resultados favoráveis no Teste de *Van de Castele* indicando que não houve derivas nos seus sensores eletrônicos (radar, *encoder* e pressão).

A estação maregráfica de Fortaleza-CE (EMFOR) pertence à Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) e tem seus dados disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Todas as informações sobre o conjunto de dados do marégrafo de Fortaleza estão disponíveis no site da RMPG¹. A fim de possibilitar uma análise temporal, foram obtidos valores diários do nível do mar de fevereiro de 2011 a maio de 2019 e posteriormente calculado os valores do Nível Médio do Mar (NMM do inglês MSL - *Mean Sea Level*) mensais. Para isso, os dados maregráficos foram devidamente processados com vista a obter a média do NMM para cada mês.

¹ <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html?=&t=downloads>

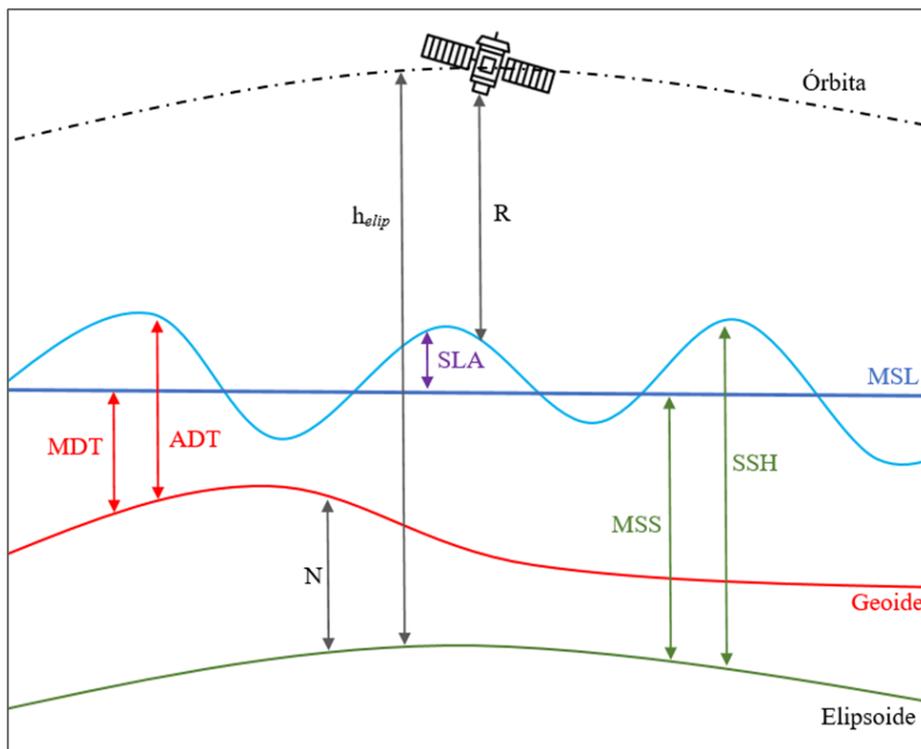


Figura 1 Diagrama das superfícies de referência e princípio da altimetria por satélites.



Figura 2 Localização do Porto do Macuripe e marégrafo EMFOR.

Além disso, utilizou-se as Topografias do Nível Médio do Mar (TNMM do inglês MDT - *Mean Dynamic Topography*) obtidas através do *Copernicus Marine and Environment Monitoring* (CMEMS) com uma resolução de 14 x 14 km. Estes dados são provenientes da missão CryoSat-2, possui correções nos efeitos atmosféricos (efeitos de ionosfera, troposfera seca e úmida) e geofísicos (correções de marés terrestres, oceânicas, polar, efeitos de cargas oceânicas e variações do estado do mar). As informações sobre as correções no conjunto de dados provenientes da técnica ALTSAT estão disponíveis no site da CMEMS². A Figura 3 apresenta a estação maregráfica de Fortaleza - CE (EMFOR) além das trilhas de dados da missão CryoSat-2 nas proximidades do marégrafo.

Os dados de ALTSAT são criptografados e se encontram disponíveis em extensão .nc (NetCDF - *Network Common Data Form*), sendo necessário aplicar um *software* específico para o tratamento dos mesmos. Para isto, utilizou-se o *software* BRAT (*Broadview Radar Altimetry Toolbox*) versão 4.2.1, no qual corresponde a um projeto conjunto entre a ESA (*European Space Agency*) e o CNES (*Centre National D'Etudes Spatiales*), que possibilitou o desenvolvimento de uma ferramenta de código aberto (GPL-3), disponível gratuitamente para a comunidade (Rosmorduc *et al.*, 2016).

Após a obtenção dos dados de TNMM do CryoSat-2 referentes ao período de fevereiro de 2011 a maio de 2019 na plataforma da CMEMS, seguiu-se o fluxograma das etapas de processamento no BRAT, conforme é apresentado na Figura 4.

Importou-se os arquivos com a extensão .nc para o BRAT e posteriormente aplicou-se filtros com as coordenadas geográficas no entorno do marégrafo de Fortaleza (Fuso 24S projetadas em SIRGAS2000), com a finalidade de extrair as informações de Latitude, Longitude e o TNMM apenas da região de interesse (Figura 5).

Posteriormente, estas informações foram exportadas em formato ASCII. Escolheu-se esta extensão devido a mesma ser compatível com o *software* ArcGIS v.10.5 que possibilitou a manipulação dos mesmos.

