

Estimativas da Topografia do Nível Médio do Mar na costa brasileira por meio da Altimetria por Satélites

Estimates of Average Mean Dynamic Topography on the Brazilian coast using Satellite Altimetry

Larissa Messias de Souza¹; Regiane Dalazoana²; Tulio Alves Santana³

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: larissamessias@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7767-1131>

² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: regiane@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-0679>

³ Instituto Federal do Mato Grosso, Departamento de Infraestrutura, Cuiabá/MT, Brasil. Email: tulio.santana@ifmt.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4429-9409>

Resumo: O presente estudo tem como objetivo a obtenção de valores de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) gerados a partir de produtos de altimetria por satélites, por meio das missões Sentinel-6A, CryoSat-2 e dados globais oceânicos de Altitudes da Superfície do Mar e variáveis derivadas, do inglês, Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights and Derived Variables, gerados a partir de uma solução multimissões. As variações da TNMM foram estimadas para quatro estações maregráficas pertencentes à Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Estas estações estão localizadas ao longo da costa brasileira em Fortaleza-CE, Salvador-BA, Macaé-RJ e Imbituba-SC. Foi utilizado o software BRAT para extrair os parâmetros geofísicos de anomalia do nível do mar e topografia dinâmica absoluta, e a partir desses, estimou-se a TNMM e suas variações temporais para as quatro estações maregráficas. Esses resultados foram comparados entre si por meio do cálculo das discrepâncias e com base em critérios da estatística descritiva. Os resultados demonstram a contribuição para a literatura ao explorar a solução multimissões, destacando o potencial da missão Sentinel-6A, uma vez que, a mesma obteve menores discrepâncias ao serem comparadas com o CryoSat-2 e a solução multimissões.

Palavras-chave: Radar de Abertura Sintética; Rede Maregráfica Permanente para Geodesia; Missões Altimétricas.

Abstract: The present study aims to obtain the Mean Dynamic Topography (MDT) values generated from satellite altimetry products, through the Sentinel-6A, CryoSat-2 missions and data from Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights and Derived Variables. MDT variations were estimated for four tide gauge stations belonging to the Permanent Tidal Network for Geodesy (RMPG), maintained by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). These stations are located along the Brazilian coast in Fortaleza-CE, Salvador-BA, Macaé-RJ and Imbituba-SC. The BRAT version 4.2.1 software was used to extract the geophysical parameters of Sea Level Anomaly (SLA) and Absolute Dynamic Topography (ADT), and, from this, the MDT was estimated for the four tide stations. Finally, it was possible to obtain the monthly variations for the Sentinel-6A, CryoSat-2 missions and the multi-mission altimetry. These results were compared with each other by calculating the discrepancy and based on descriptive statistics criteria. The results demonstrate the contribution to the literature when exploring the multi-mission solution, highlighting the potential of the Sentinel-6A mission, since it obtained smaller discrepancies when compared with CryoSat-2 and the multi-mission solution.

Keywords: Synthetic Aperture Radar; Permanent Tideographic Network for Geodesy; Altimetry Missions.

1. Introdução

O modelo geoidal, refere-se à representação física que melhor descreve a forma real da Terra e que se aproxima da superfície do Nível Médio do Mar (NMM), estendido sob os continentes, sem flutuações causadas por correntes, ventos, densidade da água e outros distúrbios. O conhecimento preciso do geoide vem sendo alvo de diversos estudos no âmbito da Geodésia, com uma série de implicações práticas em algumas áreas, como por exemplo: geociências e engenharia (DREWES, 2006; HOFMANN-WELLENHOF e MORITZ, 2006).

Destaca-se a importância de sua determinação na implementação dos sistemas de altitudes, que por sua vez, requerem a definição e materialização de pontos na superfície terrestre em relação a um referencial vertical com sentido físico. Outro contexto, refere-se ao estudo da superfície do NMM e consequentemente seu interesse para estudos relacionados a mudanças climáticas e segurança da navegação (DA SILVA e DE FREITAS, 2019; SOUZA e FERREIRA, 2021).

Com a evolução tecnológica, a partir da década de 1980, e o advento das modernas técnicas espaciais de posicionamento foi evidenciado que existe uma discrepância entre o geoide e o NMM, sendo esta chamada de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM), do inglês *Mean Dynamic Topography* (MDT) (DA SILVA e DE FREITAS, 2019). As informações acerca da TNMM são cruciais em diversos estudos, como por exemplo: mudanças climáticas e elevação do NMM, desempenhando papel fundamental em disciplinas como a Oceanografia e Climatologia (LYU *et al.*, 2016; WU *et al.*, 2022).

A modelagem da TNMM associada ao monitoramento do NMM e de outras componentes oceanográficas, contribui em atividades humanas, como a pesca, exploração de petróleo/gás, desenvolvimento econômico e construção de engenharia offshore (XU, YUANRONG e WEI, 2016, p. 03). Segundo Smith e Kirwan (2021), a TNMM influencia no ciclo costeiro do carbono, na salinização dos sistemas de água doce e no ambiente ecológico marinho. A TNMM também afeta a mudança do litoral e a erosão costeira, e pode fornecer uma base de decisão científica para a proteção ambiental e gestão das áreas costeiras (WEISSE *et al.*, 2021, p. 872).

Devido à sua aplicação e a disponibilidade de informações, tanto de dados mareográficos quanto de dados provenientes da Altimetria por Satélites (ALTSAT), vários estudos vêm sendo desenvolvidos, conforme mostram Kubryakov e Stanichny (2011), que analisaram e compararam os valores de TNMM no Mar Negro, obtidos a partir de dados de altimetria, medições de velocidades provenientes de boias flutuantes e dados de hidrologia. Os resultados obtidos pelos autores mostraram boa coincidência quantitativa e qualitativa em toda a bacia do Mar Negro ao comparar todas as técnicas.

Rio *et al.*, (2014), estimaram valores de TNMM para a região do Mar Mediterrâneo a partir de dados da ALTSAT e maregrafia costeira, os autores concluíram que as principais correntes e estruturas estacionárias do Mar Mediterrâneo foram bem avaliadas ao comparar os dados de TNMM no modelo SMDT07 e informações mareográficas. Já os autores Soto-Mardones *et al.*, (2023), avaliaram o uso conjunto de dados da TNMM com informações de temperatura e ventos, na investigação do efeito da plataforma continental e formato da costa nos padrões oceanográficos sazonais na costa norte do Pacífico Tropical Oriental. Nesse estudo, os resultados demonstraram a eficiência da ALTSAT ao indicar o aquecimento da temperatura da superfície do mar e a influência de ventos resultantes na área de estudo.

