

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS POSIÇÕES DAS TRILHAS DOS SATÉLITES ALTIMÉTRICOS NAS DIFERENÇAS ENTRE NÍVEIS MÉDIOS DO MAR DO MODELO DE MSS CLS22 E DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS LOCAIS

GABRIELA ALVES E CASTRO¹

TULIO ALVES SANTANA²

REGIANE DALAZOANA³

Instituto Federal de Goiás - IFG

Departamento de Áreas Acadêmicas III, Goiânia, GO

castro.gabriela@estudantes.ifg.edu.br, tulio.santana@ifg.edu.br, regiane@ufpr.br

RESUMO – O monitoramento dos ambientes costeiros no Brasil é desafiador devido à extensa costa de 7.637 km e à complexidade na medição do nível do mar. Diversas técnicas, incluindo estações maregráficas (EMs) e satélites altimétricos, são empregadas para coletar dados. Este estudo teve como objetivo analisar a influência entre a posição das trilhas dos satélites altimétricos e as diferenças no Nível Médio do Mar (NMM) obtido pelo modelo CNES_CLS22 e pelas estações da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia (RMPG). A pesquisa revelou que a estação de Imbituba-SC apresenta a menor discrepância entre o NMM do modelo e as observações locais, enquanto Santana-AP mostrou a maior. A análise das distâncias entre as trilhas dos satélites e as diferenças dos NMMs indicou que os dados do satélite CRYOSAT mostrou forte correlação, sugerindo que essa missão exerce maior influência nos resultados do modelo CNES_CLS22.

ABSTRACT – Coastal monitoring in Brazil is challenging due to the extensive coastline of 7,637 km and the complexity of measuring sea level. Various techniques, including tide gauge stations (TGs) and altimetric satellites, are employed to collect data. This study aimed to analyze the influence between the positions of altimetric satellite tracks and the differences in Mean Sea Level (MSL) obtained from the CNES_CLS22 model and from the stations of the Permanent Tide Gauge Network for Geodesy (RMPG). The research revealed that the Imbituba-SC station had the smallest discrepancy between the MSL of the model and local observations, while Santana-AP showed the largest. The analysis of the distances between satellite tracks and the differences in MSL indicated that data from the CRYOSAT satellite showed a strong correlation, suggesting that this mission has a greater influence on the results of the CNES_CLS22 model.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento contínuo dos ambientes costeiros, seja em termos geofísico ou ambiental, requer informações precisas das medições dos níveis do mar e da terra, além do conhecimento de como eles variam ao longo do tempo. No entanto, o nível do mar pode ser particularmente complicado de medir (Woodworth et al., 2017).

Isso em razão de haver uma diversidade de técnicas para sua coleta, além das diferentes características que podem ocasionar dificuldades na coleta e análise dos dados em cada uma delas. Sobretudo no Brasil, um país continental, o monitoramento do nível do mar ao longo da costa enfrenta o desafio da extensão da linha de costa de 7.637 km, podendo alcançar 8.500 km se forem consideradas as baías (Vitte et al., 2003)

A mensuração do nível do mar pode ser realizada por meio de Estações Maregráficas (EMs), utilizadas há anos, ou por uma técnica de obtenção remota utilizada desde a década de 1980 onde é possível a obtenção de observações do nível do mar em cobertura global em um sistema de referência geocêntrico com o lançamento dos primeiros satélites altimétricos (Giehl; Dalazoana, 2022), entre outras formas de mensuração.

Oriundos dos dados de nível do mar dos satélites altimétricos há algum tempo, algumas instituições de pesquisa, tais como, CLS (*Collecte Localisation Satellites*) com suporte do CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) e o DTU Space (*Department Of Space Research and Technology – Technical University of Denmark*) publicam modelos de Superfície do Nível do Mar (MSS – *Mean Sea Surface*). O CLS/CNES lançou até o momento o CNES_CLS 2011,

CNES_CLS 2015 e CNES_CLS 2022 e o DTU Space lançou o DTU10MSS, DTU13MSS, DTU15MSS, DTU18MSS e DTU21MSS.