Devido as TNMMs, utilizadas neste artigo, possuírem uma resolução espacial de 14 km, desta forma, foi necessário estimar as lacunas entre as trilhas do satélite a partir de um interpolador. Para este propósito, fez-se uso do *software* ArcGis versão 10.5 da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), a fim de estimar os valores de TNMM não amostrados utilizando o interpolador Krigagem Universal. A vantagem da utilização deste interpolador

consiste, basicamente, na estimativa sem viés e com variância mínima (Matheron, 1967; Cressie, 1990). Além do mesmo se mostrar eficiente em estudos relacionados a levantamentos batimétricos, conforme demonstrou Ferreira (2018).

Após a interpolação dos dados de TNMM mensais dos 9 anos para o marégrafo EMFOR, realizou-se conforme Heiskanen & Moritz (1967), o cálculo da anomalia de altura ou altura quase-geoidal (ξ) por meio da diferença entre o valor da altitude geométrica (h_{GNSS}) e a altitude normal (H^N) ambas da estação RN-4336A³.

$$\xi = h_{GNSS} - H^N \quad (7)$$

A anomalia de altura, proposta por Molodensky (1958), é um elemento importante, pois permite a integração entre as superfícies de referências nas técnicas de maregrafia e ALTSAT. A maregrafia mede as variações do nível do mar em relação à uma superfície de referência local (nível médio do mar local), já a altimetria por satélite realiza as mensurações em relação a um elipsoide e modelo geoidal global. Sendo então, necessário compatibilizar as superfícies de referência das duas técnicas (Pajak & Kowalczyk, 2018). A Figura 6 ilustra o esquema de integração entre as técnicas de maregrafia e ALTSAT.

No entanto, essa compatibilização entre as superfícies é problemática, uma vez que os dados não se referem ao mesmo sistema de referência (Liebsch *et al.*, 2010). Uma opção para integrar as diferentes superfícies e obter o NMM é a aplicação da Equação 8 junto aos dados da técnica ALTSAT (Kuczynska-Sieghien *et al.*, 2016):

$$NMM = TNMM + \xi - \Delta H \quad (8)$$

em que:

ΔH : à diferença entre altura da Referência de Nível (RN) vizinha e ao marégrafo (valor extraído do relatório da RMPG⁴).

Neste artigo, foi feita a comparação dos resultados obtidos do NMM pelo marégrafo EMFOR em relação ao conjunto de pontos das trilhas do CryoSat-2 (a distância máxima entre as trilhas do satélite e o marégrafo foi de 14 km). Sendo assim, a partir das séries temporais mensais de ALTSAT e do marégrafo, foi possível analisar as alterações do NMM nas diferentes técnicas.

