

VALDER ALVARO DA LUZ SILVA

**DETERMINAÇÃO DA TOPOGRAFIA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR
POR MEIO DO POSICIONAMENTO GNSS**

Presidente Prudente – SP

2024

VALDER ALVARO DA LUZ SILVA

**DETERMINAÇÃO DA TOPOGRAFIA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR
POR MEIO DO POSICIONAMENTO GNSS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da FCT\UNESP - Câmpus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientadora: Dra. Daniele Barroca Marra Alves

Presidente Prudente – SP

2024

S586d Silva, Valder Alvaro da Luz
Determinação da Topografia do Nível Médio do Mar por meio do
Posicionamento GNSS / Valder Alvaro daLuz Silva. -- , 2024
121 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente,
Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves

1. Topografia do Nível Médio do Mar. 2. Posicionamento GNSS. 3.
Modelos de TNMM. 4. Modelos Geoidais. 5. Marés Oceânicas. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Determinação da Topografia do Nível Médio do Mar por meio do Posicionamento GNSS

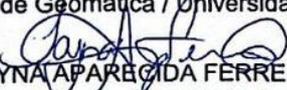
AUTOR: VALDER ALVARO DA LUZ SILVA

ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES (Participação Presencial)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Profa. Dra. REGIANE DALAZOANA (Participação Virtual)
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná


Profa. Dra. TAYNA APARECIDA FERREIRA GOUVEIA (Participação Presencial)
Pós-Doutoranda / Unesp - Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Presidente Prudente, 05 de fevereiro de 2024

DEDICATÓRIA

*Ao meu Senhor e Salvador, Jesus Cristo.
“Pois Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.
A Ele seja a glória para sempre! Amém.”
Rm 11:36*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, eu agradeço ao meu Deus por me guiar em todos os momentos durante este período de grandes desafios, novidades incríveis e imensas alegrias. Sem a capacitação, a força, a saúde e a paz que Ele me concedeu, certamente, não seria possível alcançar a realização deste sonho.

À minha esposa, Alany, por toda motivação nos momentos de fraqueza, pela paciência nos períodos de ausência, pela perseverança durante as dificuldades, pelo cuidado rotineiro e atencioso e pelo amor dedicado e verdadeiro.

Aos meus pais, Ismar e Maria de Fátima, por sempre lutarem para me dar a melhor educação possível e por sempre acreditarem, investirem e orarem por mim. Ao meu irmão, Vitor, por ser meu melhor amigo e um companheiro para todos os momentos. Sou eternamente grato por nunca desistirem de mim, mesmo nos momentos em que nem eu mesmo acreditava.

À minha orientadora, Professora Dra. Daniele Barroca, por acreditar em meu potencial, pelos ensinamentos e conselhos precisos que me auxiliaram a ingressar na vida acadêmica. Sou grato, também, pela paciência, pela compreensão e pela confiança que sempre depositou em mim.

À Professora Dra. Regiane Dalazoana e à Dra. Tayná Gouveia, por todas as contribuições ao estudo por ocasião do exame de qualificação e da defesa da dissertação.

Aos meus sogros, Jaime e Regina, por todas as palavras de incentivo e pelas constantes orações.

Aos meus tios: Ivan, Ivana, Gilvan, Severina, Jorge, Maria das Graças, Maria Aparecida, Nadir, Rubens, Eluiza, Edson e Deise por todas as orações, apoio e votos de sucesso.

À empresa Delfos Marítima, na pessoa do CMG (Rm-1) Aluízio, por apoiar esta pesquisa, cedendo um dia útil de sua embarcação hidrográfica e de seus colaboradores para que este estudo fosse realizado.

Ao amigo Felipe Santana, por todas as dicas, conselhos e ensinamentos, bem como por me ajudar a obter os dados utilizados nesta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), por todos os ensinamentos passados a mim durante o período do mestrado. Aos funcionários do programa, por todo apoio que necessitei. Aos colegas, pós-graduandos do PPGCC, pelo convívio amistoso e pelo constante incentivo.

À Marinha do Brasil, por me dar a oportunidade de cursar o mestrado e me dar todo o apoio que necessitei durante o período que estive em Presidente Prudente.

Aos demais amigos e familiares, que sempre oraram e torceram por mim durante esta caminhada.

RESUMO

O nível médio do mar (NMM), desde muitos anos, vem sendo alvo de preocupação e estudo por diversas áreas do conhecimento. Seu acompanhamento contínuo é de suma importância para assuntos relativos a mudanças climáticas, prevenção de desastres e, ainda, para a definição de referenciais altimétricos. Neste último contexto, o NMM é constantemente utilizado como uma aproximação do geoide, que consiste em uma superfície equipotencial do campo da gravidade e descreve o formato físico da Terra. Entretanto, verifica-se a existência de uma diferença entre o NMM e o geoide, denominada Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM), gerada principalmente por fatores hidrodinâmicos. A TNMM é bastante intensificada nas regiões costeiras, o que influencia na definição adequada dos referenciais verticais baseados na observação do nível do mar, sejam estes altimétricos ou batimétricos. Além disso, a determinação desta diferença torna possível a unificação destes sistemas de medições, trazendo uma série de vantagens em termos cartográficos, ambientais e operacionais. Dessa forma, tendo este mesmo foco, o presente trabalho teve por objetivo a definição da superfície topográfica do NMM, na região da Baía de Guanabara-RJ, por meio da modelagem da TNMM. Para isso, foi utilizado o posicionamento GNSS, ciência cada vez mais empregada em inúmeras aplicações que necessitam de estimativas de posições, devido ao constante aprimoramento de suas técnicas em termos de resolução e acurácia. O trabalho se iniciou com a revisão bibliográfica que forneceu a base teórica para a realização da pesquisa. Logo após, foi realizada uma pesquisa de campo, na qual dados de posicionamento foram coletados sobre uma embarcação que percorreu um trajeto específico no interior da região aludida. Ademais, foram incluídos na modelagem as alturas de maré coletadas por meio de marégrafos distribuídos pela área e dados referentes aos fatores de conversão extraídos do modelo hgeoHNOR2020, assumidos como equivalentes às ondulações geoidais da região. O resultado foi o desenvolvimento de um modelo local de TNMM com desvio-padrão de $\pm 7,4$ cm. Em seguida, este resultado foi representado em uma grade de 50 metros de resolução e comparado aos modelos de TNMM globais DTU22MDT e MDT CNES-CLS22, adequadamente interpolados sobre a área do estudo. Na comparação, foram obtidos os valores de RMSE de 2,6 cm e de 2,5 cm, respectivamente, ratificando a qualidade do modelo desenvolvido.

Palavras-Chave: TNMM, Posicionamento, GNSS, NMM, Geoide.

ABSTRACT

The mean sea level (MSL) has been a subject of concern and study across various fields of knowledge for many years. Its continuous monitoring is crucial for addressing issues related to climate change, disaster prevention, and the establishment of altimetric references. In this context, MSL is often utilized as an approximation of the geoid, representing an equipotential surface of the gravitational field that describes the physical shape of the Earth. However, a disparity exists between MSL and the geoid, termed Mean Dynamic Topography (MDT), primarily generated by hydrodynamic factors. MDT is significantly intensified in coastal regions, impacting the accurate definition of vertical references based on sea level observation, whether altimetric or bathymetric. Additionally, resolving this difference enables the unification of these measurement systems, bringing forth numerous advantages in cartographic, environmental, and operational terms. In line with this focus, the present study aimed to define the topographic surface of MSL in the region of Guanabara Bay, Rio de Janeiro, through the modeling of MDT. Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning, an increasingly employed science in applications requiring position estimates due to continual refinement in resolution and accuracy, was used for this purpose. The research commenced with a literature review providing the theoretical foundation for the study. Subsequently, a field survey collected positioning data on a vessel following a specific route within the mentioned region. The modeling incorporated tidal heights collected from tide gauges distributed throughout the region and geoidal undulation data extracted from the hgeoHNOR2020 altitude conversion model. The outcome was the development of a local MDT model with a standard deviation of ± 7.4 cm. This result was then represented on a 50 m resolution grid and compared to global MDT models DTU22MDT and MDT CNES-CLS22, appropriately interpolated over the study area. In the comparison, Root Mean Square Error (RMSE) values of 2.6 cm and 2.5 cm were obtained, respectively, affirming the quality of the developed model.

Keywords: MDT, Positioning, GNSS, MSL, Geoid.