Sob uma ótica clássica, a determinação da TNMM em regiões costeiras é feita a partir de dados mareográficos. De acordo com Karimi, Andersen e Deng (2020), apesar da densificação das técnicas espaciais, utilizando satélites altimétricos, o uso de dados de maregrafos localizados ao longo da costa compõe a principal metodologia para estimativa da TNMM. Porém, o uso exclusivo de dados mareográficos caracteriza-se como uma abordagem local, dada a distribuição geográfica das estações mareográficas e a quantidade de estações com longa série temporal de observações. Devido à dificuldade de manter e recuperar longas séries de dados mareográficos, a utilização da ALTSAT tem sido uma alternativa na obtenção de informações oceânicas, uma vez que, possui disponibilidade global, gratuita e longas séries temporais, por meio da combinação de diferentes missões altimétricas (DALAZOANA, 2006).

Desta forma, sob uma ótica moderna, o uso de dados da ALTSAT permite uma abordagem global na estimativa da TNMM, dada a cobertura dos satélites altimétricos, principalmente quando dados de diferentes missões são empregados de forma conjunta. As aplicações da ALTSAT tomaram impulso a partir do lançamento da missão Topex/Poseidon, em 1992. Mais recentemente, o avanço da tecnologia de Radar de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR) e sua aplicação em missões ALTSAT possibilitaram uma melhor resolução espacial no mapeamento das altitudes do nível do mar em escala global, superando a precisão alcançada pelos sistemas ALTSAT convencionais. Assim, as missões altimétricas equipadas com tecnologia SAR representam um avanço significativo na melhoria da precisão dos modelos costeiros de NMM e TNMM, ao serem integradas com observações mareográficas (IDŽANOVIĆ, OPHAUG e ANDERSEN, 2017; SOUZA e FERREIRA, 2021).

Considerando a aplicação de dados da ALTSAT provenientes da tecnologia SAR, pode-se citar o trabalho de Wu *et al.* (2022), que analisaram a TNMM utilizando dados de altimetria SAR na costa do Japão e no sudeste da China. Os autores observaram que o desvio padrão das diferenças entre a TNMM modelada a partir do DTU21MSS (modelo gerado com dados de altimetria SAR do Sentinel-3A/3B) e os dados oceânicos foi 8 mm menor na costa do sudeste da China e 5 mm menor no Japão, quando comparado ao modelo DTU15MSS, que não inclui dados de altimetria SAR.

Outro estudo semelhante, porém, no contexto da costa brasileira, foi o de Souza e Ferreira (2021), que analisaram a evolução espaço-temporal da TNMM em marégrafos da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) utilizando dados da missão altimétrica CryoSat-2 e técnicas de maregrafia. Os autores observaram que o CryoSat-2 apresentou menores variações mensais em comparação com os dados maregráficos, além de uma discrepância anual entre as técnicas, em todas as estações maregráficas, na ordem de milímetros.

Este artigo tem como objetivo estimar a TNMM e suas variações temporais em quatro estações maregráficas da RMPG, utilizando dados de tecnologia SAR das missões CryoSat-2 e Sentinel-6A, além de dados globais oceânicos de *sea surface height* (SSH), ou seja, altitudes da superfície do mar e variáveis derivadas (*Global Ocean Gridded L4 Sea Surface Heights and Derived Variables*) provenientes de uma solução multimissões. A abordagem multimissões, ao integrar diferentes fontes de altimetria—incluindo altimetria convencional e SAR—, é essencial para melhorar a precisão e a robustez das estimativas, proporcionando maior disponibilidade de dados e permitindo análises mais abrangentes em comparação com o uso de missões altimétricas isoladas. Essa estratégia contribui para uma caracterização mais detalhada das variações da TNMM, sendo fundamental para aprimorar modelos costeiros e compreender melhor a dinâmica do nível do mar.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo

As estimativas dos valores da TNMM e suas variações temporais, apresentadas neste estudo, foram realizadas considerando a posição geográfica de uma amostra de quatro estações maregráficas pertencentes à RMPG: Fortaleza (EMFOR), Salvador (EMSAL), Macaé (EMMAC) e Imbituba (EMIMB) (Figura 1). Atualmente fazem parte da RMPG, como estações maregráficas ativas, as de: Santana (EMSAN), Belém (EMBEL), Fortaleza (EMFOR), Salvador (EMSAL), Arraial do Cabo (EMARC) e Imbituba (EMIMB). As estações escolhidas estão mais próximas às áreas de mar aberto o que proporciona uma melhor localização em relação aos dados da ALTSAT, uma vez que se faz necessário realizar a interpolação destes dados, conforme será abordado na metodologia. Tal situação não ocorre para as estações de Santana e Belém, assim optou-se por não as incluí no presente estudo.

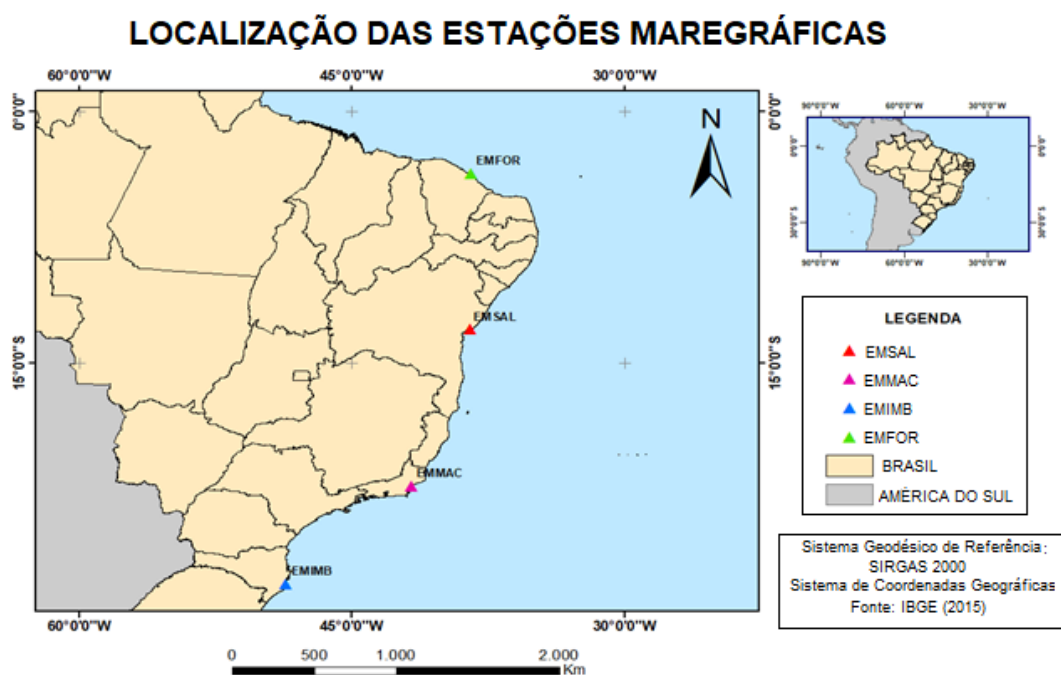


Figura 1 – Mapa de localização explicitando as estações maregráficas utilizadas no estudo.
Fonte: Autores (2024).