³ <http://www.bdg.ibge.gov.br/bdg/pdf/relatorio.asp?L1=4336A>

⁴ ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf

² <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>

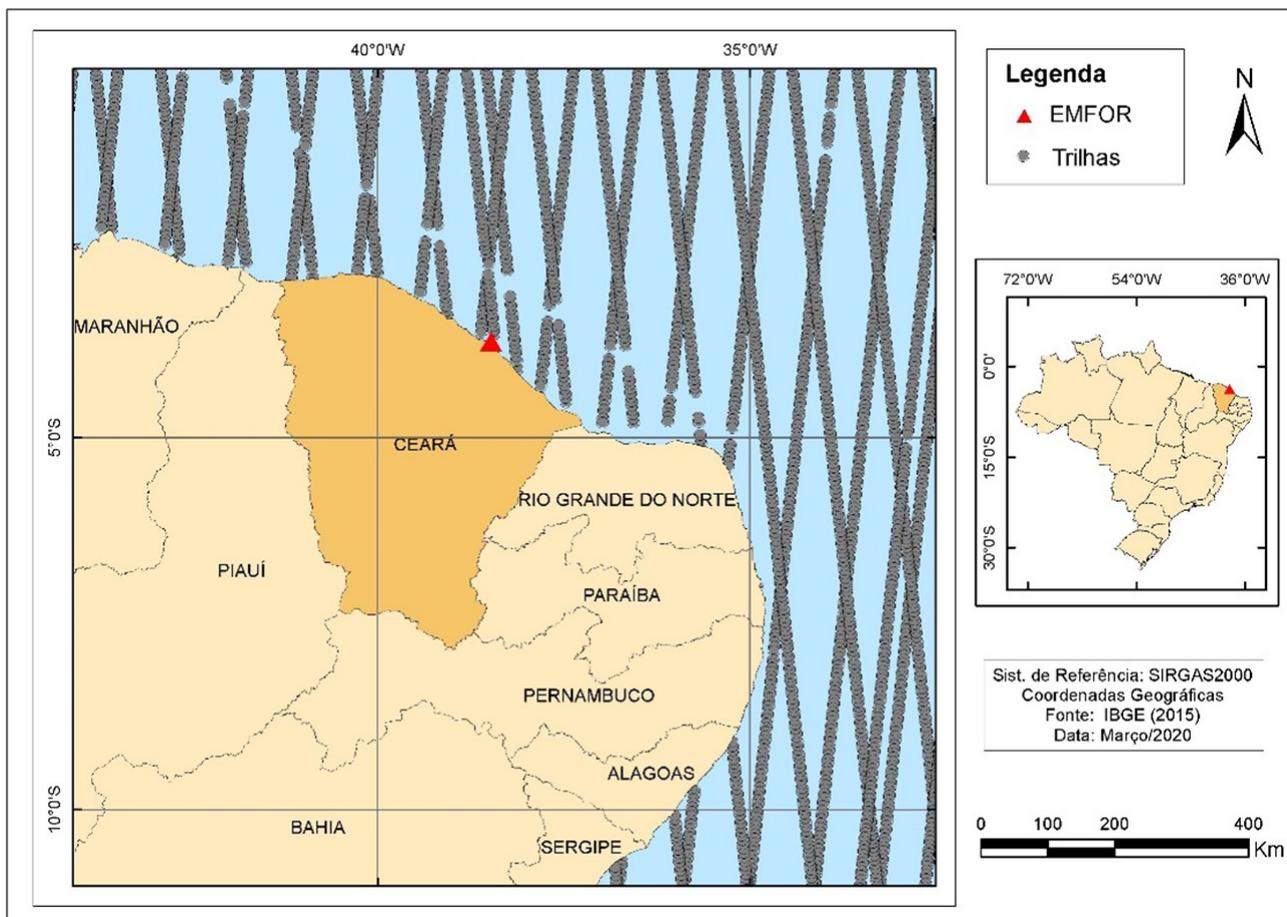


Figura 3 Representação do Marégrafo EMFOR e as trilhas do CryoSat-2 referentes a um mês de dados.

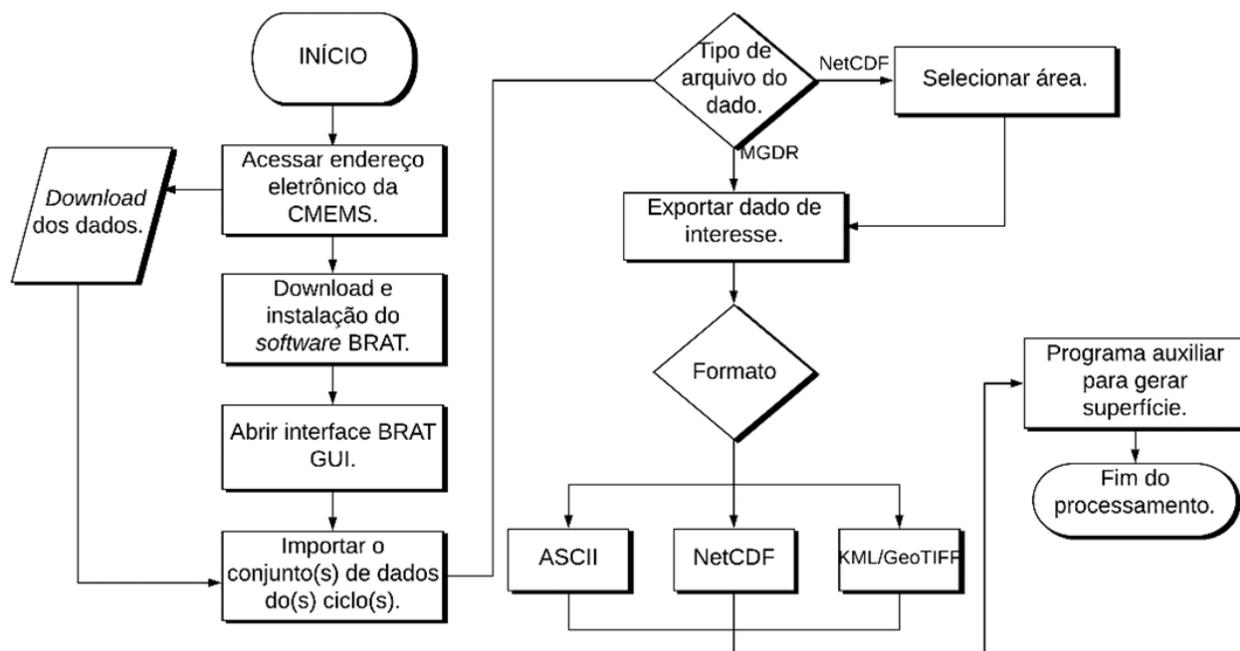


Figura 4 Fluxograma das etapas de processamento no *software* BRAT.