LISTA DA FIGURAS

Figura 1: Blocos de Satélites GPS.	29
Figura 2: Segmento de Controle GPS.....	30
Figura 3: Blocos de Satélites GLONASS.....	32
Figura 4: Transmissão e Recepção do sinal GNSS.....	34
Figura 5: Demonstração geométrica do PDOP.....	36
Figura 6: Configuração para simples diferenças (SD).....	39
Figura 7: Configuração para Dupla Diferença (DD).	40
Figura 8: Comparação entre DD de pseudodistâncias e de fases.	41
Figura 9: Forças geradoras de maré.....	50
Figura 10: Interações entre as influências da Lua e do Sol sobre as massas d'água terrestre: (esquerda) interação construtiva e (direita) destrutiva.	51
Figura 11: Movimento da maré oceânica.	51
Figura 12: Comparação entre dados maregráficos e dados filtrados por FMM.	54
Figura 13: Comparação entre dados maregráficos e dados filtrados por compressão <i>wavelet</i>	55
Figura 14: Modelo geoidal MAPGEO2015.....	59
Figura 15: Modelo DTU22MDT.	64
Figura 16: Modelo MDT CNES-CLS22.....	65
Figura 17: Área de estudo.....	66
Figura 18: a) Embarcação Delfos 2; b) Antena do receptor GNSS Seapath 130.	67
Figura 19: Localização da Estação RJNI.....	68
Figura 20: Disposição dos marégrafos utilizados na pesquisa.	69
Figura 21: Dados altimétricos medidos pelos marégrafos.....	70
Figura 22: Registro de dados de 32 anos do marégrafo da Ponta da Armação.	71
Figura 23: Extrato do arquivo de saída do modelo de conversão de altitudes hgeoHNOR2020.	71
Figura 24: Fluxograma da metodologia proposta.	73
Figura 24: Carta de Correntes de Maré da Baía de Guanabara-RJ: a) 2 horas antes da preamar e b) 2 horas depois da preamar.	79
Figura 26: Distância entre estações no zoneamento de maré.	82
Figura 26: Nivelamento dos dados maregráficos.	83
Figura 27: Ilustração da metodologia adotada.....	84
Figura 29: Trajeto percorrido em relação à área de estudo.....	87

Figura 30: Resultado do posicionamento horizontal obtido pelo software RTKLIB.....	88
Figura 31: Componentes N e E do posicionamento.	88
Figura 32: Número de satélites utilizados no processamento.....	89
Figura 33: Desvios-padrões do posicionamento horizontal (m).....	90
Figura 34: Componentes verticais do posicionamento.	90
Figura 35: Desvios-padrões do posicionamento vertical (m).	91
Figura 36: Comparações entre os resultados do FMM, com janelas amostrais variadas, com a curva de maré da Ponta da Armação.....	92
Figura 37: Verificação dos NMD reduzidos à média.	93
Figura 38: Curvas de maré dos marégrafos da Ilha Rasa e da Ilha do Boqueirão reduzidos de seus respectivos valores médios	94
Figura 39: Zonas de maré na região da Baía de Guanabara.	96
Figura 40: Curvas de maré interpoladas niveladas ao NMM de 32 anos.	97
Figura 41: Modelo de Altitudes Elipsoidais do NMM em função do Tempo.	97
Figura 42: Comparação das Altitudes Elipsoidais do NMM com os Fatores de Correção do hgeoHNOR2020	98
Figura 43: Modelo de TNMM em função do tempo.	99
Figura 44: Verificação dos valores de TNMM nos cruzamentos do trajeto.....	100
Figura 45: Superfície da TNMM.	101
Figura 46: Modelos Globais de TNMM interpolados.	102
Figura 47: Superfícies Diferença.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre os filtros de dados estudados.	56
Tabela 2: Marégrafos utilizados na pesquisa.	69
Tabela 3: Configuração utilizada no processamento pelo RTKLIB.	75
Tabela 4: Análise das janelas amostrais do FMM.	91
Tabela 5: Parâmetros estatísticos do zoneamento com diversos valores de degrau.	95

LISTAS DE SIGLAS

CDMA	- <i>Code Division Multiple Access</i>
CHAMP	- <i>Challenging Mini-Satellite Payload</i>
CICVTM	- Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestres e Marítimas
CLS	- <i>Collecte Localisation Satellites</i>
CMQ	- Colocação por Mínimos Quadrados
CNES	- <i>Centre National d'Études Spatiales</i>
CODE	- <i>Centre for Orbit Determination in Europe</i>
CONCAR	- Comissão Nacional de Cartografia
DD	- Dupla Diferença
DHN	- Diretoria de Hidrografia e Navegação
DTU	- <i>Danmarks Tekniske Universitet</i>
EGM	- <i>Earth Gravitational Model</i>
EGNOS	- <i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
EKF	- <i>Extended Kalman Filter</i>
EMQ	- Erro Médio Quadrático
EPUSP	- Escola Politécnica da USP
FDMA	- <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FMM	- Filtro de Média Móvel
GAGAN	- <i>GPS and GEO Augmented Navigation</i>
GBAS	- <i>Ground-Based Augmentation System</i>
GDOP	- <i>Geometric Dilution of Precision</i>
VDOP	- <i>Vertical Dilution of Precision</i>
GEOS	- <i>Geophysical Satellite</i>
GGOS	- <i>Global Geodetic Observation System</i>
GGRF	- <i>Global Geodetic Reference Frame</i>
GGRS	- <i>Global Geodetic Reference System</i>
GLONASS	- <i>Global'naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GNSS-R	- Reflectometria GNSS
GOCE	- <i>Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
GRACE	- <i>Gravity Recovery And Climate Experiment</i>

HDOP	- <i>Horizontal Dilution of Precision</i>
IAG	- <i>International Association of Geodesy</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
ICGEM	- <i>International Centre for Global Earth Models</i>
IGFS	- <i>International Gravity Field Service</i>
IGS	- <i>International GNSS Service</i>
IHRS	- <i>International Height Reference System</i>
ISB	- <i>Inter-System Bias</i>
ISG	- <i>International Service for the Geoid</i>
ITRF	- <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	- <i>International Terrestrial Reference System</i>
LAMBDA	- <i>Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment</i>
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MDT	- <i>Mean Dynamic Topography</i>
MGG	- Modelos Globais de Geopotencial
MGO	- Modelos Globais Oceânicos
MMQI	- Método dos Mínimos Quadrados Inteiros
MSS	- <i>Mean Sea Surface</i>
NMM	- Nível Médio do Mar
NORMAM	- Norma da Autoridade Marítima
OHI	- Organização Hidrográfica Internacional
ONU	- Organização das Nações Unidas
PDOP	- <i>Position Dilution of Precision</i>
PRN	- <i>Pseudo Random Noise</i>
PZ-90	- <i>Parametry Zemli 1990</i>
RAAP	- Rede Altimétrica de Alta Precisão
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
REALT-2018	- Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais em 2018
RGRC	- Rede Geodésica de Referência Costeira
RINEX	- <i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RMSE	- <i>Root Mean Squared Error</i>
RN	- Referência de Nível
SA	- <i>Selective Availability</i>

SAT-RN	- Referências de Nível com conexão Satelital GNSS
SBAS	- <i>Satellite-Based Augmentation System</i>
SCGGSA	- Subcomissão de Gravidade e Geoide da América do Sul
SD	- Simple Diferença
SEP	- Separação entre o Nível de Redução de Maré e o Elipsoide
SGB	- Sistema Geodésico Brasileiro
SGS	- <i>Sovietic Geodetic System</i>
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLA	- <i>Sea Level Anomalies</i>
SRTM	- <i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SSH	- <i>Sea Height Surface</i>
TAI	- Tempo Atômico Internacional
TNMM	- Topografia do Nível Médio do Mar
USP	- Universidade de São Paulo
UTC	- Universal Time Coordinated
WAAS	- <i>Wide Area Augmentation System</i>
WGS-84	- <i>World Geodetic System 1984</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	Caracterização do Assunto.....	18
1.2.	Objetivos	21
1.3.	Justificativa.....	22
1.4.	Estrutura da Dissertação.....	25
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1.	Sistemas de Posicionamento.....	28
2.1.1.	GPS	28
2.1.2.	GLONASS.....	31
2.2.	Posicionamento pelo GNSS	33
2.2.1.	Observáveis GNSS.....	37
2.2.2.	Posicionamento Relativo Cinemático	41
2.3.	O Geoide	45
2.4.	O Nível Médio do Mar e a Topografia do Nível Médio do Mar	46
2.5.	Marés.....	49
2.5.1.	Experimento sobre Filtragem de Dados Maregráficos.....	53
2.6.	Modelos Globais de Geopotencial (MGG).....	56
2.6.1.	MAPGEO2015.....	58
2.6.2.	HgeoHNOR2020	61
2.7.	Modelos Globais Oceânicos (MGO)	62
2.7.1.	Modelos de TNMM	63
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
3.1.	Área de Estudo	66
3.2.	Material.....	67
3.3.	Métodos.....	72
3.3.1.	Coleta dos dados GNSS.....	74

3.3.2. Processamento dos dados GNSS	74
3.3.3. Filtragem dos Dados de Posicionamento pelo FMM.....	76
3.3.4. Coleta de Dados Maregráficos	77
3.3.5. Verificação dos dados maregráficos	77
3.3.6. Interpolação espacial dos dados maregráficos	78
3.3.6.1. Verificação da direção do zoneamento de maré	78
3.3.6.2. Adoção de referência vertical única.....	79
3.3.6.3. Cálculo da quantidade de subáreas (zonas)	80
3.3.6.4. Interpolação linear dos dados maregráficos.....	81
3.3.6.5. Cálculo do comprimento das subáreas (zonas).....	81
3.3.6.6. Validação do zoneamento de maré	82
3.3.7. Nivelamento dos dados maregráficos	82
3.3.8. Modelagem das altitudes elipsoidais do NMM	84
3.3.9. Comparação entre o modelo de altitudes elipsoidais e dados de ondulação geoidal	85
3.3.10. Modelagem da TNMM.....	85
3.3.11. Representação e comparação entre os modelos de TNMM.....	86
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	87
4.1. Posicionamento GNSS	87
4.2. Maregrafia	93
4.3. Modelagem das altitudes elipsoidais do NMM.....	97
4.4. Modelagem da TNMM	99
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	106
6. REFERÊNCIAS.....	108

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do Assunto

A Geodésia é a Ciência que tem por objetivo a determinação da geometria, do campo de gravidade e dos parâmetros de rotação da Terra, além das respectivas evoluções temporais (TORGE, 2001, SANTANA, 2020). Tais atribuições a tornam intimamente ligada ao monitoramento dos processos geofísicos que ocorrem no planeta, bem como dos resultados das ações antrópicas sobre o ambiente terrestre. Fenômenos naturais como a tectônica de placas, efeitos da atração gravitacional, marés terrestres e oceânicas e os impactos das alterações climáticas sobre o ambiente terrestre e marítimo são apenas alguns dos processos que podem ser melhor compreendidos com o avanço da Geodésia (BLEWITT, 2007).