2.2. Materiais utilizados

Para o desenvolvimento do estudo optou-se por duas missões da altimetria SAR: CryoSat-2 e Sentinel-6A, além de uma solução multimissões, que engloba altimetria convencional e altimetria SAR. A série temporal de dados corresponde ao período de abril de 2022 a agosto de 2023. Destas missões foram utilizadas as informações referentes às variáveis: *Sea Level Anomaly* (SLA) - anomalia do nível do mar, e *Absolute Dynamic Topography* (ADT) - topografia dinâmica absoluta, obtidos por meio das trilhas dos satélites com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, aproximadamente $27,8 \text{ km}^2$ na região equatorial, com frequência de aquisição de 1Hz.

Os dados provenientes da missão CryoSat-2, foram extraídos do *Open Altimeter Database* (OpenADB) - *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Technische Universität München* (DGFI-TUM). O OpenADB é um banco de dados de ALTSAT que também disponibiliza produtos, modelos e algoritmos relacionados com a ALTSAT (SCHWATKE *et al.*, 2010). Todas as informações sobre os principais produtos, missões altimétricas e acesso ao banco de dados OpenADB, estão disponíveis no site do DGFI-TUM¹.

Os dados da missão Sentinel-6A, foram obtidos do *Copernicus Marine and Environment Monitoring Service* (CMEMS). A plataforma de dados do CMEMS fornece produtos e serviços oceanográficos para segurança marítima, ambiente costeiro e marinho, previsão climática e meteorológica. Disponibiliza também de forma gratuita à comunidade acadêmica, uma combinação de observações oceânicas, imagens de Sensoriamento Remoto e modelos de previsão oceânica que compõem um catálogo de mais de 150 produtos (CMEMS, 2023). Todas as informações sobre os principais produtos, missões altimétricas e acesso ao banco de dados, estão disponíveis no site do serviço marinho Copernicus².

O último conjunto de dados empregado foi derivado de uma solução multimissões geradas a partir dos satélites: Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B, Saral/AltiKa e HY-2B. Os dados de todas as missões foram corrigidos dos efeitos orbitais, visando sua integração à solução final. A solução multimissões está disponível no serviço marinho Copernicus.

¹ <https://openadb.dgfi.tum.de/en/products/>

² <https://data.marine.copernicus.eu/products>

Em todos os casos os dados altimétricos são disponibilizados já corrigidos dos efeitos atmosféricos (ionosfera, troposfera seca e úmida); efeitos geofísicos (correções de marés terrestres, oceânicas, polar, efeitos de cargas oceânicas e variações do estado do mar) e devido a propagação do sinal, por exemplo.

Vale ressaltar que os dados das missões altimétricas são disponibilizados de forma criptografada e disponibilizados na extensão .nc (*Network Common Data Form - NetCDF*), portanto, se faz necessário um *software* capaz de visualizá-los e processá-los. Desta forma, será utilizado o *software Broadview Radar Altimeter Toolbox* (BRAT GUI) versão 4.2.1, que corresponde a um projeto conjunto da *European Space Agency* (ESA) e do *Centre National Spatial Research* (ESA). O BRAT pode ser utilizado em conjunto com rotinas (MATLAB/IDL) ou por meio do uso de linguagens de programação (C/C++/Python/Fortran), permitindo aos usuários a obtenção dos dados desejados e evitando inconsistências na formatação. O BRAT também pode ser usado para simples visualização ou para leitura em formatos como: ASCII, KML (*Google Earth*) e imagens (JPEG, PNG), entre outros (ROSMORDUK *et al.*, 2016).

O serviço de cálculo do *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM)³ foi utilizado para determinar os valores de ondulação geoidal (N) para cada estação maregráfica, levando em consideração as variáveis envolvidas e os Modelos Globais do Geopotencial (MGGs) correspondentes. Foram calculados os valores de N considerando os modelos EGM2008 e EIGEN-6C4. O EGM2008 foi escolhido por ser o modelo utilizado na missão CryoSat-2 e na solução multimissões, enquanto o EIGEN-6C4 refere-se ao modelo de referência adotado no contexto da missão Sentinel-6A.

Também foi utilizado o *software* ArcGIS versão 10.8 da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), com a finalidade de estimar e interpolar os valores das trilhas dos satélites nas estações maregráficas pertencentes à RMPG ao longo da costa brasileira, além de gerar os produtos cartográficos envolvidos. A planilha eletrônica *Excel* foi utilizada para o cálculo das estimativas da TNMM, das discrepâncias entre as missões CryoSat-2, Sentinel-6A e a solução multimissões e para as análises estatísticas descritivas dos dados.

2.3. Metodologia

O fluxograma apresentado na Figura 2, explicita os principais procedimentos metodológicos utilizados ao longo desse estudo, com a finalidade de determinar as variações da TNMM nas quatro estações maregráficas escolhidas, pertencentes à RMPG.