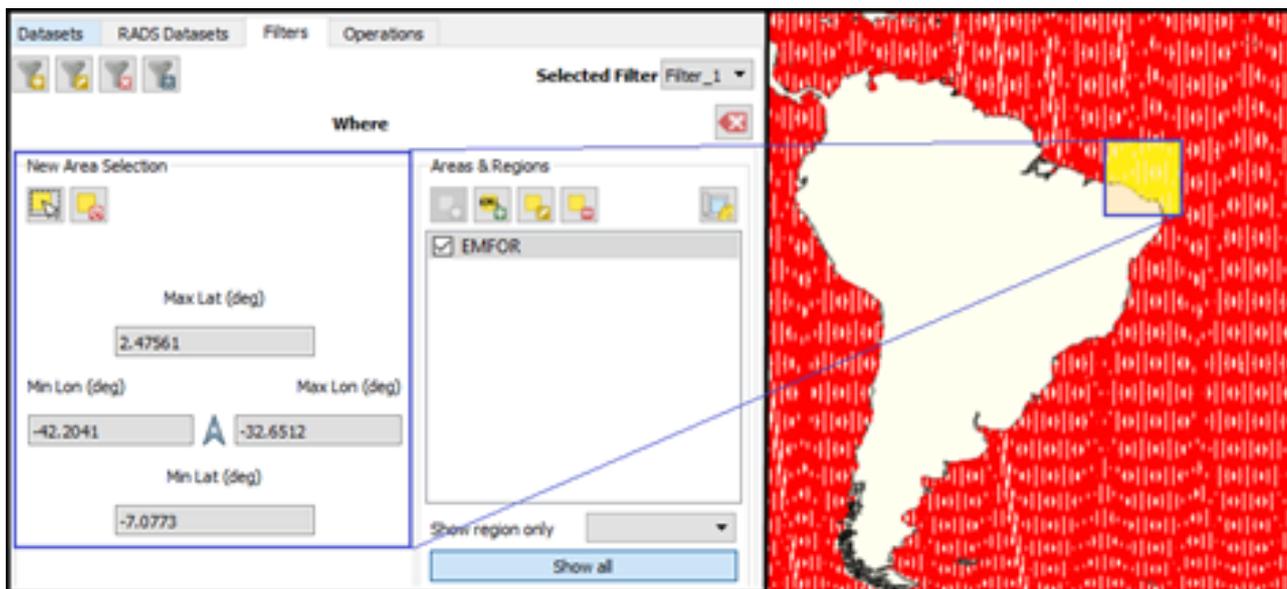


Figura 5 Visualização das trilhas do CryoSat-2 e aplicação do filtro na região do marégrafo EMFOR.

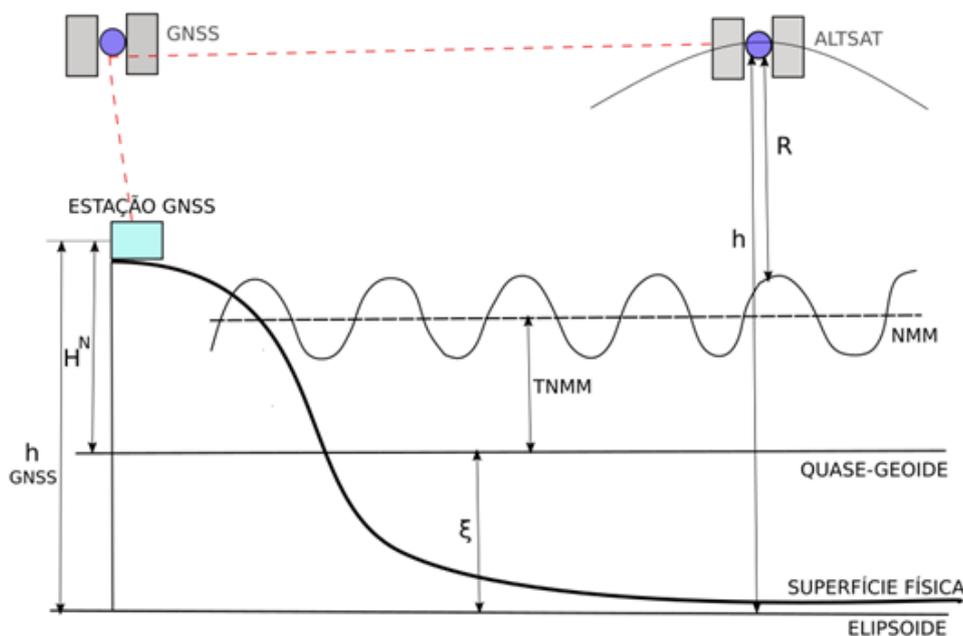


Figura 6 Esquema de uma estação maregráfica e medições com satélite altimétrico.

4 Resultados e Discussões

Da Silva & De Freitas (2019) evidenciaram que, ao realizar a comparação entre as técnicas de ALTSAT e maregrafia é importante levar em consideração duas situações: as observações maregráficas devem possuir a mesma amostragem dos satélites altímetros e; necessita-se

trabalhar com uma série temporal de pelo menos 5 anos de observações. Tais condições foram atendidas, uma vez que se utilizou dados mensais, para ambas as técnicas, ao longo de 2011 a 2019.

Os resultados referentes às médias mensais relativas do NMM obtidas por ALTSAT e o marégrafo da RMPG estão ilustrados através da Figura 7 e Tabela 1.

Tabela 1 Relatório estatístico do NMM através das técnicas ALTSAT e maregrafia em metros.

Estatística	ALTSAT	RMPG	Discrepância
Média	6,342	6,345	0,004
Mediana	6,342	6,346	0,005
Máximo	6,343	6,380	0,039
Mínimo	6,338	6,301	-0,041
Amplitude	0,005	0,079	0,080
Desvio Padrão	0,001	0,016	0,016