Como um dos principais movimentos neste sentido, a Associação Internacional de Geodésia (IAG - *International Association of Geodesy*) criou, após aprovação em sua assembleia geral ocorrida em 2003, o Sistema Global de Observação Geodésica (GGOS - *Global Geodetic Observation System*). O GGOS foi criado com o objetivo de fornecer a base metrológica para todas as análises de mudanças globais e para todas as questões essenciais que lidam com a deformação e redistribuição de massas dentro do Sistema Terra, o qual abrange crosta terrestre, hidrosfera, atmosfera e criosfera. Esta base consiste na materialização de referenciais geodésicos de alta acurácia e em observações inerentes à forma, rotação e campo gravitacional terrestre (GGOS, 2023).

Referenciais geodésicos estáveis ao longo do tempo e com consistência homogênea em todo o globo são essenciais para o acompanhamento dos processos geodinâmicos do planeta (IHDE et al., 2015). Sua importância, atualmente, tem sido reconhecida não só pela comunidade científica, mas também por órgãos internacionais. Neste contexto, a Organização das Nações Unidas (ONU) adotou, em fevereiro de 2015, uma resolução que institui uma Rede de Referência Geodésica Global (GGRF – *Global Geodetic Reference Frame*) para o desenvolvimento sustentável. Nela, a ONU reconhece a necessidade de referenciais para o gerenciamento de riscos provenientes de ameaças ambientais; monitoramento das mudanças climáticas e do nível do mar e para assuntos relacionados a informações geoespaciais, mapeamento e navegação (UN-GGIM, 2019).

Como elemento fundamental para a realização desta resolução da ONU, o GGOS tem atuado para a criação do Sistema Global de Referência Geodésica (GGRS – *Global Geodetic Reference System*) (GGOS, 2023). Conforme Castro Jr. (2018), o GGRS

consiste em modelos matemáticos e físicos, teorias e metodologias geodésicas com o propósito de integrar informações como coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y e Z), potenciais gravimétricos da Terra real (W), altitudes físicas (H) e vetores de aceleração da gravidade (g).

Em última análise, este esforço visa integrar o Sistema Internacional de Referência Terrestre (ITRS – *International Terrestrial Reference System*), altamente consolidado nas últimas décadas, ao Sistema Internacional de Referência Altimétrica (IHRS – *International Height Reference System*), o qual continua sendo um desafio para os dias atuais, principalmente no que diz respeito à sua unificação. Tal desafio corresponde a uma das quatro áreas de atuação (*Focus Areas*) atuais do GGOS (unificação dos sistemas de altitude, monitoramento de ameaças ambientais, pesquisa geodésica sobre clima espacial e inteligência artificial aplicada à geodésia) que consistem em assuntos nos quais considera haver lacunas de conhecimento e necessidade de desenvolvimentos de novas pesquisas e produtos (GGOS, 2023).

Neste mesmo foco, a relação entre o geoide e o nível médio do mar (NMM) é amplamente discutida no contexto de referenciais altimétricos. O geoide é uma superfície equipotencial do campo de gravidade aceita como o modelo mais próximo da forma do planeta Terra, sendo influenciado por variações locais de massa e densidade em seu interior, a partir de onde seriam medidas as altitudes físicas. Segundo Carl Friedrich Gauss (1777-1855) esta superfície corresponde à superfície do Nível Médio do Mar (NMM) homogêneo, supostamente prolongado pelos continentes (TORGE, 2001). Porém, diversos autores reconhecem que esta definição não pode ser aplicada em toda dimensão oceânica, embora outros considerem válida ainda hoje.

O motivo desta divergência se daria pela existência de uma diferença entre as superfícies do geoide e do NMM, principalmente, em regiões costeiras devido à efeitos hidrodinâmicos provocados pelo contato da massa d'água com o fundo do mar. Esta diferença é conhecida, pelos autores que consideram sua existência, como topografia do nível médio do mar (TNMM) e sua análise contribui para a definição mais adequada dos referenciais de altitude, bem como a possibilidade da integração destes.

Algumas instituições acadêmicas vêm realizando diversos estudos neste sentido. Como fruto destes esforços, foram desenvolvidos alguns modelos globais de TNMM que visam apoiar trabalhos que necessitem de sua aplicação em assuntos relativos à Geodésia ou à Oceanografia. Entretanto, apesar de alcançarem resultados expressivos nesta temática, tais modelos globais apresentam resoluções consideravelmente baixas, com

células de dimensões superiores a 10 Km, dificultando a análise de variações locais necessárias para a aplicação adequada no contexto de integração de referenciais altimétricos. Dessa forma, o desenvolvimento de modelos locais de TNMM surge como a solução para este problema, tendo em vista a possibilidade de fornecer produtos em alta resolução, como é o caso do presente trabalho.

Existem diversas formas de mensurar e quantificar a TNMM em áreas costeiras. Dentre estas, destaca-se a utilização do Posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*). O termo GNSS refere-se aos sistemas de posicionamento baseados no uso de satélites, dentre os quais destacam-se os sistemas GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikova Sistema*), BeiDou e Galileo, bem como os sistemas de aumento (MONICO, 2008; SEEBER, 2003; HEGARTY, 2017). O GNSS apresenta inúmeras vantagens como a disponibilidade de dados em condições climáticas adversas, a não necessidade de visibilidade entre receptores e a rapidez na obtenção de coordenadas. Estas vantagens fazem com que o GNSS seja cada vez mais demandado para as mais distintas aplicações (LANGLEY et al., 2017).

No contexto da relação entre o geóide e o NMM, mesmo havendo divergências entre autores quanto à existência ou não da TNMM, o posicionamento GNSS tem sido aplicado por ambas as vertentes de pensamento, obtendo resultados expressivos em termos quantitativos e qualitativos, tanto na definição da superfície geoidal quanto na medição da TNMM (BOUIN et al., 2009, LAVROG et al., 2015, MACHUCA et al., 2018, LYCOURGHOTIS, 2021).

Dentre os autores que desconsideram a existência da TNMM, Bouin et al. (2009), utilizando um receptor GNSS instalado numa embarcação, realizaram um experimento com o objetivo de definir, com alta acurácia, a superfície do NMM na região do arquipélago de Vanuatu. Semelhantemente, Lavrog et al. (2015) empregaram o mesmo método, com algumas adequações, bem como a interpolação de dados maregráficos para obter a superfície geoidal ao longo do rio Weser, na Alemanha. Machuca et al. (2018) aplicaram também receptores embarcados nas Baías de Buenaventura e Málaga, na Colômbia. Todos estes autores alcançaram, em suas respectivas pesquisas, acurácia centimétrica na comparação com modelos geoidais globais ou regionais.

Por outro lado, considerando a presença da TNMM, Oliveira Jr. et al. (2010), no decorrer do cálculo da separação entre o nível de redução de maré e o elipsoide (SEP) na Baía de Guanabara-RJ por meio de observações GNSS, verificaram a diferença entre o

NMM estimado para o período de sua pesquisa e o geoide na região. Já em um experimento desenvolvido por Lycourghiotis (2021), um receptor GNSS posto num navio percorreu a mesma rota comercial por diversas vezes entre os Mares Jônio e Adriático, calculou a superfície do NMM na região com acurácia centimétrica e, posteriormente, confrontou este resultado com o modelo geoidal EGM96, obtendo a TNMM máxima de 48 cm. Tendo em vista as acurácias obtidas por estes estudos, a despeito das discordâncias mencionadas entre os autores, é possível verificar a factibilidade da metodologia adotada, bem como o caráter promissor do emprego do posicionamento GNSS no contexto apresentado.