³ <https://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>

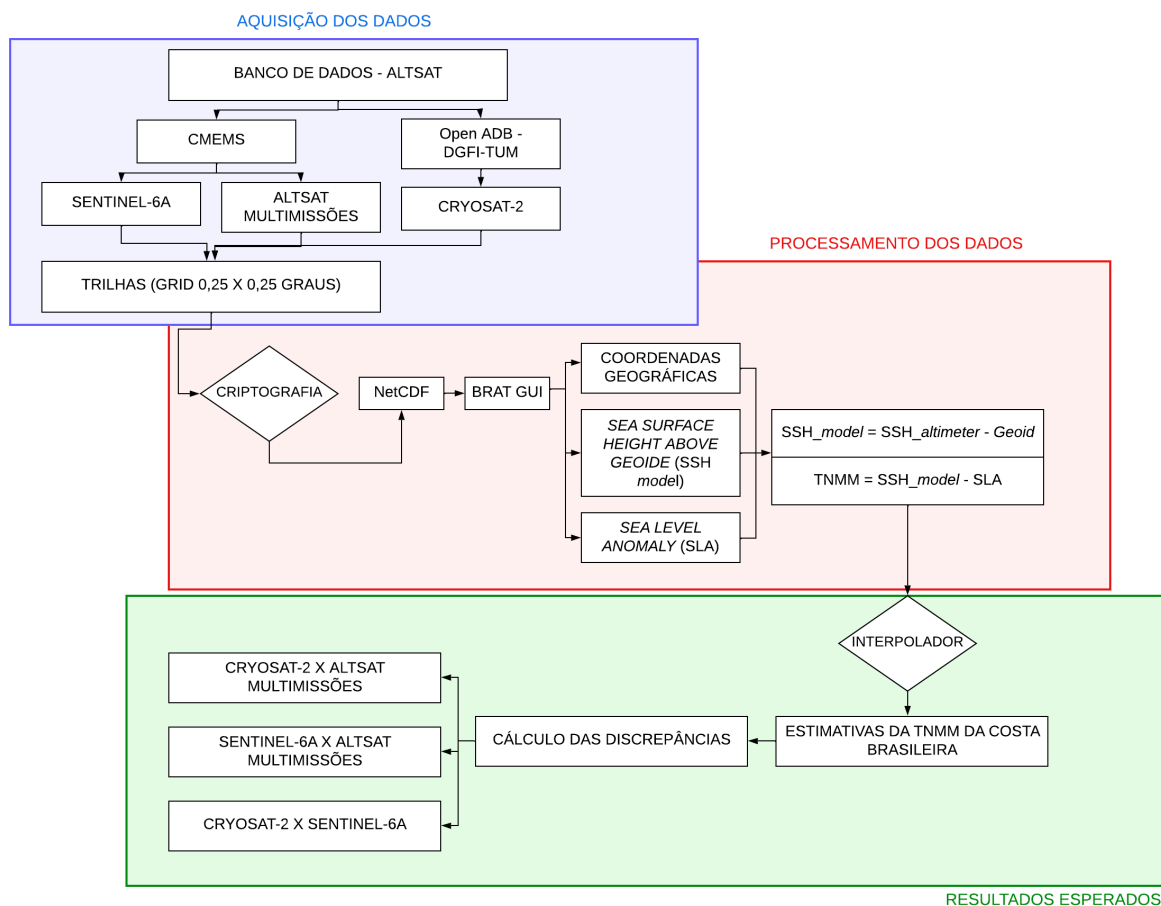


Figura 2 – Fluxograma metodológico das etapas do trabalho.

Fonte: Autores (2024).

Inicialmente, a aquisição dos dados foi realizada por meio das bases de dados do CMEMS e *Open ADB* (DGFI-TUM), onde foram realizados os *download's* das trilhas dos satélites das missões Sentinel-6A, CryoSat-2 e da solução multimissões.

Devido ao fato de os dados serem criptografados e estarem disponíveis no formato NetCDF, foi utilizado o *software* BRAT GUI versão 4.2.1, para visualização e extração das variáveis ADT e SLA, cujos valores foram necessários para as estimativas da TNMM. Ressalta-se que a variável ADT empregada neste estudo, corresponde a altitude da superfície do mar acima do geoide, obtida em função da altitude geoidal proveniente do modelo global do geopotencial associado a cada missão, ou seja, o EGM2008 para a missão CryoSat-2 e solução multimissões e o EIGEN-6C4 para a missão Sentinel-6A.

Para uma melhor compreensão das superfícies de referência utilizadas no contexto da ALTSAT, a Figura 3, ilustra as principais variáveis que auxiliam nas estimativas da TNMM.

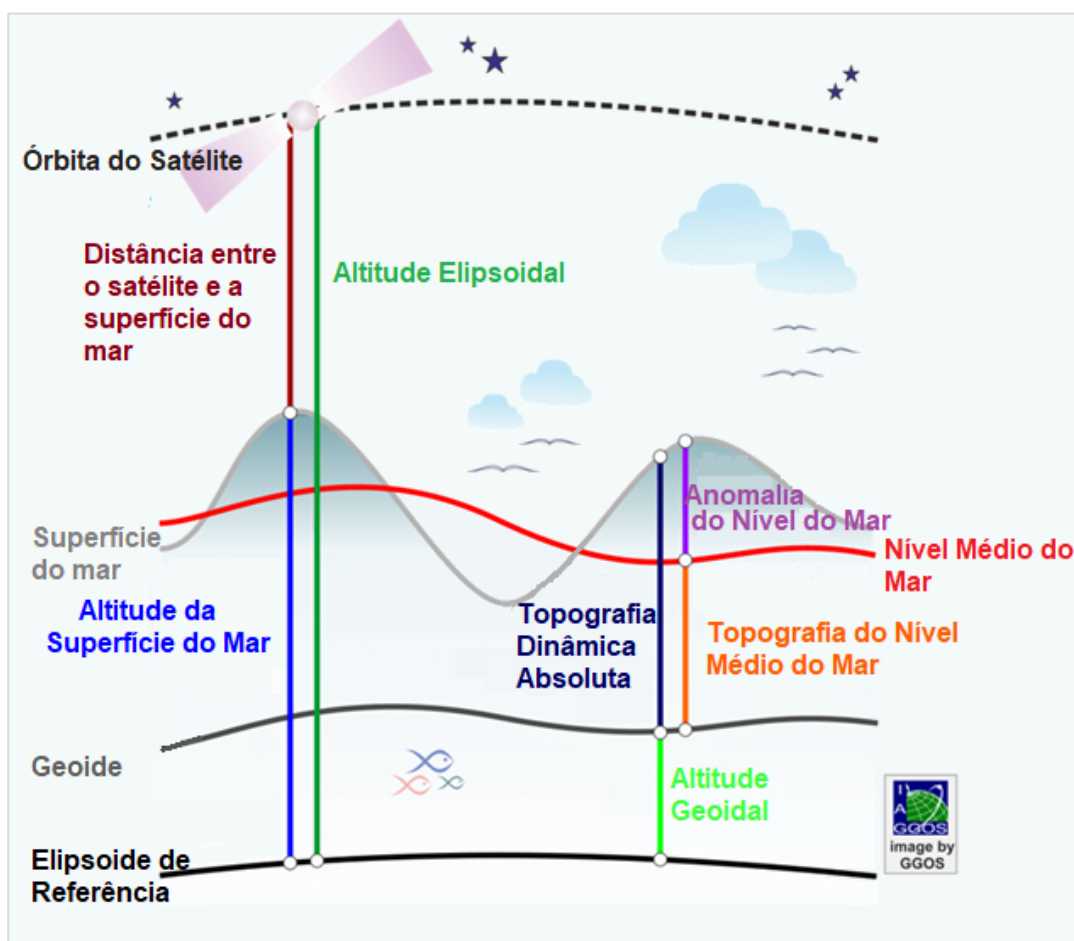


Figura 3 –Relação entre as superfícies de referência no contexto da ALTSAT.

Fonte: Adaptado de GGOS (2024).

A distância entre o satélite e a superfície do mar, conhecida como *altimeter range* (R), é a variável derivada diretamente das observações dos satélites e deve ser corrigida de uma série de influências instrumentais e atmosféricas, além de correções orbitais, entre outras. Uma vez conhecida a órbita do satélite sua altitude em relação a um elipsoide de referência também é conhecida. A partir destas variáveis estima-se a altitude da superfície do mar (*Sea Surface Height* - SSH) que corresponde à distância entre o nível instantâneo do mar (superfície do mar) e o elipsoide de referência. Destaca-se que a SSH é uma quantidade instantânea, ou seja, está associada ao nível do mar em um dado momento, obtido durante uma passagem do satélite altímetro.

Considerando que as missões possuem uma resolução temporal limitada pelo tempo de revisita dos satélites, múltiplas passagens do altímetro permitem a estimativa de uma superfície média do mar (*Mean Sea Surface* - MSS), também conhecida como nível médio do mar (*Mean Sea Level* - MSL). A diferença entre a altitude da superfície do mar e o nível médio do mar é denominada anomalia do nível do mar (*Sea Level Anomaly* - SLA).