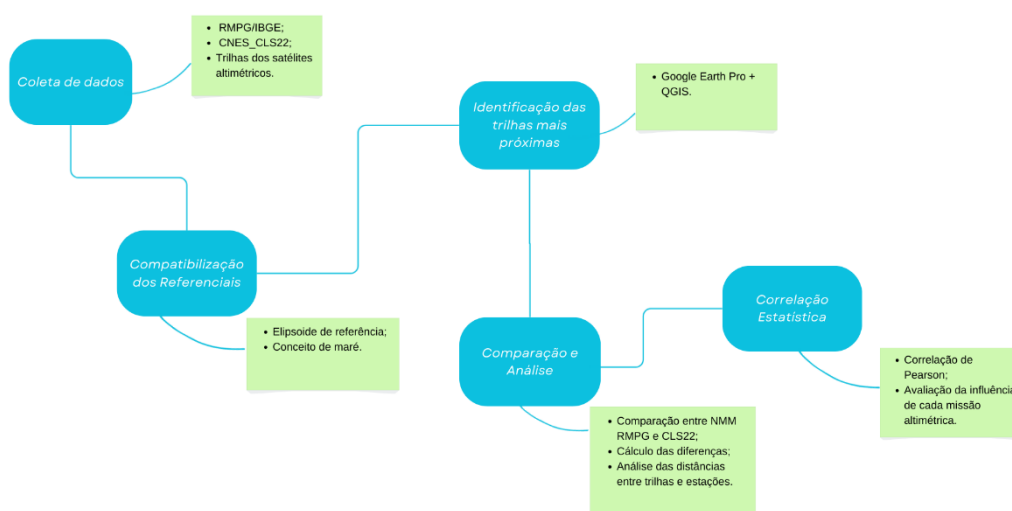
Considerando a existência dos modelos de MSS e as informações locais do NMM esse estudo se propôs a investigar a correlação existente entre a posição das trilhas dos satélites altimétricos e as diferenças do NMM encontradas entre o modelo de MSS CNES_CLS22 (Schaeffer *et al.*, 2023) e as estações maregráficas da RMPG (IBGE, 2021). Intenta-se responder se há influência das posições das trilhas dos satélites nas discrepâncias existentes do NMM do modelo e das observações maregráficas locais.

O modelo de MSS CNES_CLS 2022 foi escolhido pois é o modelo mais recente e foi calculado usando um período de 29 anos [1993-2021] de dados altimétricos (CRYOSAT, JASON 1, 2 e 3, TOPEX/Poseidon (T/P), GFO, SARAL, RS2 e ENVISAT). De acordo com Schaeffer *et al.* (2023), em uma análise global, a precisão deste novo modelo revelou uma melhoria de 40% face ao modelo anterior, de 2015. Esta nova determinação se concentra em uma melhor contabilização da variabilidade oceânica interanual e sazonal, na melhoria significativa dos resultados nos oceanos polares e nos comprimentos de onda mais curtos das partes estáticas do MSS. Além de incluir novos conjuntos de dados de alta resolução do CryoSat-2 e SARAL, filtrados a 5 Hz para obter uma melhor relação sinal-ruído. Globalmente, o CNES_CLS 2022 é mais preciso perto da costa, comparado com os modelos DTU (AVISO+, 2023).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma da estratégia de ação adotada para o desenvolvimento desta pesquisa encontra-se na Figura 1, juntamente com os aspectos metodológicos pensados para o alcance dos objetivos propostos. Foram realizadas a organização dos dados, a compatibilização dos referenciais, a identificação das trilhas mais próximas, a comparação e a análise estatística dos resultados.

Figura 1 – Fluxograma da estratégia de ação da pesquisa.



Fonte: Os autores (2025).