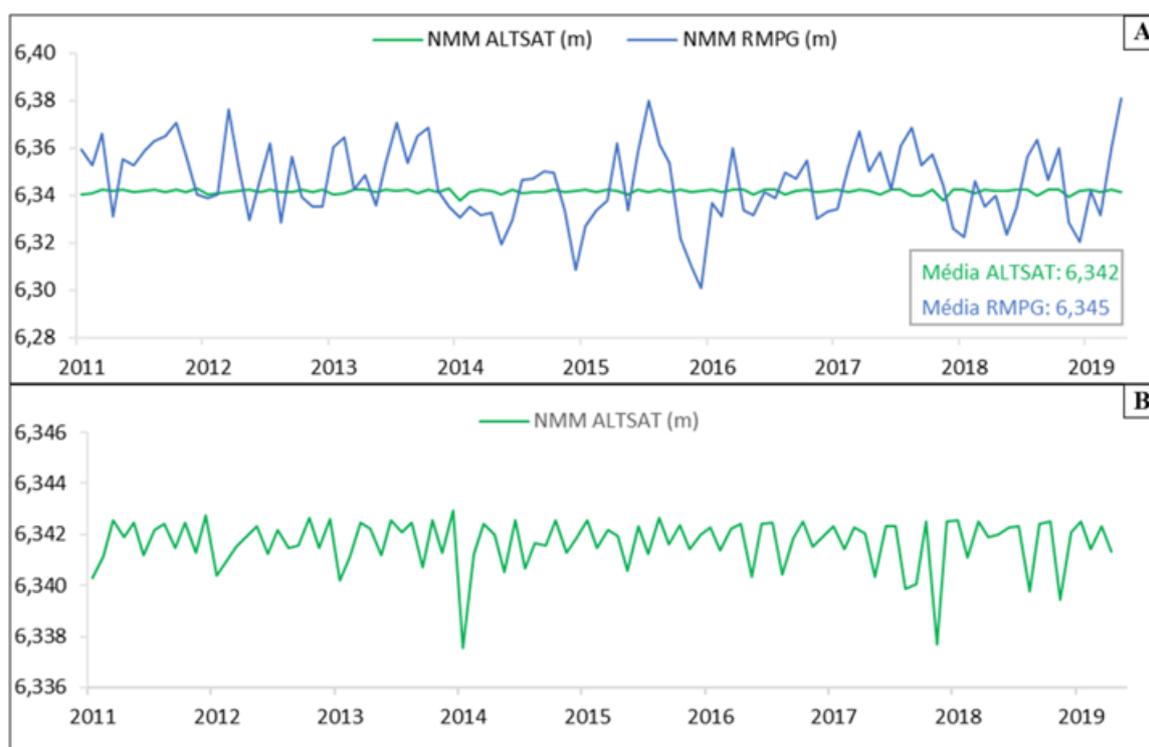


Figura 7 Comparação das variações do NMM através das técnicas: A) ALTSAT e maregrafia; B) Detalhe para a variação do NMM para ALTSAT.

A Figura 7A apresenta o comparativo das variações relativas do nível médio do mar local obtidos por ALTSAT e maregrafia. A Figura 7B se encontra em uma escala diferenciada, a fim de melhor ilustrar a variação dos valores de ALTSAT. Analisando a Figura 7, é possível identificar, para os dados maregráficos da estação EMFOR, picos mais discrepantes entre agosto de 2015, janeiro de 2016 e maio de 2019. Ressalta-se que os dados desta estação não passaram por filtragens, assim, eles refletem tanto a maré astronômica quanto a maré meteorológica que é ocasionada por efeitos meteorológicos, como, chuva, secas, tufões e outros. Desta forma, os picos evidenciados podem ser atribuídos a efeitos atmosféricos, em destaque o fenômeno oceânico-atmosférico *El Niño*, responsável pelo aquecimento da camada mais superficial do Oceano

Pacífico (Kayano *et al.*, 2016; Mohammadi & Goudarzi, 2018). De acordo com INPE (2020), a ocorrência deste evento foi identificada em 2015-2016 e classificado de forte intensidade em função da escala do CPC/NCEP/NOAA⁵. Este efeito provoca secas severas na região Nordeste do Brasil, fato que justifica o ponto discrepante de janeiro de 2016 (4,5 cm em relação à média RMPG).

O pico referente a agosto de 2015 (3,4 cm em relação à média RMPG) não foi possível relaciona-lo ao fenômeno *El Niño* e a qualquer outro efeito meteorológico investigado

⁵ *Climate Prediction Center (CPC), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/>.*

na região. Segundo Martins & Vasconcelos Júnior (2017) a região Nordeste do país sofreu uma severa seca com duração de 2012 a 2016, tendo seu ápice entre os anos de 2014 a 2016, logo este pico apresenta comportamento controverso ao esperado, podendo este estar associado a movimentação atípica do Porto. Em contrapartida o primeiro semestre de 2019 foi marcado por fortes chuvas registradas, sendo considerado o mais chuvoso nos últimos anos (Monteiro & Zanella, 2019). Fato que é explicitado pelo pico em maio de 2019 (Figura 7A).

Já os picos observados na Figura 7B, são suaves apresentando aproximadamente 5 mm de discrepância em relação à média ALTSAT. Além disso, ao analisar também a Figura 7A pode-se identificar correspondência no comportamento dos dados do marégrafo, desta forma, admite-se que ambas as técnicas foram influenciadas provavelmente por forças astronômicas.