No Brasil, embora existam alguns trabalhos relacionados à TNMM (DALAZOANA, 2006, OLIVEIRA JR et al, 2010, DA SILVA et al., 2015, REIS et al., 2018, SANTANA, 2020, DE SOUZA, 2021), ainda é possível o aprofundamento desta temática. Portanto, este projeto busca contribuir com o tema, por meio da modelagem da superfície topográfica de uma determinada região costeira. Para isso, foram utilizados dados de posicionamento GNSS obtidos em campo por um receptor embarcado, dados maregráficos e dados de ondulação geoidal. Por fim, a modelagem desenvolvida foi confrontada com modelos globais de superfície topográfica do nível do mar a fim de ratificar a qualidade do resultado obtido.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi obter a modelagem da TNMM de uma região marítima da Baía de Guanabara-RJ, utilizando dados de posicionamento relativo obtidos por receptor GNSS embarcado. Para tanto, foram necessários os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo sobre o posicionamento relativo e os fatores que afetam as observações GNSS neste método, em específico;
- Realizar um levantamento sobre o NMM, sua relação com a superfície geoidal e os fatores que influenciam sua definição e sua variação espacial e temporal;
- Extrair, por meio de pesquisa de campo, dados de altura do nível do mar na região da Baía de Guanabara, empregando o posicionamento relativo cinemático e filtros de dados apropriados;

- Obter, por modelagem, as altitudes elipsoidais do NMM, levando em consideração dados de maré medidos por, aproximadamente, 32 anos na Baía de Guanabara;
- Confrontar o modelo de altitudes elipsoidais do NMM com os fatores de correção extraídos do modelo de conversão de altitudes hgeoHNOR2020, os quais serão considerados equivalentes aos valores de ondulação geoidal, para verificar a existência ou a ausência da TNMM na área levantada;
- Realizar a modelagem da TNMM, utilizando o modelo de altitudes elipsoidais obtido e os fatores de correção do hgeoHNOR2020 e, por meio de métodos de interpolação, gerar uma superfície estendida pela área estudada.
- Comparar a superfície da TNMM com os modelos globais DTU22MDT, da Universidade Técnica da Dinamarca (DTU) e MDT CNES-CLS2022, do Centro de Estudos Espaciais (CNES) da França.

1.3. Justificativa

A unificação de referenciais altimétricos é fundamental para garantir a consistência e a precisão das medidas verticais em diferentes contextos geodésicos. Atualmente, tal objetivo ainda é encarado como um desafio de caráter internacional, comprovado pela existência de uma área de atuação (*Focus Area*) do GGOS específica para este assunto (GGOS, 2023). Em regiões costeiras, tal desafio se torna ainda maior pois se trata de uma interface singular, onde diversos fatores, como marés, correntes oceânicas, variações do nível do mar, subsidência do solo e atividades tectônicas, se combinam para criar obstáculos únicos na obtenção precisa de medidas verticais, sejam elas altimétricas ou batimétricas (FRANCO, 2009, LOPES, 2017, BARROS; WASSERMAN; LIMA, 2010, SANTOS et al., 2012).

Além disso, o foco em áreas costeiras se dá por sua importância estratégica em diversos setores. Regiões litorâneas abrigam, atualmente, cerca de um terço da população mundial e desempenham um papel crucial nas economias locais e globais, impulsionadas pelo comércio realizado em zonas portuárias (REIMANN; VAFEIDIS; HONSEL, 2023). Contudo, elas também representam áreas sensíveis em termos ambientais, estando sujeitas aos impactos inerentes às mudanças climáticas, com aumento do nível do mar e eventos climáticos extremos (MARENGO et al., 2016). Neste contexto, o estabelecimento de um referencial altimétrico único e bem consolidado contribui para o planejamento de políticas

governamentais que buscam a preservação destas áreas por meio da análise de riscos e do monitoramento de ameaças a fim de evitar desastres (SANTANA, 2020).

Medidas altimétricas e batimétricas possuem a mesma natureza, visto que são mensuradas sobre o eixo vertical. Entretanto, tradicionalmente, elas são encaradas de maneira distinta em termos cartográficos. No Brasil, as altitudes oficiais estão sob responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) como parte integrante do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), sendo retratadas nas cartas topográficas do território nacional. Por outro lado, a gerência sobre a cartografia de profundidades é atribuição da Marinha do Brasil, responsável pela produção de cartas náuticas onde estas medidas são assinaladas. A integração dos referenciais de ambas as medidas permitiria a conexão entre os produtos cartográficos aludidos, contribuindo para a melhoria do gerenciamento costeiro (SANTANA, 2020).

No âmbito internacional, a integração de referenciais em áreas costeiras também é uma recomendação da Organização Hidrográfica Internacional (OHI), a qual orienta que sempre deve haver a conexão entre os *data* verticais oceânico e terrestre (OHI, 2008). No Brasil, uma iniciativa da extinta Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) foi a criação do Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestres e Marítimas (CICVTM), hoje sob a supervisão do Ministério do Meio Ambiente. O CICVTM tem por objetivo a padronização de metodologia de integração das superfícies de referência para altitudes e profundidades na zona costeira, a fim de contribuir para a correta avaliação de riscos de inundação costeira provenientes de alterações climáticas.

Um dos projetos piloto estabelecido pelo CICVTM neste sentido tem, como núcleo, a Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC), a qual vem sendo desenvolvida pelo IBGE na faixa litorânea compreendida entre os municípios de Macaé e Niterói, no estado do Rio de Janeiro. A RGRC tem por objetivo subsidiar os estudos sobre a integração dos referenciais costeiros por meio da avaliação, definição e consolidação de arcabouço técnico direcionado ao estabelecimento de uma rede ao longo do litoral brasileiro que favoreça a vinculação dos níveis de referência marítimo ao sistema de altitudes terrestres (SANTOS; LUZ; SOARES, 2019).

Dentro desta temática, a determinação da TNMM é um fator extremamente importante para a integração dos referenciais altimétricos, visto que se trata de uma medida estritamente necessária para a ligação entre referenciais terrestre e marítimo, sendo estes, respectivamente, o geoide e o Nível de Redução (NR), diretamente vinculado ao NMM por meio da expressão (FRANCO, 2009):

$$NR = NMM - Z_0 \quad (1)$$

onde Z_0 é a amplitude de maré obtida por meio da análise harmônica da variação maregráfica da região. Dessa forma, ao ser determinada a ligação entre o geóide e o NMM, torna-se possível a integração destas referências altimétricas.

Teoricamente, a definição clássica de geóide não considera a diferença entre ele e o NMM. Entretanto, efeitos hidrodinâmicos, causados por fatores como ventos, marés, pressão atmosférica e correntes marítimas, tendem a exercer influência sobre o nível do mar, principalmente, em regiões costeiras, promovendo a existência do desnível que corresponde à TNMM (DALAZOANA, 2006, LYCOURGHOTIS, 2021). Neste contexto, a definição do geóide e do NMM é essencial para a mensuração desta diferença.

Tradicionalmente, o geóide tem sido determinado por uma combinação de medidas obtidas por diversas fontes: gravimetria terrestre, marítima e aérea; análise de órbita de satélites; dados de altimetria por satélites; nivelamentos geodésicos; medições astro-geodésicas e modelos matemáticos (RAAP, 1998, GUIMARÃES, 2010, BOTAI; COMBRINK, 2012, LYCOURGHOTIS, 2021). Todas estas medidas obtidas são utilizadas para o refinamento de modelos de geopotencial globais (MGG) e regionais (RAPP, 1998). No Brasil, grande parte dos esforços neste sentido é realizado pelo IBGE, o qual é responsável pelo desenvolvimento do MAPGEO 2015, atualização mais recente do modelo geoidal do território brasileiro, lançado inicialmente em 1992. Neste mesmo contexto, o IBGE desenvolveu, em 2021, o modelo de conversão de altitudes hgeoHNOR 2020 com a finalidade de converter altitudes elipsoidais em altitudes vinculadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (IBGE, 2021).

O NMM, por sua vez, normalmente é estimado por meio de séries de observações obtidas por marégrafos instalados ao longo da costa continental. Porém, com o desenvolvimento da tecnologia satelital, outras formas de acompanhar os níveis oceânicos foram desenvolvidas nas últimas décadas, como altimetria por satélites (PASCUAL et al, 2007; REIS et al., 2018; DE SOUZA, 2021), a reflectometria GNSS (NIEVINSKY; LARSON, 2014) e o posicionamento GNSS de meios flutuantes, o qual será aplicado no presente projeto junto a altitudes ortométricas, relacionadas ao geóide, para a modelagem da TNMM.

Nos últimos anos, diversos grupos se aplicaram a relacionar, em diferentes escalas, o NMM e o geóide por meio do Posicionamento GNSS. As metodologias adotadas utilizaram receptores instalados em boias (KELECY et al, 1994; MARSHALL e DENYS, 2009; KEY et al, 1998) ou em embarcações, paradas ou em movimento, dos mais diversos portes (BOUIN, 2009; LAVROG et al, 2015; MACHUCA, 2018; LYCOURGHOTIS, 2021). Contudo, tal aplicação, empregada neste trabalho, é pouco explorada no Brasil, limitando-se a poucos trabalhos (OLIVEIRA JR et al, 2010).

É interessante ressaltar que o método apresentado no presente projeto pode ser adaptado para beneficiar grandemente pesquisas referentes à unificação dos referenciais altimétricos em âmbito nacional. Isso se deve a alta disponibilidade dos dados GNSS, capazes de serem coletados ao longo dos 7.400 Km de costa brasileira, bem como no espaço marítimo nacional de, aproximadamente, 3,5 milhões de quilômetros quadrados (MARINHA DO BRASIL, 2022). Caso esta área fosse minimamente abrangida na determinação da superfície do NMM e do geóide, os resultados obtidos poderiam servir como importantes fatores para a integração e o refinamento de referenciais verticais no país, contribuindo para a melhoria do gerenciamento costeiro e da prevenção de desastres naturais. Portanto, verifica-se a importância do trabalho a ser desenvolvido, pois aborda um tema bastante atual, de grande relevância e com uma metodologia relativamente nova e útil para o cenário nacional.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é composta por 6 capítulos, estruturados conforme a descrição a seguir.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que visa contextualizar o tema abordado. Nele, são descritas as bases teóricas que fundamentam o posicionamento GNSS, com ênfase no modo relativo cinemático; a relação entre o geóide e o NMM; os principais fatores que influenciam o NMM e geram a TNMM; os Modelos Globais de Geopotencial (MGG) e desenvolvimento do MAPGEO2015 e do hgeoHNOR2020 e os Modelos Globais Oceânicos (MGO), com destaque para os modelos de TNMM.