A topografia dinâmica absoluta (*Absolute Dynamic Topography* - ADT) refere-se à separação entre o nível instantâneo do mar (superfície do mar) e o geóide. Por sua vez, a topografia do nível médio do mar (*Mean Dynamic Topography* - MDT) corresponde à diferença entre a ADT e a SLA, representando assim a diferença entre o NMM e o geóide.

Dessa forma, as variáveis apresentadas estão inter-relacionadas pelas Equações 1, 2 e 3. No entanto, a aplicação dessas equações exige que as variáveis estejam devidamente padronizadas, levando em conta as correções aplicadas, o elipsoide de referência utilizado e outras considerações pertinentes.

$$ADT = SSH - N \quad (1)$$

$$SLA = SSH - MSS \quad (2)$$

$$TNMM = ADT - SLA \quad (3)$$

Como os dados altimétricos possuem uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, aproximadamente 27,8 km², fez-se necessário interpolar os dados a fim de obter os valores das variáveis na posição das estações maregráficas empregadas no estudo. Para este propósito, foi utilizado o *software* ArcGis versão 10.8 da ESRI, a fim de estimar os valores de SLA e ADT não amostrados, por meio de uma Krigagem Universal.

A krigagem é um método com vários exemplos que demonstraram seu eficiente desempenho quando aplicado na área das geociências. Montecino, Cuevas e de Freitas (2014), utilizaram a krigagem para a interpolação de valores de NMM a partir de modelos de MSS; Santana (2020) aplicou a krigagem na interpolação de valores em modelos globais oceânicos e observou que estes valores ao serem comparados com dados provenientes de estações maregráficas possuíam uma discrepância de ordem milimétrica; Santana, Ribeiro e Guimarães (2017) aplicaram o método para interpolação de grades regulares de altitudes geoidais de Modelos Globais do Geopotencial; Ferreira et al. (2017), apontaram o bom desempenho do método na geração de superfícies de referência batimétrica. Assim, tendo em vista os resultados apresentados por estes autores, optou-se por utilizar a krigagem como interpolador. Por fim, após as determinações da TNMM para cada estação maregráfica, foi realizado o cálculo da variação temporal e das discrepâncias entre as missões CryoSat-2, Sentinel-6A e ALTSAT multimissão.

3. Resultados e discussão

Ao realizar a comparação entre as soluções, é importante ressaltar duas situações: i) as séries temporais referentes à cada missão altimétrica, possuem a mesma amostragem de dados, com o objetivo de permitir a comparação dos resultados; ii) a representação de alguns gráficos foi elaborada em escalas diferenciadas, com a finalidade de melhor ilustrar as variações identificadas.

3.1. Estimativas das variações de TNMM

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam as análises estatísticas descritivas das variações da TNMM por meio da missão CryoSat-2, Sentinel-6A e a solução multimissões nas estações maregráficas.

Tabela 1 – Variações da TNMM por meio da missão altimétrica CryoSat-2.

Estatísticas descritivas				
Estatística	EMFOR (cm)	EMSAL (cm)	EMMAC (cm)	EMIMB (cm)
Média	50,9	53,5	45,3	51,1
Mediana	50,9	53,4	45,3	51,1
Máximo	51,0	54,1	46,1	52,3
Mínimo	50,8	53,2	44,7	50,1
Amplitude	0,2	0,9	1,4	2,2
Desvio Padrão	0,1	0,2	0,3	0,7

Fonte: Autores (2024).

Tabela 2 – Variações da TNMM por meio da missão altimétrica Sentinel-6A.

Estatísticas descritivas				
Estatística	EMFOR (cm)	EMSAL (cm)	EMMAC (cm)	EMIMB (cm)
Média	51,1	53,7	45,8	49,7
Mediana	51,0	53,7	45,8	49,6
Máximo	51,2	54,2	45,8	50,1
Mínimo	50,9	53,4	45,6	49,6

Amplitude	0,3	0,9	0,2	0,5
Desvio Padrão	0,1	0,2	0,1	0,2

Fonte: Autores (2024).

Tabela 3 – Variações da TNMM por meio da solução multimissões.

Estatísticas descritivas				
Estatística	EMFOR (cm)	EMSAL (cm)	EMMAC (cm)	EMIMB (cm)
Média	50,9	54,0	46,1	53,0
Mediana	50,9	54,0	46,0	53,0
Máximo	50,9	55,5	52,2	59,9
Mínimo	50,9	51,3	42,1	45,8
Amplitude	0,0	4,3	10,0	14,1
Desvio Padrão	0,0	1,1	2,2	3,4

Fonte: Autores (2024).

As Figuras 4, 5 e 6 representam as variações mensais locais das missões CryoSat-2, Sentinel – 6A e da solução multimissões ao longo do período em estudo.

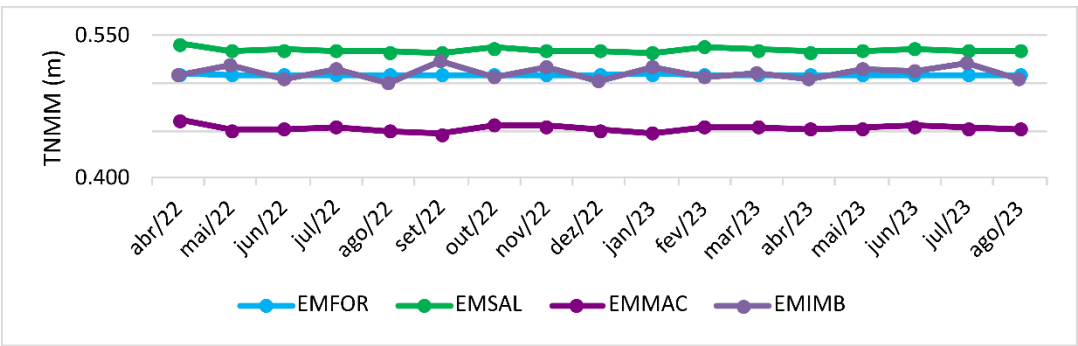


Figura 4 – Variações locais em metros da TNMM por meio da missão CryoSat-2.

Fonte: Autores (2024).