A partir da Tabela 1 é possível identificar maior diferença nos valores de máximo e mínimo para dados da RMPG, quando comparado à ALTSAT. Essa diferença é evidenciada pelas amplitudes de 0,005 m e 0,079 m para ALTSAT e maregrafia, respectivamente. Esta disparidade se deve, sobretudo, devido aos dados ALTSAT serem acrescidos de diversas correções, como, dos efeitos atmosféricos (ionosfera, troposfera seca e úmida) e geofísicos (correções de marés terrestres, oceânicas, polar, efeitos de cargas oceânicas e variações do estado do mar) (AVISO, 2020). Já os dados de maregrafia foram submetidos apenas a eliminação de dados espúrios e outliers, assim, não havendo correções e suavizações, estando em seu valor puro. O desvio padrão reflete a dispersão de um conjunto de dados, caracterizando a confiabilidade deste conjunto (Tabela 1). Desse modo, esta estatística também reflete o que discuti-se anteriormente, que ALTSAT apresenta menor dispersão nos valores em relação aos dados do marégrafo, possivelmente devido suas correções.

Uma das justificativas para tal discrepância entre as técnicas dá-se pelo fato dos dados maregráficos necessitarem

de correções nos movimentos verticais, ocasionados por marés terrestres, movimentos tectônicos, isostasia, efeitos de carga e movimentos artificiais (induzidos pelo Homem), que por sua vez, influenciam diretamente nos registros maregráficos. As correções dos efeitos relacionados aos movimentos verticais podem ser realizadas a partir de técnicas geodésicas espaciais ou de modelos de recuperação pós-glacial (Barbosa, 2005).

Os maiores e menores valores de discrepância (0,039 m e -0,041 m, respectivamente) foram identificados nos picos correspondentes a agosto de 2015 e janeiro de 2016 (Figura 7 e Tabela 1). Logo, reafirma-se que pode ter sofrido influências de efeitos climáticos anômalos (Kayano et al., 2016).

Apesar dos dados das duas técnicas analisadas apresentarem discrepâncias centimétricas, a média de todas as discrepâncias foi de apenas 4 mm (Figura 7 e Tabela 1). Além disso, identifica-se que ambas as técnicas apresentaram valores de média e mediana aproximadas (Figura 7 e Tabela 1). De forma geral, os valores do NMM encontrado em ambas as técnicas condizem com a cota média de 6,342 m, indicada no relatório da RMPG (IBGE, 2016).

Posteriormente, buscou-se analisar o comportamento da elevação do nível do mar a partir das técnicas de maregrafia e ALTSAT, durante o período de pesquisa (fevereiro de 2011 a maio de 2019). Desta maneira, os resultados da elevação, bem como as variações totais e anuais médias em milímetros são apresentadas pela Tabela 2 e Figura 8.

Os dados maregráficos da RMPG apresentaram maiores taxas da elevação do nível do mar nos anos de 2011 (-18,642 mm), 2014 (-26,763 mm), 2016 (32,108 mm) e 2019 (60,228 mm), conforme Figura 8 e Tabela 2. Em relação à técnica ALTSAT os anos que apresentaram resultados mais expressivos foram: 2011 (2,491 mm), 2014 (-1,050 mm), 2017 (0,551 mm) e 2019 (-0,763 mm), conforme Tabela 2 e Figura 8.

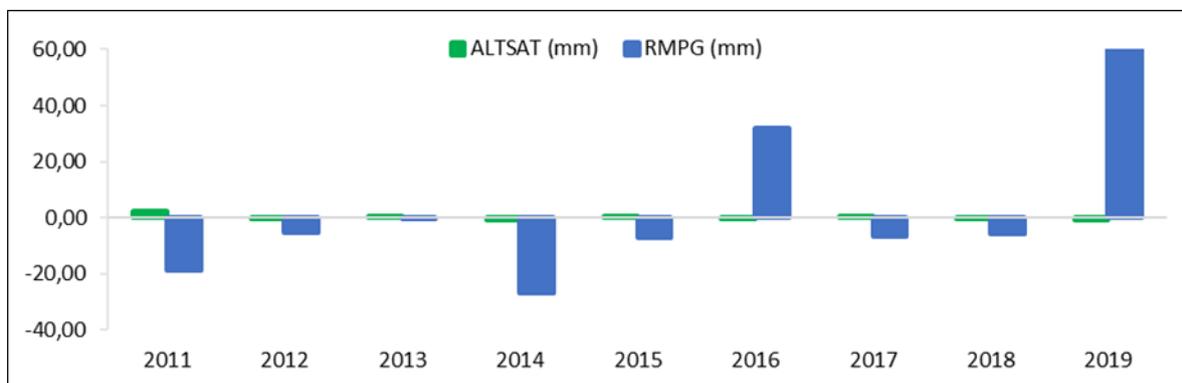


Figura 8 Elevação em milímetros do Nível do Mar com ambas as técnicas.

Tabela 2 Elevações do nível do mar para as técnicas de ALTSAT e maregrafia em milímetros.

Referência	ALTSAT (mm)	RMPG (mm)
2011	2,491	-18,642
2012	-0,142	-5,188
2013	0,302	-0,184
2014	-1,050	-26,763
2015	0,120	-7,362
2016	-0,048	32,108
2017	0,551	-6,855
2018	-0,425	-5,666
2019	-0,763	60,228
MÉDIA	0,115	2,409
TOTAL	1,036	21,677

A desigualdade nos valores de elevação das duas técnicas está relacionada à técnica ALTSAT conter diversas correções em seus dados, influenciando desta forma em valores suavizados. O mesmo não ocorre com as informações do marégrafo EMFOR, o qual apresenta elevações acentuadas, uma vez que estes dados não receberam nenhuma correção, assim evidenciando, principalmente, a maré meteorológica oriunda de cargas pluviométricas da região de Fortaleza.