Em seguida, no capítulo 3, será primeiramente apresentada a área onde a pesquisa foi realizada. Ademais, serão citados todos os materiais empregados na pesquisa, dentro dos quais incluem-se os equipamentos e os softwares utilizados, bem como os dados obtidos tanto em campo quanto em banco de dados digitais disponibilizados por

instituições de pesquisa nacionais e internacionais. Serão, ainda, descritos detalhadamente todos os métodos realizados na pesquisa para o cumprimento dos objetivos propostos.

No capítulo 4, os resultados de cada etapa da metodologia estarão apresentados e adequadamente analisados conforme detalhado no capítulo anterior.

Ademais, no capítulo 5, foram colocadas as considerações finais referentes ao trabalho, que contemplam as lições aprendidas, as dificuldades encontradas, as contribuições para a temática abordada e as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, o capítulo 6, é composto pelas referências bibliográficas que serviram de fonte para o desenvolvimento desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são descritos os arcabouços teóricos sobre os quais se baseia o presente trabalho. Ele está dividido em três partes: a primeira (seções 2.1 e 2.2) versa sobre os fundamentos do posicionamento GNSS; a segunda parte (seções 2.3 a 2.5) trata sobre as bases geodésicas e oceanográficas que abordam o geoide e o NMM, a relação que existe entre estas duas superfícies, os principais fatores que as influenciam e os métodos utilizados para a definição destas. Já na terceira parte (seções 2.5 e 2.6), é apresentado, de forma breve, a teoria sobre os MGG e os MGO.

Inicialmente, na seção 2.1, a primeira parte discorre sobre os sistemas de posicionamento que estão sendo utilizados na pesquisa, a evolução destes ao longo dos anos, assim como o *status* atual de suas respectivas constelações de satélites. Em seguida, a seção 2.2 se inicia apresentando informações básicas sobre o posicionamento GNSS e seus diferentes modos, dando ênfase ao método relativo cinemático. Posteriormente, esta seção segue descrevendo as principais observáveis empregadas no posicionamento GNSS, os diversos fatores que as afetam, bem como suas respectivas formulações matemáticas e as combinações que possibilitam a anulação e a mitigação dos efeitos que degradam as estimativas das posições. Por fim, ela apresenta o modelo utilizado na realização do posicionamento no modo relativo cinemático nesse trabalho.

Posteriormente, a seção 2.3 traz a definição do geoide e sua relação com o NMM. A seção seguinte descreve as características do NMM e os fatores que o influenciam e modificam, podendo gerar a existência da TNMM. Além disso, são apresentados os métodos utilizados atualmente para a medição e definição do NMM, com o foco na utilização do posicionamento GNSS para este propósito. Logo após, na seção 2.5, é detalhado o fenômeno da maré oceânica que consiste no principal efeito que atua na superfície do mar. Nesta mesma seção será, também, apresentado um estudo, realizado durante a pesquisa, onde o posicionamento GNSS foi utilizado para a medição da variação no nível do mar causado pela maré.

Em seguida, a seção 2.6 trata sobre a teoria básica sobre a construção dos MGG. Ademais, é detalhado o desenvolvimento do modelo geoidal MAPGEO2015 e do modelo para conversão de altitudes elipsoidais para altitudes normais vinculadas ao SGB, hgeoHNOR2020, utilizado neste trabalho. Por fim, na seção 2.7, apresenta-se sucintamente os fundamentos sobre os MGO, com o foco nos modelos de TNMM, os quais serviram como base de comparação para os resultados do presente estudo.

2.1. Sistemas de Posicionamento

O desenvolvimento dos sistemas de navegação global por satélites se iniciou na década de 1970, com o objetivo de determinar a posição, velocidade e tempo de um usuário num instante qualquer, independentemente da localização deste no globo ou das condições atmosféricas locais (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Os sistemas GPS e o GLONASS surgiram como os pioneiros desta tecnologia, sendo desenvolvidos concomitante e independentemente, também foram os primeiros a dispor de constelação completa e operacional. Além destes, integram o GNSS o sistema chinês BeiDou, operacional desde junho de 2020, e o sistema Galileo, desenvolvido pela União Europeia, que se encontra em fase final de implantação. O GNSS compreende ainda os sistemas de aumento baseados em estações terrestres (GBAS – *Ground-Based Augmentation System*) e os baseados em satélites (SBAS - *Satellite-Based Augmentation System*) dentre os quais existem o norte-americano WAAS (*Wide Area Augmentation System*), o europeu EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), o indiano GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*), dentre outros (LANGLEY et al., 2017). No presente trabalho, por conta das características do receptor empregado na pesquisa, serão utilizados os sistemas de posicionamento GPS e GLONASS.

2.1.1. GPS

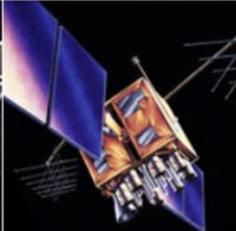
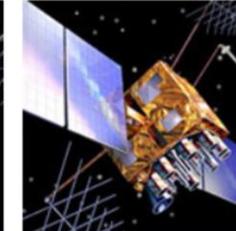
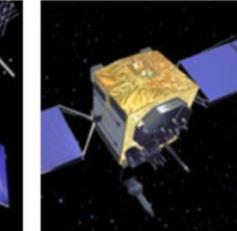
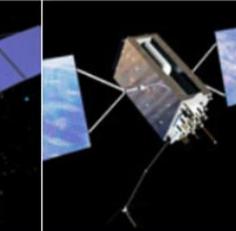
Desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos com o foco prioritariamente militar, o GPS surgiu com o objetivo de ser o principal sistema de navegação das Forças Armadas dos Estados Unidos (SEEBER, 2003). Entretanto, devido à sua alta acurácia e ao grande desenvolvimento dos dispositivos receptores do sinal GPS, diversos segmentos da comunidade civil demonstraram interesse no uso desta tecnologia nas mais variadas aplicações, como navegação, agricultura, aviação, posicionamento geodésico, entre outros (MONICO, 2008).

Sua configuração inicial consistia em 24 satélites com órbitas de, aproximadamente, 20200 km de altitude, distribuídos em seis planos orbitais com inclinação de 55° em relação ao Equador. A disposição destes satélites foi elaborada para permitir que pelo menos quatro satélites sejam vistos simultaneamente em qualquer lugar da Terra, 24 horas por dia (SEEBER, 2003).

Com o passar dos anos, este sistema foi constantemente modernizado, alcançando melhorias tanto em seus satélites quanto nos centros de controle. Até o momento, cinco

gerações de satélites GPS foram lançadas, cada uma trazendo aperfeiçoamentos ao desempenho do sistema (GPS, 2023). Dentre todos estes, destaca-se a desativação da disponibilidade seletiva (*Selective Availability – SA*), no dia 02 de maio de 2000, que degradava de forma substancial os sinais transmitidos para uso civil (MONICO, 2008). Em adição, houve também a inclusão de mais ondas portadoras para o uso civil, as quais se somaram às originais L1 e L2, sendo que esta última transmitia apenas o código P (*Precise or Protected – Preciso ou Protegido*) exclusivo das Forças Armadas norte-americana e alguns usuários autorizados (SEEBER, 2003). Outra atualização ocorreu com a criação de outro sinal civil da portadora L2, conhecido como L2C, após o início das operações do bloco de satélites IIR-M. Anos mais tarde, com o funcionamento do bloco IIF, a portadora L5 começou a ser transmitida, disponibilizando, assim, o terceiro sinal civil L5C. Hoje, a geração atual, denominada GPS III, dispõe de seis satélites em operação e trouxe para o sistema o quarto sinal civil por meio da portadora L1, o L1C. A Figura 1, apresenta todos os blocos de satélites desenvolvidos até então com suas respectivas quantidades de satélites que estão em operação atualmente. O GPS conta, hoje, com 31 satélites em órbita (FSA, 2023).

Figura 1: Blocos de Satélites GPS.

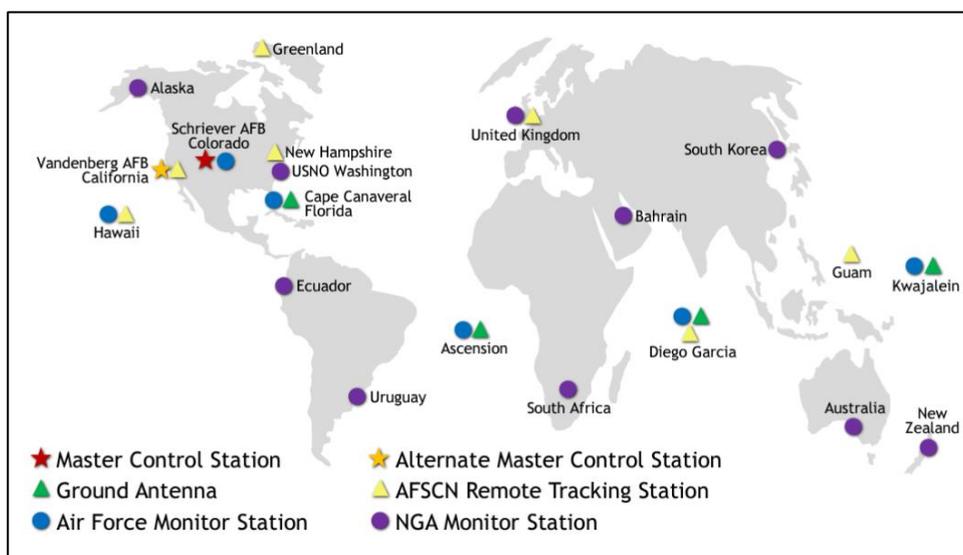
SATÉLITES LEGADOS		SATÉLITES MODERNIZADOS		
				
BLOCO IIA	BLOCO IIR	BLOCO IIR-M	BLOCO IIF	GPS III/IIF
0 operacional	6 operacionais	7 operacionais	12 operacionais	6 operacionais

Fonte: Adaptado de GPS.gov (2023).