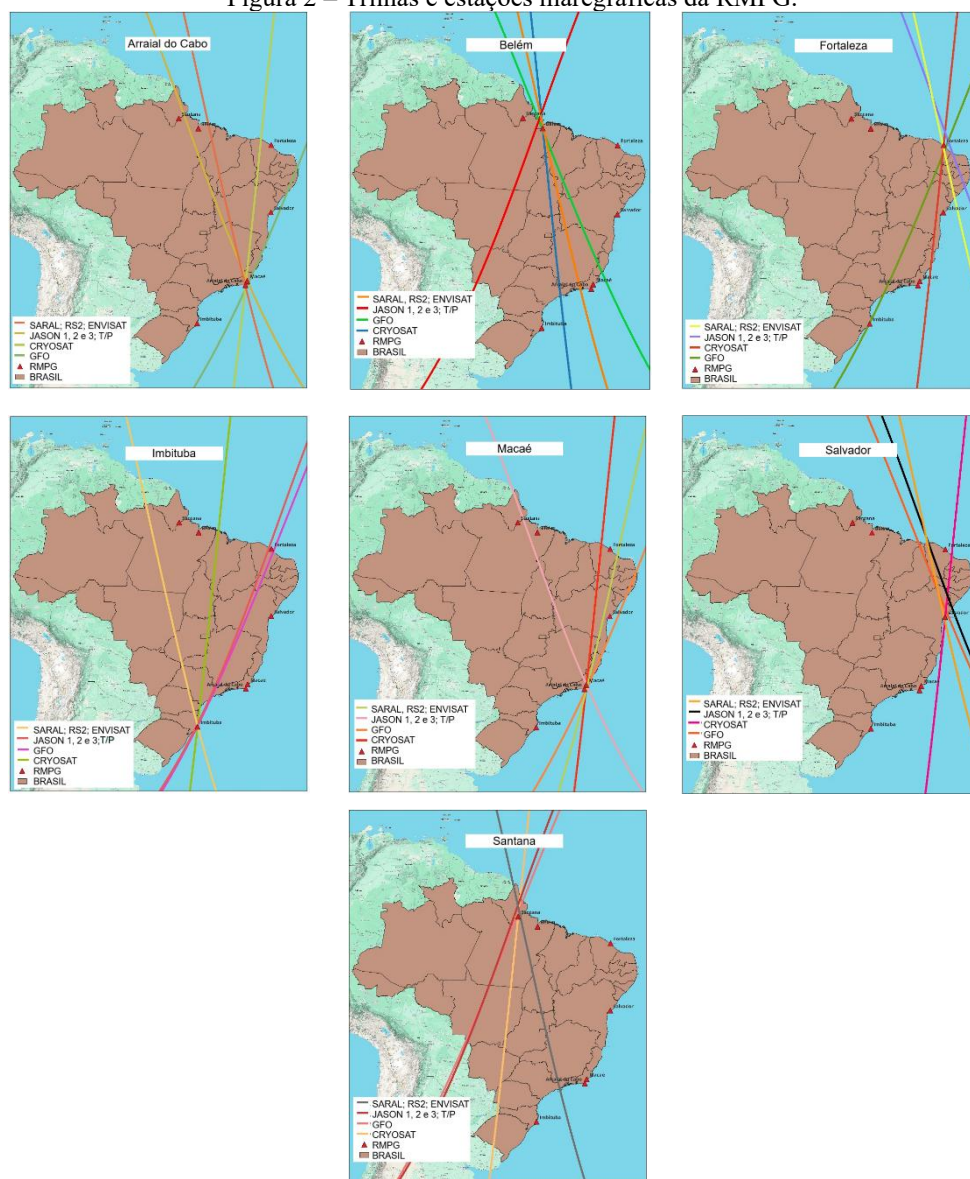
As informações das altitudes elipsoidais do NMM das EMs da RMPG na costa brasileira foram obtidas em IBGE (2021) para as EMs de Imbituba-SC (2001-2020), Arraial do Cabo-RJ (2017-2020), Macaé-RJ (2001-2015), Salvador-BA (2004-2020), Fortaleza-CE (2008-2019), Belém-PA (2019-2020) e Santana-AP (2005-2020). Estes valores foram comparados com os valores de NMM do modelo CNES_CLS22 com resolução espacial de 1' e adquirido em My Aviso + <<ftp://ftp-access.aviso.altimetry.fr/>> a partir da realização de um cadastro na plataforma.

A comparação entre o modelo e os dados da RMPG somente é válida com a compatibilização dos sistemas de referência e conceito de maré. Essa compatibilização do referencial e do conceito de maré permanente foi realizada conforme Santana e Dalazoana (2023) e IBGE (2021). Padronizando os dados para o elipsoide GRS80 e o conceito de maré médio.

A aquisição dos dados das EMs foi realizada através do site do portal INDE (Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais) <<https://inde.gov.br/AreaDownload>>, já os dados de localização das trilhas dos satélites que geraram o CNES_CLS22, são eles, o CRYOSAT, JASON 1, 2 e 3, TOPEX/Poseidon (T/P), GFO, SARAL, RS2 e ENVISAT, foram adquiridos no site AVISO+ <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/tools/pass-locator.html>>.

As trilhas passaram por uma primeira análise realizada na *Google Earth Pro* para identificar as trilhas mais próximas de cada EM, considerando todas as missões altimétricas cujo os dados foram utilizados para a geração do modelo. Isso foi feito para cada conjunto de trilhas dos satélites altimétricos em discussão (Figura 2).