Vale realçar que o período chuvoso no território do Ceará compreende, essencialmente, o quadrimestre fevereiro-maio, podendo-se estender até início de julho em anos mais chuvosos (Monteiro & Zanella, 2019). Isto posto, o ano de 2019 foram considerados apenas 5 meses de dados (janeiro a maio), sendo os meses com registros de fortes chuvas na região o que conseqüentemente a não análise dos dados do ano completo influenciou na maior variação do nível do mar (60,228 mm).

Ao comparar as duas técnicas, percebe-se que no geral houve uma variação do nível do mar bastante acentuada nos dados de maregrafia pertencentes à RMPG com uma elevação total de 21,677 mm, durante o período de pesquisa, com a variação anual média de 2,409 mm. Por outro lado, a técnica ALTSAT resultou em elevação total de 1,036 mm e uma variação anual média de 0,115 mm. Alguns autores, como Calado *et al.* (2018), obtiveram uma variação anual média de 2,2 mm/ano no período de 2008-2015 e 0,6 mm/ano no período de 2008-2018 para a mesma estação (EMFOR). Vale ressaltar que estes autores realizaram correções e filtragens nos dados da estação maregráfica, o que não ocorreu para esta pesquisa, podendo-se assim explicar a pequena diferença entre as variações anuais em ambos os trabalhos.

5 Considerações Finais

Neste trabalho foi realizada a comparação das variações do NMM por meio das técnicas de ALTSAT e maregrafia para a estação maregráfica de Fortaleza-CE (EMFOR). Por meio dos resultados obtidos, pode-se verificar que a técnica ALTSAT pode ser empregada em alternativa à instalação de estações maregráficas. Numa análise comparativa, ambas as técnicas concordam, indicando uma elevação do nível do mar para o período analisado. Além disso, os dados apresentam conformidade com o valor médio do nível do mar de 6,342 m, indicado pelo relatório da RMPG (IBGE, 2016), sendo a média obtida por ALTSAT de 6,342 m e 6,345 m para os dados maregráficos.

As discrepâncias identificadas devem-se ao fato da não aplicação, proposital, de filtros e correções nos dados provenientes do marégrafo EMFOR, onde foram realizados apenas procedimentos de exclusão de valores espúrios e *outliers*, visando comparar as técnicas ALTSAT e os dados brutos de maregrafia na estimativa do NMM.

Pode-se, também, constatar algumas vantagens na utilização da técnica de Altimetria por Satélites (ALTSAT). A primeira se refere a possibilidade de um monitoramento do nível do mar em caráter global, sem a necessidade da instalação de marégrafos. Outra vantagem corresponde ao fato de os dados serem gratuitos e acrescidos de correções geofísicas e eletromagnéticas (AVISO, 2020). Logo, as observáveis ALTSAT se apresentam como uma ótima alternativa para a obtenção de informações sobre o comportamento recente do NMM.

É importante considerar que neste estudo se utilizou apenas dados da missão CryoSat-2. Para maiores

análises do NMM seria necessário aumentar a quantidade de observações através da utilização de outras missões, considerando assim, a variabilidade da região (Dalazoana et al., 2005; Da Silva & De Freitas, 2019). Diante do exposto, recomenda-se para trabalhos futuros que seja investigado a relação entre dados multimissões de satélites altimétricos e dados maregráficos devidamente corrigidos, principalmente, de movimentos verticais.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Viçosa através do Departamento de Engenharia Civil, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que disponibilizou seus equipamentos, instalações e aplicativos computacionais, além do apoio à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de Mestrado concedida ao segundo autor.