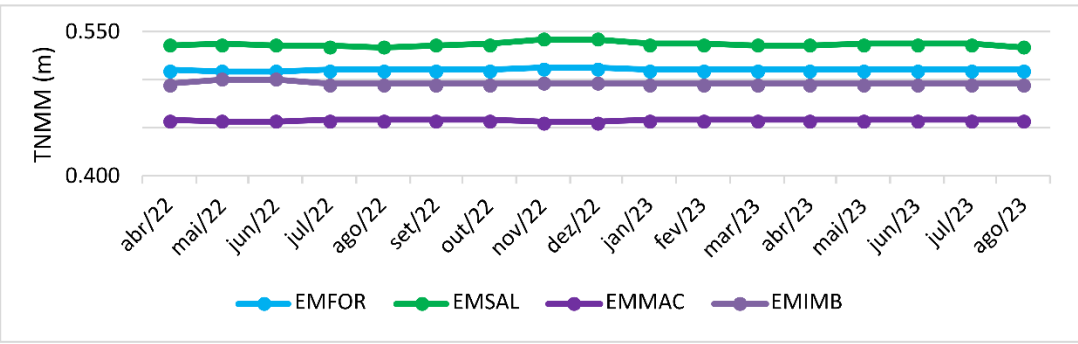


Figura 5 – Variações locais em metros da TNMM por meio da missão Sentinel-6A.

Fonte: Autores (2024).

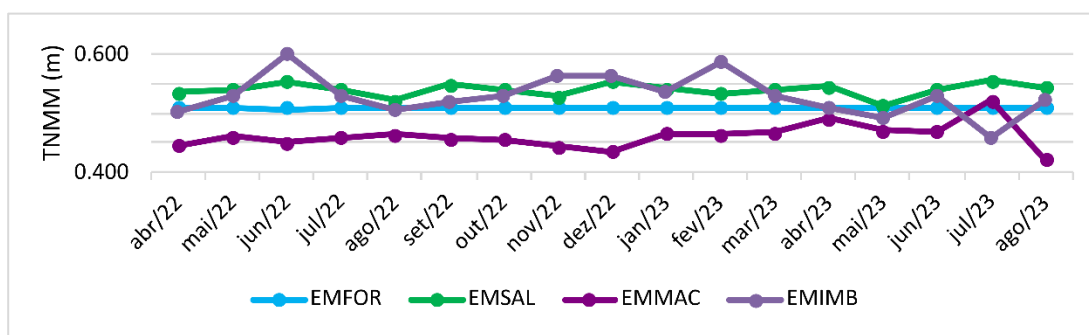


Figura 6 – Variações locais em metros da TNMM por meio da solução multimissão.

Fonte: Autores (2024).

É possível observar que os valores da TNMM variam ao longo da costa brasileira, sendo mais próximos os encontrados para as estações de Imbituba e Fortaleza, quando empregados os dados das missões CryoSat-2 e Sentinel-6A. Com relação aos resultados obtidos a partir da missão CryoSat-2 (Tabela 1 e Figura 4), os valores médios da TNMM na EMFOR e EMIMB foram de 50,97 cm e 51,1 cm, respectivamente. Para a missão Sentinel-6A, os valores médios da TNMM foram de 51,1 cm e 49,7 cm para EMFOR e EMIMB, respectivamente (Tabela 2 e Figura 5). Os resultados encontrados para EMIMB foram coerentes com o estudo de Reis, Barbosa e Palmeiro (2018), que utilizaram observações da missão altimétrica Jason-1 e o modelo *Global Mean Dynamic Topography* MDT_CNES_CLS13 obtendo uma média de 51,5 cm nesta estação.

Considerando ambas as missões e a série temporal de dados analisada, a variabilidade espacial dos valores de TNMM foi de ordem milimétrica a centimétrica. A maior variabilidade foi encontrada para a EMIMB e EMMAC, considerando os dados CryoSat-2, cujas amplitudes foram de 2,2 cm e 1,4 cm. A EMIMB apresentou maior dispersão nos valores, em relação aos resultados encontrados nas demais estações, com desvio padrão de 0,7 cm.

No caso da missão Sentinel-6A, a maior amplitude na variação temporal da TNMM ocorreu para a EMSAL, com 0,9 cm de amplitude e 0,2 cm de desvio padrão. Já a EMMAC, apresentou menor variação e dispersão nos valores, com desvio padrão de 0,1 cm e amplitude de 0,2 cm.

Conforme ilustra a Figura 6 e a Tabela 3, a solução multimissões é a solução que apresenta a maior variabilidade nos valores da TNMM ao longo do período analisado. Exceto para a estação maregráfica de Fortaleza, que não apresentou diferenças significativas ao ser comparada com as demais.

Na EMIMB, a TNMM alcançou os maiores valores em junho de 2022 e fevereiro 2023, 59,9 cm e 58,7 cm, respectivamente. Em julho de 2023 o valor estimado para a TNMM foi de 45,8 cm, configurando-se o menor valor estimado para a série temporal sob análise.

A estimativa da TNMM, encontrada com a solução multimissões para a estação maregráfica de Imbituba, é coerente com os valores de TNMM estimados por Santana e Dalazoana (2022), que obtiveram uma média de 54,1 cm nessa estação, utilizando como parâmetro de cálculo as altitudes elipsoidais derivadas da RMPG e a altitude geoidal proveniente dos modelos EGM2008, EIGEN-6C4, XGM2016 e XGM2019.

3.2. Análise das discrepâncias entre as soluções

Neste tópico, são apresentadas as análises em função da discrepância, ou seja, da diferença entre os valores de TNMM obtidos a partir das missões CryoSat-2, Sentinel-6A e da solução multimissões. Os resultados são baseados em estatísticas descritivas e no comportamento da TNMM nas estações maregráficas em estudo.

A Tabela 4, representa as análises das discrepâncias entre as missões CryoSat-2 e a altimetria multimissões. A Tabela 5 representa as análises das discrepâncias entre a missão Sentinel-6A e a solução multimissão. E por fim, a Tabela 6 representa as análises das discrepâncias entre as missões CryoSat-2 e a Sentinel-6A.

Tabela 4 – Estatísticas das discrepâncias entre a missão CryoSat-2 e a altimetria multimissões.

Estatísticas descritivas				
Estatística	EMFOR (cm)	EMSAL (cm)	EMMAC (cm)	EMIMB (cm)
Média	-0,05	-0,51	-0,87	-1,92
Mediana	-0,06	-0,58	-1,01	-1,74
Máximo	0,07	2,11	3,08	6,21
Mínimo	-0,1	-2,12	-6,84	-9,49
Desvio Padrão	0,04	1,18	2,24	3,71

*Fonte: Autores (2024).**Tabela 5 – Estatísticas das discrepâncias entre a missão Sentinel-6A e a altimetria multimissões.*

Estatísticas descritivas				
Estatística	EMFOR (cm)	EMSAL (cm)	EMMAC (cm)	EMIMB (cm)
Média	0,14	-0,28	-0,37	-3,36
Mediana	0,12	-0,44	-0,34	-3,42
Máximo	0,31	2,47	3,66	3,77
Mínimo	0,02	-1,78	-6,36	-9,84
Desvio Padrão	0,07	1,13	2,17	3,35

*Fonte: Autores (2024).**Tabela 6 – Estatísticas das discrepâncias entre a missão CryoSat-2 e a Sentinel-6A.*

Estatísticas descritivas				
Estatística	EMFOR (cm)	EMSAL (cm)	EMMAC (cm)	EMIMB (cm)
Média	-0,18	-0,22	-0,50	1,44
Mediana	-0,17	-0,11	-0,49	1,51
Máximo	-0,05	0,55	0,31	2,68
Mínimo	-0,40	-0,88	-1,10	0,35
Desvio Padrão	0,09	0,34	0,33	0,71

Fonte: Autores (2024).