Em se tratando do segmento de controle, este possui sua estação central localizada no Colorado, EUA, a qual supervisiona uma rede global de estações de monitoramento e antenas terrestres. Estas estações monitoras recebem os sinais originados dos satélites por meio de receptores de alta precisão e enviam suas observações para a estação central. Em seguida, tais dados são processados resultando em estimativas de posição, velocidade, parâmetros de relógio para cada satélite, bem como previsões de todas estas grandezas

para uma certa quantidade de dias seguintes. Dessa forma, estes resultados são transmitidos diariamente, pela estação central, aos satélites da constelação (SEEBER, 2003; HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008). O segmento de controle do sistema GPS, assim como sua distribuição geográfica, está demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Segmento de Controle GPS.



Fonte: GPS.gov.

Outra característica do sistema é a técnica de identificação CDMA (*Code Division Multiple Access*), na qual a frequência de transmissão é a mesma para todos os satélites e estes são diferenciados por seus respectivos códigos, denominados PRN (*Pseudo Random Noise*). As informações relativas às posições dos satélites são disponibilizadas pelas efemérides transmitidas ou precisas. As primeiras estão contidas em arquivos de navegação (formato *.n), e consistem nos elementos keplerianos que descrevem as órbitas de cada satélite e, por isso, geram arquivos com menor demanda de memória (MONICO, 2008). Por outro lado, nas efemérides precisas, subdivididas em ultrarrápidas, rápidas e finais (formato *.sp3), as órbitas são descritas por meio de coordenadas cartesianas estimadas para cada PRN em intervalos de 15 minutos. A produção destes arquivos recebe a contribuição de diversos centros de análise e está sob a responsabilidade do IGS (*International GNSS Service*) (MONICO, 2008).

O sistema de referência adotado pelo GPS é o WGS-84 (*World Geodetic System 1984*) (HEGARTY, 2017). Seu referencial de tempo tem como origem o dia 06 de janeiro de 1980, 0h UTC (*Universal Time Coordinated*), sendo baseado em relógios atômicos

dispostos nas estações de controle. A diferença entre o tempo GPS e o TAI (Tempo Atômico Internacional) é de 19 segundos, aos quais não são incrementados pelos saltos de segundos (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

2.1.2. GLONASS

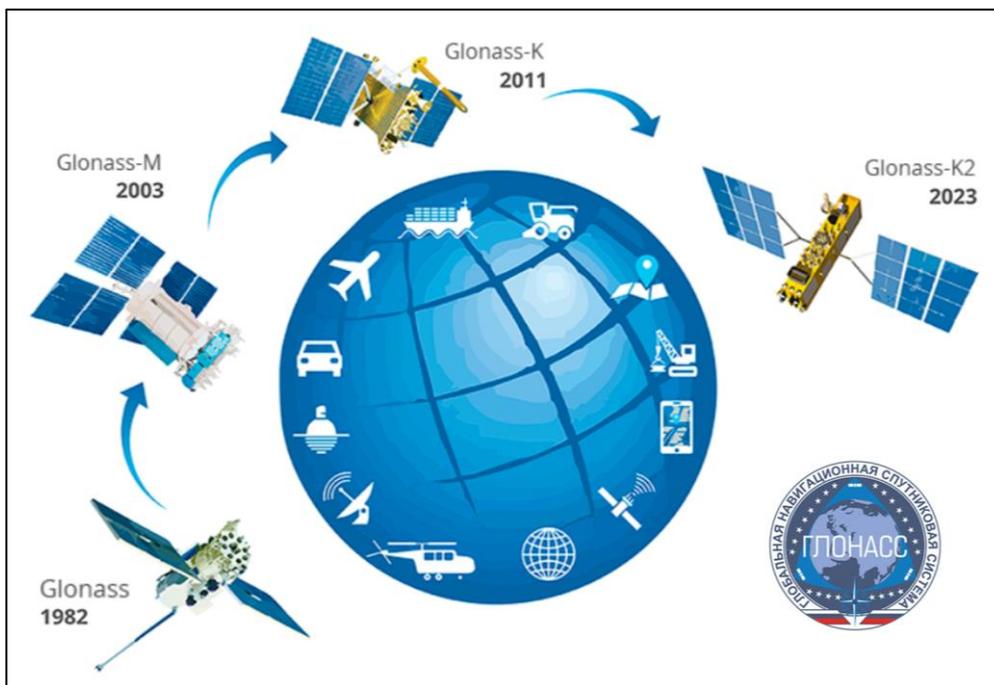
O sistema de posicionamento por satélites GLONASS teve seu desenvolvimento iniciado na antiga União Soviética durante a década de 1970 e continuado pelo governo russo a partir de 1991. Assim como no GPS, seu objetivo é a obtenção de coordenadas tridimensionais, medidas de velocidade e de tempo em qualquer lugar do planeta ou em sua proximidade, a despeito das condições climáticas. Este sistema também teve sua finalidade inicial voltada para o uso militar, entretanto, sua utilização logo se expandiu para fins civis por conta da grande possibilidade de aplicações da tecnologia (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Seu segmento espacial, originalmente, é composto por 27 satélites em órbita, sendo 24 operacionais. Estes satélites são distribuídos em três planos orbitais com inclinação de $64,8^\circ$ e separados em 120° , cada qual com oito satélites igualmente espaçados, em órbitas com altitude de, aproximadamente, 19100 km (SEEBER, 2003; REVNIVYKH et al., 2017). O maior ângulo de inclinação, comparado ao GPS, permite uma maior cobertura para regiões em altas latitudes. O período orbital do GLONASS é de 11h15min44s (Tempo Sideral) e com sua constelação operando de forma plena, é possível receber sinais de seis a onze satélites em qualquer ponto do planeta (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

Assim como o GPS, o GLONASS obteve sua constelação completa no ano de 1995. Contudo, a falta de investimentos e manutenção dos satélites da constelação, fizeram com que o sistema passasse por um período de degradação no final da década de 1990 e início dos anos 2000 (FEAIRHELLER; CLARK, 2006). Porém, após esse período de degradação, a partir de 2001, teve início um plano de restabelecimento da cobertura global e de modernização do sistema, com o lançamento de novas gerações de satélites e estações de monitoramento espalhadas pelo globo. Devido a este esforço, em 2011, o GLONASS reestabeleceu sua constelação de 24 satélites operacionais, obtendo novamente cobertura global. Atualmente, o sistema conta com 26 satélites em órbita dos quais 24 estão operacionais (GLONASS, 2023).

Diferentemente do GPS, o GLONASS, em sua concepção original, utiliza a técnica FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), na qual cada satélite do sistema possui sua própria frequência e é identificado por esta (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Com a chegada da geração GLONASS-K1, os satélites começaram a transmitir um sinal CDMA por meio de uma nova portadora (L3), além dos sinais FDMA já utilizados nas gerações anteriores. Inicialmente, era previsto que a nova geração de satélites do sistema, GLONASS-K2, tivesse sua produção iniciada em 2014 (GPS WORLD, 2014). Contudo, por conta de problemas burocráticos com a importação de componentes para o novo satélite, a produção foi adiada e teve seu início somente no final de 2018. O lançamento do primeiro satélite GLONASS-K2 ocorreu em 07 de agosto de 2023 (GPS WORLD, 2023a) . Ele conta com os sinais CDMA também nas portadoras L1, L2 e L3 (GPS WORLD, 2023b). A Figura 3 apresenta os blocos de satélites do sistema GLONASS desenvolvidos até o momento, bem como seus respectivos períodos de implantação.

Figura 3: Blocos de Satélites GLONASS.



Fonte: Adaptado de <https://glonass-iac.ru/en/about_glonass/>.

O GLONASS, da mesma forma que o GPS, também disponibiliza as informações orbitais de seus satélites por meio de efemérides transmitidas e precisas. As primeiras, no lugar dos elementos keplerianos utilizados pelo sistema norte-americano, são compostas pelas posições, velocidades e acelerações dos satélites, as quais são influenciadas, dentre

outros fatores, pelas perturbações gravitacionais do Sol e da Lua. Em se tratando das efemérides precisas GLONASS, estas possuem o mesmo formato das produzidas para o GPS, também sob a responsabilidade do IGS.

O segmento de controle do sistema russo é formado por uma estação central, outra estação incumbida de realizar a sincronização do tempo GLONASS, bem como pelas estações de monitoramento. A supervisão geral do sistema se localiza na cidade de Kraznosnamensk e as demais estações monitoras, que inicialmente estavam apenas no território da antiga URSS, estão sendo espalhadas pelo planeta, seguindo o projeto de modernização do sistema (REVNIVYKH et al., 2017).