7 Referências

- AVISO. 2020. Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data. Disponível em: <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- Barbosa, S.A. 2005. *Sea Level Change in the North Atlantic from Tide Gauges and Satellite Altimetry*. Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Tese de Doutorado, 284p.
- Birol, F.; Brankart, J.M.; Castruccio, F.; Brasseur, P. & Verron, J. 2004. Impact of Ocean Mean Dynamic Topography on Satellite Data Assimilation. *Marine Geodesy*, 27: 59–78.
- Bosch, W. 2003. Geodetic Application of Satellite Altimetry. In: HWANG, C.; SHUM, C. K. & LI, J. C. (ed.). *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*. International Association of Geodesy Symposia, v. 126. Springer, p 3-21.
- Calado, L.G.L.P.; Garnés, S.J.A. & Jamur, K.P. 2018. Análise da Estação Maregráfica de Fortaleza para Determinar as Variações do Nível do Mar. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, Recife, 2018. Anais, UFPE, p. 461-470.
- Cazenave, A. & Nerem, R.S. 2004. Present-day Sea Level Change: Observations and Causes. *Reviews of Geophysics*, 42(3): 1-20.
- Chelton, D.B.; Ries, J.C.; Haines, B.J.; FU, L-L. & Callahan, P.S. 2001. Satellite Altimetry. In: FU, L-L & CAZENAVE, A. (ed.). *Satellite Altimetry and Earth Sciences*, Academic Press, p. 1– 131.
- Coelho, A.L. 2016. *Método de Previsão de Maré Oceânica, Utilizando Análise Harmônica em Séries de 18,69 anos*. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. Dissertação de Mestrado, 114p.
- Cressie, N. 1990. The Origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22(3): 239-252.
- Daher, V.B.; Paes, R.C.O.V.; França, G.B.; Alvarenga, J.B.R. & Teixeira, G.L.G. 2015. Extraction of Tide Constituents by Harmonic Analysis Using Altimetry Satellite Data in the Brazilian Coast. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32: 614–626.
- Dalazoana, R.; Luz, R.T. & Freitas, S.R.C. 2005. Estudos do MSL a Partir de Séries Temporais Maregráficas e de Altimetria por Satélites Visando a Integração da Rede Vertical Brasileira ao SIRGAS. *Revista Brasileira de Cartografia*, 57(02): 140-153.
- Da Silva, L.M. & De Freitas, S.R.C. 2019. Análise de Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. *Revista Cartográfica*, 5(98): 33-57.
- Ferreira, Í.O. 2018. *Controle de Qualidade em Levantamentos Hidrográficos*. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Tese de Doutorado, 223p.
- Heiskanen, W.A. & Moritz, H. 1967. *Physical Geodesy*. São Francisco, W.H. Freeman Company, 374p.
- IBGE. 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015. Rio de Janeiro – RJ, 65p.
- INPE. 2020. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. El Niño e La Niña. CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: mai. 2020.
- Karimi, A.A.; Andersen, O.B. & DENG, D. 2020. Mean Sea Surface and Mean Dynamic Topography Determination from Cryosat-2 Data around Australia. *Advances in Space Research*. doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.009.
- Kuczynska-Siehien, J.; Lyszkowicz, A.; Stepniak, K. & Krukowska, M. 2016. Determination of Geopotential Value W_0^L at Polish Tide Gauges from GNSS Data and Geoid Model. *Acta Geodaetica Geophys*. 52: 527-534. doi.org/10.1007/s40328-016-0188-y.
- Kayano, M.T.; Andreoli, R.V.; Souza, R.A.F.; Garcia, S.R. & Calheiros, A.J.P. 2016. El Niño e La Niña dos Últimos 30 Anos: Diferentes Tipos. *Revista Climática - Edição Comemorativa de 30 anos*, 6p.
- Liebsch, G.; Novotny, K.; Dietrich, R. & Shum, C.K. 2010. Comparison of Multimission Altimetric Sea-Surface Heights with Tide Gauge Observations in the Southern Baltic Sea. *Marine Geodesy*, 25(3): 213–234.
- Luz, R.T. 2008. *Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS*. Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 228p.
- Martins, E.S.P. & Vasconcelos Júnior, F.C. 2017. O Clima da Região Nordeste entre 2009 e 2017: Monitoramento e Previsão. *Parcerias Estratégicas*, 22(44): 63-69.
- Matheron, G. 1967. Kriging or Polynomial Interpolation Procedures. *CIMM Transactions*, 70: 240-244.
- Mohammadi, K. & Goudarzi, N. 2018. Study of Inter-Correlations of Solar Radiation, Wind Speed and Precipitation Under the Influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California. *Renewable Energy*, 120: 190-200.
- Molodensky, M.S. 1958. New Methods of Studying the Figure of the Earth. *Bulletin Géodésique*, 50(1):17-21. doi.org/10.1007/BF02537957

- Monteiro, J.B. & Zanella, M.E. 2019. Eventos Extremos no Estado do Ceará, Brasil: Uma Análise Estatística de Episódios Pluviométricos no Mês de Março de 2019. *GeoTextos*, 15(2): 149-173.
- Nerem, R.S. & Mitchum, G.T. 2001. Sea level change, In: FU, L-L & CAZENAVE, A. (ed.). *Satellite Altimetry and Earth Sciences*, Academic Press, p. 329-349.
- Nerem, R.S. & Mitchum, G.T. 2002. Estimates of Vertical Crustal Motion Derived from Differences of TOPEX/POSEIDON and Tide Gauge Sea Level Measurements. *Geophysical Research Letters*, 29(19): 40-41.
- Pajak, K. & Kowalczyk, K.A. 2018. Comparison of Seasonal Variations of Sea Level in the Southern Baltic Sea from Altimetry and Tide Gauge Data. *Advances in Space Research*, 63(5): 1768-1780.
- Reis, V.P.; Palmeiro, A.S. & Barbosa, L.G. 2018. Estudo da Obtenção do Nível Médio do Mar com Altimetria por Satélites. *Revista Brasileira de Geomática*, 6(1): 3-22.
- Rosmorduc, V.; Benveniste, J.; Bronner, E.; Dinardo, S.; Lauret, O.; Maheu, C.; Milagro, M.; Picot, N.; Ambrozio, A.; Escolà, R.; Garcia-mondejar, A.; Restano, M.; Schrama, E. & Terra-Homem, M. 2016. *Radar Altimetry Tutorial*, 357p.
- Seeber, G. 2003. *Satellite Geodesy, 2º Completely Revised and Extended Edition*. Berlin, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, 589p.
- Woodworth, P.L. & Player, R. 2003. The Permanent Service for Mean Sea Level: An Update to the 21st Century. *Journal of Coastal Research*, 19(2): 287-295.

Recebido em: 07/06/2020

Aprovado em: 03/01/2021

Como citar:

Menezes, R.R.V.; Souza, L.M. & Ferreira, I.O. 2021. Comparação das Variações do Nível Médio do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Maregrafia em Fortaleza – CE. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44: 35347. DOI 1982-3908_2021_44_35347