Com base na Tabela 4, constatou-se que os valores de discrepância máximo (6,21 cm) e mínimo (-9,49 cm) referem-se à EMIMB e correspondem aos valores encontrados para a TNMM nos meses de junho de 2022 e julho de 2023. Tais discrepâncias, podem estar relacionadas com o fato de uma solução estar baseada em dados de apenas uma missão satelital: o CryoSat-2 com um período de revisita de 369 dias; e da solução multimissões ser baseada em diferentes satélites proporcionando dados com melhor resolução espacial e temporal. A melhoria na resolução temporal e espacial da solução multimissões faz com que ela represente melhor a variabilidade temporal do NMM, como observado na Figura 5, por exemplo. De forma geral, percebe-se ainda que a EMFOR foi a estação que apresentou menor discrepância entre as soluções, demonstrando um desvio padrão de 0,04 cm, ao ser comparada com as demais estações.

Em relação aos resultados expressos na Tabela 5, constatou-se que o valor de discrepância máximo (3,77 cm) e mínimo (-9,84 cm) correspondem novamente ao mês de junho de 2022 e julho de 2023 para EMIMB. Dessa forma, os valores de TNMM obtidos para EMIMB a partir da altimetria SAR foram os que apresentaram maior discrepância em comparação com os valores obtidos a partir da solução multimissões.

Conforme os resultados expressos na Tabela 6, observa-se que houve um padrão de redução das discrepâncias nos valores de TNMM para as estações, EMFOR, EMSAL e EMMAC, onde apresentaram médias de -0,18 cm, -0,22 cm e -0,50 cm, respectivamente. Entretanto, a EMIMB foi a única estação que demonstrou uma discrepância positiva de 1,44 cm para o período de abril de 2022 a agosto de 2023. Nota-se também que a EMIMB foi a estação maregráfica com maior discrepância, sendo esta quantificada por uma máxima de 2,68 cm.

3.3. Análise de diferentes Modelos Globais do Geopotencial (MGGs) na estimativa da TNMM

Antes da evolução das técnicas de posicionamento por satélites e da modernização das tecnologias espaciais, assumia-se que não havia discrepância entre as estimativas do NMM e o geoide, ou seja, numa visão clássica, considerava-se as superfícies coincidentes. Atualmente sabemos que existe de fato uma distinção entre o NMM local e o modelo geopotencial global, essa diferença corresponde à TNMM (TORGE, 2001; SEEGER, 2003). Dessa forma, a influência de distintos MGGs, na determinação das variáveis disponibilizadas para cada missão altimétrica ou soluções multimissões, impacta diretamente na determinação da TNMM.

Diante disso, as diferenças entre os valores de TNMM nas estações maregráficas utilizando as missões CryoSat-2, Sentinel-6A e a solução multimissão, estão também associadas aos diferentes MGGs empregados. A Tabela 7 apresenta os valores de ondulação geoidal (N) derivados do MGG EGM2008 (utilizado nas variáveis de ADT da CryoSat-2) e EIGEN-6C4 (modelo utilizado nas variáveis de ADT da missão Sentinel-6A), em cada estação maregráfica analisada.

Tabela 7 – Determinação da ondulação geoidal (N) de acordo com os modelos EGM2008 e EIGEN-6C4.

Ondulação geoidal (N) em metros				
MGG	EMFOR (m)	EMSAL (m)	EMMAC (m)	EMIMB (m)
EGM2008	-8,603	-1,060	-6,429	1,740
EIGEN-6C4	-8,640	-1,067	-6,481	1,680
Diferença	0,037	0,007	0,051	0,061

Fonte: ICGEM (2024).

Para fins comparativos, os valores de N foram estimados considerando o sistema de maré zero (*zero tide*), uma vez que, os dados de ALTSAT são corrigidos das influências de marés oceânicas. Sendo assim, conforme demonstra a Tabela 7, percebe-se que as diferenças entre os modelos foram de ordem centimétrica, ou seja, corrobora para as incertezas nas determinações da TNMM. Além disso, percebe-se que a EMIMB foi a estação maregráfica que mais sofreu influência das diferenças entre os MGGs, com um valor de 6,1 cm, validando os resultados a nível centimétrico encontrados nas discrepâncias apresentadas anteriormente.

4. Considerações finais

Os resultados desta pesquisa destacam o grande potencial das missões altimétricas baseadas na tecnologia SAR quando comparadas com uma solução multimissões que possui melhor resolução temporal e espacial de dados. As discrepâncias encontradas para a TNMM entre as missões CryoSat-2 e Sentinel-6A quando comparadas com a solução multimissões foram, em média, menores do que 3,5 cm nas estações analisadas. A comparação entre as duas missões resultou em discrepâncias médias melhores do que 1,5 cm, com valores de desvio padrão de 0,9 mm em Fortaleza-CE, 3,4 mm em Salvador-BA, 3,3 mm em Macaé-RJ e 7,1 mm em Imbituba-SC.

As análises mostraram consistência nos valores médios, corroborando estudos anteriores realizados para a EMIMB. Observou-se também uma maior variabilidade dos resultados nesta estação, o que sugere a necessidade de investigações adicionais para entender as causas dessa variabilidade.

Outro aspecto importante a ser avaliado é a questão do uso de diferentes MGGs na disponibilização das variáveis associadas a cada missão ou solução altimétrica, uma vez que as diferenças encontradas entre os valores de ondulação geoidal provenientes do EGM2008 e do EIGEN-6C4 são da mesma ordem de grandeza das discrepâncias. Desta forma, fica evidente a necessidade de compatibilização destes modelos, além da compatibilização em termos de correções aplicadas aos dados da altimetria satelital. Isso reforça a importância de se considerar cuidadosamente essas variáveis na interpretação dos dados altimétricos.