Figura 2 – Trilhas e estações maregráficas da RMPG.



Fonte: Os autores (2025).

A espacialização dos dados foi realizada no QGIS (versão 3.28.10 *long term release*), utilizando como sistema de referência o SIRGAS2000. No ambiente de trabalho do QGIS, foram medidas as distâncias, em metros, da EM até a trilha mais próxima.

Por fim, para investigar a correlação entre as diferenças do NMM e as distâncias das trilhas dos satélites altimétricos foi calculado o valor de r pela Correlação de *Pearson* (Equação 1), como utilizado em Silveira (2010). Esse valor é uma medida estatística que avalia a força e a direção de uma relação linear entre duas variáveis quantitativas. Os valores de r variam de -1 a +1: $r = +1$: correlação linear positiva perfeita, indicando que ambas as variáveis aumentam juntas; $r = -1$: correlação linear negativa perfeita, onde uma variável aumenta enquanto a outra diminui; e $r = 0$: nenhuma correlação linear entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os valores da altitude elipsoidal do NMM local obtidos com as observações locais da RMPG e a altitude elipsoidal do NMM proveniente do modelo CNES_CLS22 para cada EM. A menor diferença encontrada é na EM de Imbituba (0,006 m) e a maior na EM de Santana (1,574 m). Ao analisar o tempo de observação maregráfica e a diferença em módulo encontrada, nota-se que a estação de Imbituba apresenta a menor diferença (0,006 m) e o maior tempo de observação (19 anos). No entanto, a EM de Santana possui também um período longo de observação (15 anos), porém apresenta a maior diferença (1,574 m). Na análise também chama a atenção ao fato da estação de Belém possuir apenas dois anos de observação e apresentar uma diferença de 0,116 m.

Tabela 1 – Diferenças dos valores de altitudes elipsoidais do NMM nas estações maregráficas da RMPG com relação ao modelo CLS22.

Estação	RMPG (cm)	CLS22 (m)	Diferença (m)
Imbituba	1,423	1,417	0,006
Arraial do Cabo	-5,660	-5,499	-0,161
Macaé	-6,778	-6,425	-0,353
Salvador	-10,726	-10,609	-0,117
Fortaleza	-8,745	-8,645	-0,100
Belém	-24,701	-24,817	0,116
Santana	-22,730	-24,304	1,574

Fonte: Os autores (2025).

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam as distâncias entre as trilhas dos satélites e as EMs. A Tabela 2, representando as trilhas do satélite CRYOSAT, apresenta valores que estão entre 0,22 km (Santana) e 3,490 km (Macaé). As menores distâncias são de Santana e Fortaleza. E as maiores são de Macaé e Salvador. A Tabela 3, representando as trilhas dos satélites JASON 1, 2 e 3 e o T/P, aponta distâncias com valores bem altos, variando de 2,384 km (Macaé) a 156,446 km (Salvador). As menores distâncias são de Macaé e Imbituba. E as maiores são de Salvador e Belém. A Tabela 4, representando as trilhas do satélite GFO, também aponta uma grande variação entre as distâncias, mas em um intervalo menor comparado à Tabela 3. A variação está entre 5,042 km (Imbituba) e 52,751 km (Salvador). As menores distâncias são de Imbituba e Belém. E as maiores são de Fortaleza e Salvador. A Tabela 5, representando as trilhas dos satélites SARAL, ERS-2 e ENVISAT, aponta resultados mais satisfatórios, com uma menor variação entre as distâncias e um intervalo entre 3,904 km (Imbituba) e 32,736 km (Santana). As menores distâncias são de Imbituba e Arraial do Cabo. E as maiores são de Macaé e Santana.

Tabela 2 – Distâncias entre as estações maregráficas e as trilhas mais próximas do satélite CRYOSAT.

Estação	Tracks	Ground Track	Distância (km)
Imbituba	6690 – 6719	6712	0,130
Arraial do Cabo	3840 – 3869	3844	1,509
Macaé	540 – 569	542	3,490
Salvador	6960 – 6869	6972	1,794
Fortaleza	4560 – 4589	4568	0,193
Belém	4020 – 4049	4033	1,264
Santana	7890 – 7919	7900	0,022

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 3 – Distâncias entre as estações maregráficas e as trilhas mais próximas dos satélites JASON 1, 2 e 3 e TOPEX/Poseidon.