Inicialmente, o sistema de referência adotado foi o SGS-85 (*Sovietic Geodetic System 1985*), o qual foi refinado para outro de mesma definição, o SGS-90. Em seguida, este foi alterado para PZ-90 (*Parametry Zemli 1990*), sistema de referência utilizado atualmente pelo GLONASS. O sistema de tempo é vinculado ao UTC, porém, por conta da diferença de fusos-horários entre Moscou e Greenwich, ele apresenta um *offset* constante de três horas. Esta relação inclui, também, os saltos de segundos, sendo necessário apenas a adição de um termo relativo ao uso de diferentes relógios para monitoramento das respectivas escalas de tempo. O valor desta diferença, que geralmente é da ordem de 1 milissegundo, é disponibilizado nos arquivos de navegação GLONASS (HOFMANN-WELLENHOF et al., 2008).

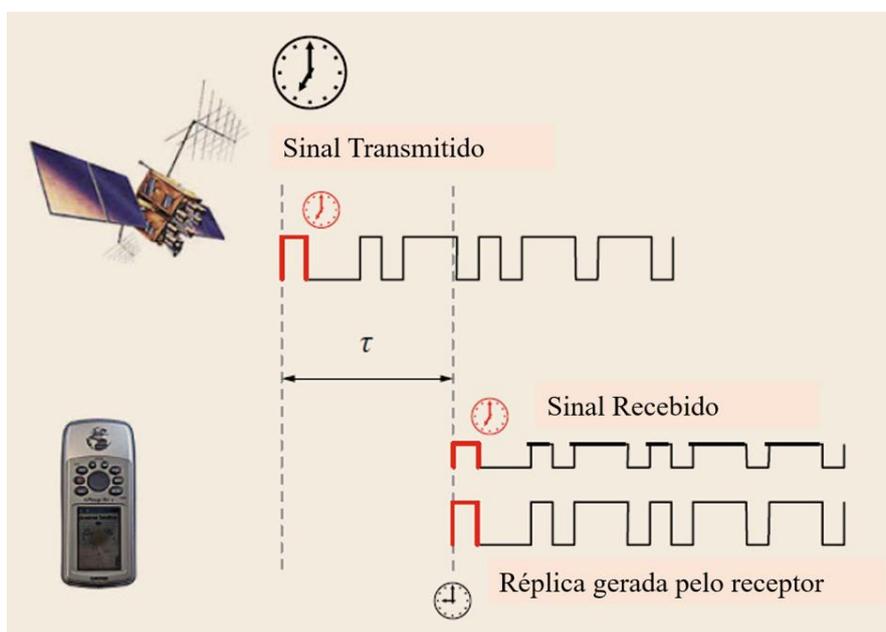
2.2. Posicionamento pelo GNSS

A partir da constelação de satélites artificiais GNSS, o usuário pode determinar a posição, o tempo e a velocidade de um receptor, estando este estático ou em movimento (MONICO, 2008). O sinal utilizado consiste em ondas eletromagnéticas com frequências que variam de 1,2 a 1,6 GHz, as quais fazem parte da denominada banda L e permitem a realização de medidas com acurácia adequada por equipamentos simples, não sofrendo atenuação significativa da atmosfera em condições meteorológicas normais (LANGLEY et al., 2017).

Uma das características dos sinais GNSS é a modulação da onda portadora com um código denominado PRN (*pseudorandom noise*). Este consiste numa sequência binária a qual é transmitida numa taxa que varia de 1 a 10 MHz e identifica cada satélite operando na maioria dos sistemas (CDMA) e numa determinada frequência. Na realização do posicionamento, os PRN são continuamente emitidos em intervalos de

poucos milissegundos a segundos e possibilita a medição do tempo de transmissão dos sinais. Esta mensuração é realizada dentro do receptor, onde uma cópia do código binário é gerada e constantemente comparada e alinhada com o sinal recebido do satélite, como ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Transmissão e Recepção do sinal GNSS.



Fonte: Adaptado de LANGLEY et al. (2017).

Mediante a comparação do tempo calculado com o do receptor, a duração da propagação do sinal e – por meio da multiplicação desta pela velocidade da luz – a distância do receptor ao satélite são obtidas.

Em suma, em se tratando de posicionamento, os sinais GNSS são capazes de fornecer, principalmente, dois tipos de medidas, comumente denominadas observáveis: a pseudodistância e a fase da onda portadora. Estas variáveis serão descritas detalhadamente na subseção 2.2.1. De forma conjunta, são também transmitidas informações referentes aos erros de relógios e às características das órbitas de cada satélite GNSS. Estes dados compõem as mensagens de navegação, as quais permitem calcular as posições e velocidades dos satélites no momento de transmissão do sinal e, assim, possibilitam a obtenção do valor da distância geométrica entre o satélite e o receptor (LANGLEY et al., 2017). Esta distância calculada, por sua vez, não é a que ocorre na realidade.

Como o cálculo é realizado de forma indireta, ele acaba sujeito à acurácia da medição dos fatores dos quais é dependente (velocidade e tempo). Ademais, para que a

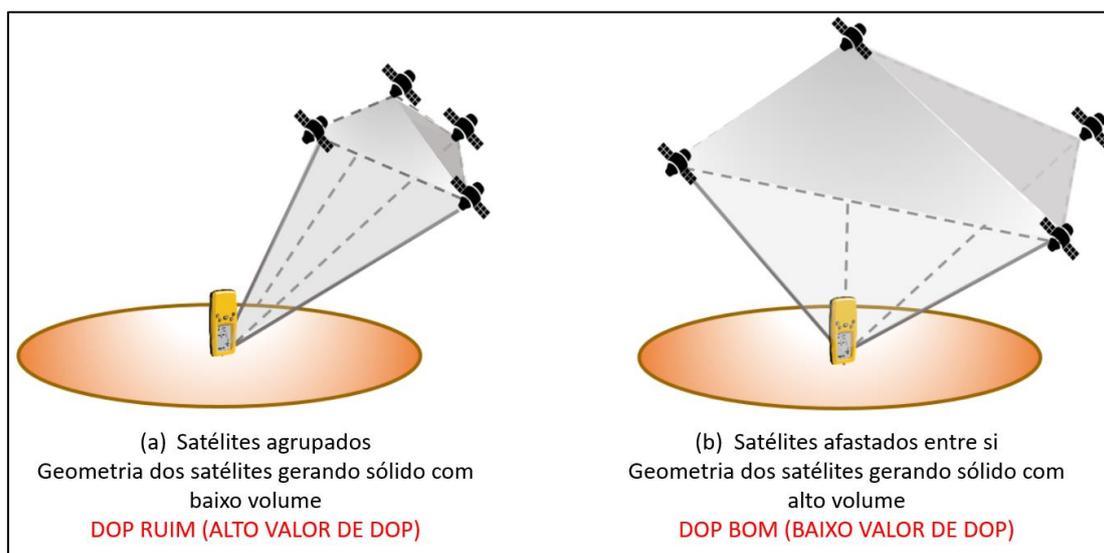
distância real seja obtida de forma adequada, todos os efeitos que influenciam os cálculos precisam ser considerados e, dependendo da natureza da influência, alguns destes precisam ser modelados e corrigidos da melhor maneira possível. Tais efeitos são denominados erros do posicionamento, cujas fontes são (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; LANGLEY et al., 2017):

- a falta de sincronismo entre os relógios dos satélites e dos receptores;
- a incerteza nos cálculos das posições dos satélites, resultante das efemérides disponibilizadas pelos centros de pesquisa internacionais (IGS, CODE, GFZ etc.);
- a influência atmosférica, a qual, em se tratando da propagação de ondas eletromagnéticas, é dividida em ionosfera e atmosfera neutra;
- a incidência de múltiplas reflexões do sinal GNSS geradas por superfícies próximas ao receptor, também chamado de efeito de multicaminho;
- atraso entre as portadoras nos *hardwares* dos satélites e dos receptores;
- diferenças dos centros de fase das antenas de transmissão e de recepção;
- efeito da relatividade devido à diferença do efeito da gravidade nos satélites e nos receptores e de suas respectivas velocidades;
- perdas de ciclo decorrentes de obstruções do sinal GNSS, altos ruídos, sinais fracos ou falha no software do receptor;
- rotação da terra;
- o efeito de fase *wind-up*, decorrente da rotação das antenas do satélite ou do receptor em torno do seu próprio eixo durante a transmissão ou recepção do sinal;
- efeito sistemático decorrente de defasagem entre canais de recepção do sinal;
- marés terrestres;
- movimento do polo terrestre;
- carga dos oceanos;
- carga decorrente da distribuição da massa atmosférica.

Além de todos estes efeitos mencionados, outro fator de grande importância que impacta na acurácia do posicionamento é a geometria formada pelos satélites e o receptor. Esta disposição causa o que se denomina diluição da precisão geométrica (GDOP – *Geometric Dilution of Precision*). Caso sejam consideradas apenas as coordenadas espaciais tridimensionais (descartando a variável tempo), a GDOP torna-se a diluição da

precisão da posição (PDOP – *Position Dilution of Precision*), a qual pode ser decomposta nas componentes horizontal e vertical (HDOP e VDOP, respectivamente). Na Figura 5, é possível observar que a PDOP é inversamente proporcional ao volume do poliedro gerado pelos vetores que ligam os satélites ao receptor.