Embora as soluções multimissões apresentem maior variabilidade, elas oferecem uma visão mais completa e detalhada das variações da TNMM ao longo do tempo e no espaço, sublinhando a necessidade de integrá-las às análises comparativas.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se que futuros estudos utilizem séries temporais mais longas, o que permitirá uma compreensão mais aprofundada das tendências temporais e variações espaciais da TNMM. Além disso, é essencial realizar comparações mais detalhadas entre os resultados de TNMM e as medições maregráficas para validar e aprimorar os métodos empregados, principalmente com relação a interpolação dos dados de altimetria. Por fim, é

aconselhável analisar o comportamento da TNMM com diferentes modelos globais do geopotencial, priorizando os mais recentes, a fim de avaliar com maior precisão as implicações dessas escolhas sobre os resultados altimétricos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo suporte institucional à realização deste trabalho. Agradecemos, em especial, ao Laboratório de Referência em Altimetria e Sistemas Geodésicos (LARAS) pelo ambiente de pesquisa colaborativo e pelo apoio técnico e científico prestado durante o desenvolvimento deste estudo. Estendemos também nossos agradecimentos ao Departamento de Geomática da UFPR pelo suporte acadêmico e pelas contribuições fundamentais à formação e desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- CLS. DUACS – *Altimetry data for sea level studies e applications*. Disponível em: <https://duacs.cls.fr/>. Acesso em: 09/11/2023.
- CMEMS. *Ocean Products Data*. Disponível em: <https://marine.copernicus.eu/>. Acesso em: 17/09/2023.
- DALAZOANA, R. Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 12, n. 1, p. 173-174, 2006.
- DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. *Revista cartográfica*, n. 98, p. 33-57, 2019.
- DGFI. Missions. Disponível em: <https://openadb.dgfi.tum.de/en/missions/>. Acesso em: 09/11/2023.
- DREWES, H. The changing objectives in geodetic research. *Zeitschrift für Geodäsie, Geo-Information und Landmanagement*, v. 131, n. 5, p. 1–7, 2006.
- FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R.; ROSA, L. M. F. In Bathymetric Surfaces: IDW or Kriging?. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 23, n. 3, p.493-508, set. 2017.
- GENCHI, S.A.; VITALE, A.J.; PERILLO, G.M.E.; SEITZ, C.; DELRIEUX, C.A. Mapping Topobathymetry in a Shallow Tidal Environment Using Low-Cost Technology. *Remote Sens*, v. 12, p. 1394, 2020.
- GGOS. *Sea Surface Heights*. Disponível em: <https://ggos.org/item/sea-surface-heights/>. Acesso em: 09/11/2024.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. *Physical Geodesy*. 2ª Ed. New York: Springer Wien. 2006. p. 403.
- ICGEM. *Calculation of Gravity Field Functionals on Ellipsoidal Grids*. Disponível em: <https://icgem.gfz-potsdam.de/calgrid> . Acesso em: 28/10/2024.
- IDŽANOVIĆ, M.; OPFAUG, V.; ANDERSEN, O. B. The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 11, p. 5609–5617, 2017.
- KARIMI, A. A.; ANDERSEN, O. B.; DENG, D. Mean Sea surface and mean dynamic topography determination from Cryosat-2 data around Australia. *Advances in Space Research*, 2020, v.68, n.2, p.1073-1089, 2021.
- KUBRYAKOV, A. A.; STANICHNY, S. V. Mean Dynamic Topography of the Black Sea, computed from altimetry, drifter measurements and hydrology data. *Ocean Science*, v. 7, n. 6, p. 745-753, 2011.
- LYU, K.; YANG, X. Y.; ZHENG, Q.; WANG, D.; HU, J. Variability of the Winter Western Boundary Current in the South China Sea Using Satellite Data and Mooring Observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 9, n. 11, p. 5079-5088, 2016.
- MONTECINO, H. D. C.; CUEVAS, A. C.; DE FREITAS, S. R. C. A study of the chilean vertical network through global geopotential models and the CNES CLS 2011 global mean sea surface. *Boletim de Ciências Geodésicas*, [s.l.], v. 20, n. 2, p.300-316, jun. 2014.

- OPHAUG, V.; BREILI, K.; GERLACH, C. A comparative assessment of coastal mean dynamic topography in Norway by geodetic and ocean approaches. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 120, n. 12, p. 7807-7826, 2015.
- REIS, V. P.; PALMEIRO, A. S.; BARBOSA, L. G. Estudo da obtenção do nível médio do mar com altimetria por satélites. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 1, p. 3-22, 2018.
- RIO, M. H.; PASCUAL, A.; POULAIN, P. M.; MENNA, M.; BARCELÓ, B.; TINTORÉ, J. Computation of a new mean dynamic topography for the Mediterranean Sea from model outputs, altimeter measurements and oceanographic in situ data, *Ocean Science*, v. 10, 2014.
- 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. *Radar Altimetry Tutorial*, 357p, 2016.
- SANTANA, T. A. *Contribuições para os estudos de integração das componentes verticais terrestre e marinha ao longo da costa brasileira*. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.
- SANTANA, T.A.; DALAZOANA, R. Analysis of vertical reference levels in the Brazilian coast: comparing local and global approaches. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 28, p. e20222012, 2022.
- SANTANA, T. A.; RIBEIRO, L. C.; GUIMARÃES, G. N. Comparação da Altura Geoidal do MAPGEO2015 e GNSS/Nivelamento com a Ondulação Geoidal Derivada da Missão GOCE. In: *XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA*, 2017, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro:SBC, 115-119, 2017. Disponível em: <<http://www.cartografia.org.br/cbc/2017/trabalhos/2/487.html>>. Acesso em: 31/04/2025.
- SCHWATKE, C.; BOSCH, W.; SAVCENKO, R.; DETTMERING, D. OpenADB-An open database for multi-mission altimetry. In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, p. 12077, 2010.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations. Methods and Applications*. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, p. 589, 2003.
- SMITH, A.J.; KIRWAN, M.L. Sea level-driven marsh migration results in rapid net loss of carbon. *Geophysical Research Letters*, v. 48, n. 13, p. 01, 2021.
- SOTO-MARDONES, L.; CEPEDA-MORALES, J.; GONZÁLEZ-RAMÍREZ, J.; PARÉS-SIERRA, A.; CORRALES-SUASTEGUI, A. Effect of the continental shelf in seasonal oceanographic conditions at the Northern edge of the Eastern Tropical Pacific. *Advances in Space Research*, v. 71, n. 3, p. 1436-1450, 2023.
- SOUZA, L.M.; FERREIRA, I.O. Análise da Variabilidade Espaço-temporal da Topografia do Nível" Médio" do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia. *Rev. Bras. Cartografia*, v. 73, n. 3, p.751-770, 2021.
- TORGE, W. *Geodesy*. 3. ed. Berlin: Walter de Gruyter, p. 416, 2001.
- WEISSE, R.; DAILIDIENÉ, I.; HÜNICKE, B.; KAHMA, K.; MADSEN, K.; OMSTEDT, A.; PARNELL, K.; SCHÖNE, T.; SOOMERE, T.; ZHANG, W.; ZORITA, E. Sea level dynamics and coastal erosion in the Baltic Sea region. *Earth System Dynamics*, v. 12, n. 3, p. 871-874, 2021.
- WU, Y.; HUANG, J.; HE, X.; LUO, Z.; WANG, H. Coastal mean dynamic topography recovery based on multivariate objective analysis by combining data from synthetic aperture radar altimeter. *Remote Sensing*, v. 14, n. 1, p. 240, 2022.
- XU, L.; YUANRONG, H.; WEI, H. A multi-dimensional integrated approach to assess flood risks on a coastal city, induced by sea-level rise and storm tides. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 1, p. 03, 2016.