Estação	Tracks	Ground Track	Distância (km)
Imbituba	151 - 175	163	17,933
Arraial do Cabo	201 - 225	202	50,827
Macaé	201 - 225	202	2,384
Salvador	176 - 200	176	156,446
Fortaleza	226 - 254	252	86,941
Belém	101 - 125	113	101,257
Santana	26 - 50	37	64,103

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 4 – Distâncias entre as estações maregráficas e as trilhas mais próximas do satélite GFO.

Estação	Tracks	Ground Track	Distância (km)
Imbituba	226 - 250	248	5,042
Arraial do Cabo	1 - 25	18	23,732
Macaé	1 - 25	18	26,177
Salvador	326 - 350	349	52,751
Fortaleza	226 - 250	248	40,403
Belém	1 - 25	5	9,553
Santana	351 - 375	364	24,276

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 5 – Distâncias entre as estações maregráficas e as trilhas mais próximas dos satélites SARAL, ERS-2 e ENVISAT.

Estação	Tracks	Ground Track	Distância (km)
Imbituba	801 - 825	807	3,904
Arraial do Cabo	826 - 850	835	3,317
Macaé	176 - 200	190	17,282
Salvador	476 - 500	491	15,346
Fortaleza	851 - 875	863	10,545
Belém	901 - 925	921	9,138
Santana	526 - 550	549	32,736

Fonte: Os autores (2025).

Em síntese, ao analisar as menores distâncias encontradas, com exceção de Santana nas distâncias menores do que 1 km as diferenças são de até o décimo do milímetro (6 mm em Imbituba e 10 cm em Fortaleza), nas distâncias entre 1 e 2 km as diferenças são de 11 a 16 cm para as distâncias maiores do que 2 km a diferença é de 35 cm (Macaé). Vale destacar que para seis das sete EMs as menores distâncias encontradas são provenientes do CRYOSAT.

Muitos trabalhos mostram que técnicas recentes de Altimetria por Radar de Abertura Sintética (SAR), como implementada no CRYOSAT melhoraram bastante a qualidade dos dados em ambiente costeiro. Raynal *et al.*, por exemplo, indicam que SAR reduz significativamente a distância mínima utilizável da costa, de cerca de 5 km para apenas 3 km, com precisão em altitude do nível mar da ordem de 4 cm próximo à costa.

Tabela 6 – Menores e maiores distâncias encontradas.

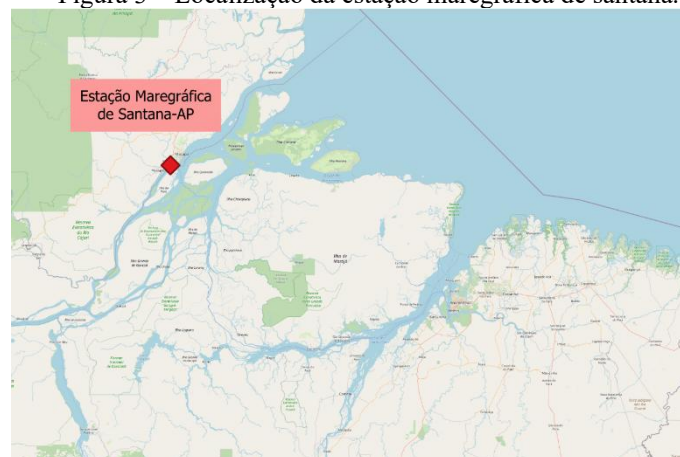
Estação	Menor distância (km)	Maior distância (km)	Diferença do NMM (m)
Imbituba	0,130	17,933	0,006
Arraial do Cabo	1,509	50,800	-0,161
Macaé	2,384	26,170	-0,353
Salvador	1,794	156,446	-0,117
Fortaleza	0,193	86,941	-0,100
Belém	1,264	101,257	0,116
Santana	0,022	64,130	1,570

Fonte: Os autores (2025).

As correlações da posição das trilhas dos satélites CRYOSAT, JASON 1, 2 e 3, T/P, GFO, SARAL, ERS-2 e ENVISAT com relação as diferenças do NMM encontradas foram obtidas a partir do cálculo da Correlação de *Pearson* dada pelo valor de *r* na Tabela 7. A estação de Santana foi excluída dos cálculos devido o valor da diferença do NMM ser elevado com relação as demais EMs. É importante caracterizar que a EM está posicionada no estuário do Rio Amazonas que apesar da influência fluvial (regime do rio) possui uma predominância de influência maregráfica (astronômica) o que pode ter influenciado no resultado obtido (Figura 3). Tal fato é um desafio para o Brasil que possui a EM de Santana como um de seus *Data* verticais.

A correlação da trilha do satélite CRYOSAT apresenta um valor próximo de 1, indicando uma forte correlação entre as trilhas e as diferenças contidas na Tabela 1. A missão CRYOSAT apresenta trilhas mais próximas da costa e também possui um SAR. Destaca-se o valor de 0,637 encontrado para os satélites SARAL, ERS-2 e ENVISAT que é justificável porque o modelo CNES_CLS22 contou com a inserção de novos conjuntos de dados de alta resolução do SARAL.

Figura 3 – Localização da estação maregráfica de santana.



Fonte: Os autores (2025).

Tabela 7 – Correlação entre as diferenças das altitudes do NMM dos modelos e das observações locais com as distâncias das trilhas dos satélites altimétricos.

Missão(ões)	r
CRYOSAT	0,928
JASON 1, 2 e 3 e TOPEX/Poseidon	-0,341
GFO	0,192
SARAL, ERS-2 e ENVISAT	0,637

Fonte: Os autores (2025).

4 CONCLUSÕES

Considerando a análise do modelo CNES_CLS22 em comparação aos dados de NMMs locais obtidos pelas EMs da RMPG os resultados indicam uma melhor correlação da posição das trilhas dos satélites com relação as diferenças do NMM para a missão que possui SAR em detrimento das missões convencionais, sobretudo pela proximidade da costa.

Nesse sentido, é importante destacar que a investigação da adequação de modelos de MSS aos NMMs locais contribui para as discussões do uso de modelos para auxílio na definição e materialização de um referencial vertical oceânico unificado no Brasil, principalmente ao constatar as potencialidades da missão CRYOSAT.

Por fim, um desafio é encontrado para a região da EM de Santana, que abriga um dos *Data* verticais brasileiros, pois se apresenta bastante peculiar devido ao regime de águas na região, soma-se ao fato de termos poucos dados de altimetria na região pela configuração geográfica.

5 REFERÊNCIAS

AVISO+. Satellite Altimetry Data. 2023. Disponível em: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>. Acesso em: 22 jul. 2023.

GIEHL, S.; DALAZOANA, R. Panorama Geral das Técnicas de Observação do Nível do Mar para propósitos Geodésicos. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S.L.], v. 74, n. 2, p. 266-289, 30 maio 2022. DOI. 10.14393/rbcv74n2-59409.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia 2001-2020. Rio de Janeiro. 2021. Relatório Técnico. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101890.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023.

RAYNAL, M.; LABROUE, S.; MOREAU, T.; BOY, F.; PICOT, N. From conventional to Delay Doppler altimetry: a demonstration of continuity and improvements with the cryosat-2 mission. *Advances In Space Research*, [S.L.], v. 62, n. 6, p. 1564-1575, set. 2018. Elsevier BV. DOI. 10.1016/j.asr.2018.01.006.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. Analysis of vertical reference levels in the brazilian coast: comparing local and global approaches. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 28, n. 3, p. 1-17, 2022. DOI. 10.1590/s1982-21702022000300012.

SCHAEFFER, P.; PUJOL, M. I.; VEILLARD, P.; FAUGERE, Y.; DAGNEAUX, Q.; DIBARBOURE, G.; PICOT, N. The CNES CLS 2022 Mean Sea Surface: short wavelength improvements from cryosat-2 and saral/altika high-sampled altimeter data. *Remote Sensing*, [S.L.], v. 15, n. 11, p. 2910, 2 jun. 2023. DOI. 10.3390/rs15112910.

SILVEIRA, L. N. Refinamento Do Modelo Geoidal Brasileiro para o Sul do Estado de Santa Catarina. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Área de Concentração em Dinâmica Espaço-Temporal de Informações Georreferenciadas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Santa Maria, 2010.

VITTE, A. C. O litoral brasileiro: a valorização do espaço e os riscos socioambientais. *Territorium-Revista de Geografia Física aplicada no reordenamento do território e gestão de recursos naturais*, [s.l.], v. 10, p.61-67, 2003.

WOODWORTH, P.; WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M.; GRAVELLE, M.; BINGLEY, R. Why We Must Tie Satellite Positioning to Tide Gauge Data. *Eos*, [s.l.], n. 98, p. 1-3, 3 jan. 2017. DOI. 10.1029/2017eo064037.