Figura 5: Demonstração geométrica do PDOP.



Fonte: <<http://graticules.blogspot.com/2017/02/planning-gps-survey-part-2-dilution-of.html>>.

Como resultado, verifica-se que quanto maior o PDOP, pior a acurácia do posicionamento. Sua influência, somada aos fatores já descritos, são as causas de degradação da posição obtida. Logo, é necessário buscar formas de minimizar ou anular a maioria ou todos estes efeitos. Uma opção seria a utilização de diferentes métodos para realizar o cálculo das posições.

Dependendo do método utilizado, o posicionamento pode ser classificado de diferentes formas. Se as coordenadas são obtidas em relação ao geocentro tem-se o posicionamento absoluto, ou por ponto. Já quando as coordenadas são determinadas em relação a um referencial materializado tem-se o posicionamento relativo. As classificações podem ainda ser relacionadas ao estado do objeto ao ter as coordenadas determinadas, podendo ser estático quando o objeto está em repouso ou cinemático quando o objeto se encontra em movimento. Além disso, podem ainda ter relação ao processamento, podendo ser pós-processado ou em tempo real, quando as coordenadas são obtidas após ou no instante da coleta, respectivamente (KAPLAN e HEGARTY, 2006).

No posicionamento cinemático, um dos mais comuns é o relativo, devido às vantagens em termos de tratamento de erros, o que permite obter uma posição com níveis de acurácia na ordem de poucos centímetros. Porém, vale ressaltar que esta característica depende do comprimento da linha de base existente durante a coleta dos dados. No presente trabalho, este método de posicionamento foi utilizado em sua forma pós-processada, a qual será mais detalhada nos tópicos seguintes.

2.2.1. Observáveis GNSS

As principais observáveis do posicionamento GNSS são a pseudodistância e a fase da onda portadora. A primeira consiste na distância determinada por meio da multiplicação do tempo de propagação do sinal, entre o satélite e o receptor, e a velocidade da luz. Esta medição se dá no receptor por meio da correspondência do código gerado no satélite e transmitido pelo sinal de portadora específica. Ela é denominada pseudodistância devido a impossibilidade de haver um sincronismo perfeito entre os relógios na transmissão e na recepção.

A equação da pseudodistância de um satélite k , o qual é rastreado por um receptor r , considerando o instante de observação t e a frequência ou sinal identificador j , pode ser dada por (HAUSCHILD, 2017):

$$p_{r,j}^k(t) = \rho_r^k(t) + c[dt_r(t) - dt^k(t) + \delta^{rel}(t)] + T_r^k(t) + I_r^k(t) + \xi_{r,j}^k(t) + cd_{r,j}^k + e_{r,j}^k(t), \quad (2)$$

em que $p_{r,j}^k(t)$ é a observação de pseudodistância (m); $\rho_r^k(t)$ a distância geométrica entre o satélite no instante de transmissão do sinal e o receptor no instante de recepção (m); $dt_r(t)$ o erro do relógio do receptor (s); $dt^k(t)$ o erro do relógio do satélite (s); $\delta^{rel}(t)$ o termo da relatividade (s); T_r^k o atraso da atmosfera neutra (m); I_r^k o atraso ionosférico (m); $\xi_{r,j}^k(t)$ o erro referente a variações do atraso de grupo; c a velocidade da luz (m/s); $d_{r,j}^k$ a combinação das tendências (*biases*) do receptor e do satélite (s) e $e_{r,j}^k(t)$ os ruídos do receptor e multicaminho (m).

Conforme Langley et al. (2017), o posicionamento estimado com a utilização de medidas de pseudodistâncias, em situações ideais, pode atingir a acurácia de poucos metros, dependendo do método utilizado.

A fase da onda portadora, também denominada fase de batimento da onda portadora ou apenas fase, por sua vez, é uma observável mais precisa que a pseudodistância. Ela é medida por meio da diferença entre a fase gerada pelo satélite, no instante de transmissão, e sua réplica, gerada no instante da recepção do sinal. Como resultado, é obtida uma medida fracionária que se completa com o número inteiro de ciclos existentes entre a transmissão e a recepção do sinal, denominado ambiguidade da fase (MONICO, 2008).

A equação da fase da onda portadora é dada por (HAUSCHILD, 2017):

$$\begin{aligned} \varphi_{r,j}^k = & \rho_r^k(t) + c[dt_r(t) - dt^k(t) + \delta^{rel}(t)] + T_r^k(t) - I_r^k(t) + \zeta_{r,j}^k(t) \\ & + c\delta_{r,j}^k + \lambda_j(\omega_r^k(t) + N_{r,j}^k) + \epsilon_{r,j}^k(t), \end{aligned} \quad (3)$$

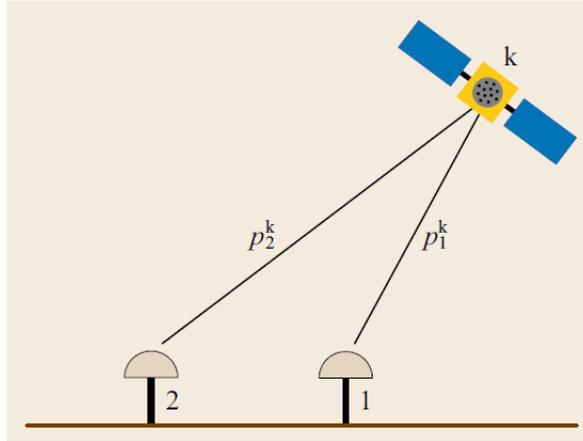
em que, além dos fatores apresentados na equação da pseudodistância, têm-se $\zeta_{r,j}^k(t)$ o erro de centro de fase (m); $\delta_{r,j}^k$ a combinação das tendências (biases) do receptor e do satélite; λ_j o comprimento de onda de frequência j (m); $\omega_r^k(t)$ a correção de fase wind-up (número de ciclos); $N_{r,j}^k$ a ambiguidade da fase (número inteiro de ciclos) e $\epsilon_{r,j}^k(t)$ os ruídos do receptor e multicaminho (m).

Os níveis de acurácia possíveis de serem obtidos no posicionamento realizado com a medição da fase são expressivamente superiores aos padrões alcançados com a pseudodistância. Enquanto esta, em situações ideais, atinge a acurácia de poucos metros, aquela é capaz de atingir níveis milimétricos, dependendo do tipo de posicionamento empregado.

As medidas apresentadas são, como mencionado inicialmente, as observáveis primitivas que, por meio de determinadas combinações, podem gerar outras conforme a aplicação requerida. Em se tratando do posicionamento relativo, geralmente, são utilizadas as observáveis que resultam das duplas diferenças (DD) da pseudodistância, da fase da portadora ou de ambas (MONICO, 2008). A configuração mínima necessária para que elas possam existir são dois satélites rastreados por dois receptores, simultaneamente.

As equações das DD são originadas a partir de equações de simples diferença (SD), que são combinações que consideram o caso em que o posicionamento é realizado com, no mínimo, dois receptores utilizando observações de apenas um satélite. Esta configuração é representada na Figura 6.

Figura 6: Configuração para simples diferenças (SD).



Fonte: Teunissen e Montenbruck (2017).

As expressões das SD considerando os receptores 1 e 2, bem como o satélite k , é dada por (HAUSCHILD, 2017):

$$p_{12}^k = \rho_{12}^k + c(dt_{12} + \delta t_{stc,12}^{rel,k}) + cd_{12}^k + \xi_{12}^k + T_{12}^k + I_{12}^k + e_{12}^k \quad (4)$$

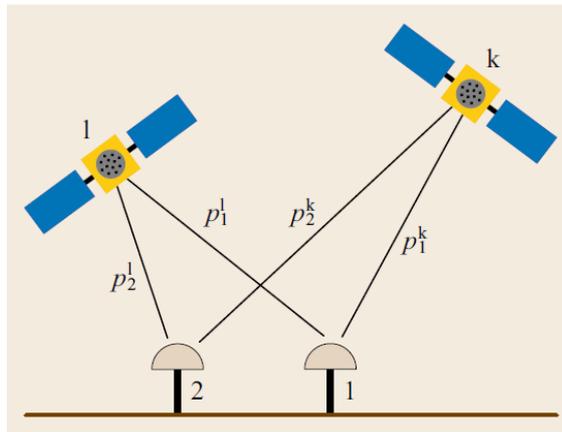
$$\varphi_{12}^k = \rho_{12}^k + c(dt_{12} + \delta t_{stc,12}^{rel,k}) + c\delta_{12}^k + \zeta_{12}^k + T_{12}^k - I_{12}^k + \lambda_1^k(\omega_{12}^k + N_{12}^k) + \epsilon_{12}^k, \quad (5)$$

em que $p_{12}^k = p_2^k - p_1^k$ e $\varphi_{12}^k = \varphi_2^k - \varphi_1^k$ representam as SD de pseudodistâncias e de fase, respectivamente, em metros.

Pode-se verificar que o termo referente aos erros do relógio do satélite, que são idênticos para duas observações sincronizadas no tempo em ambos os receptores, é descartado. O mesmo acontece com a parte da correção relativística relativa à órbita não circular, permanecendo apenas a que se relaciona com a curvatura do espaço-tempo ($\delta t_{stc,12}^{rel,k}$). Os termos T_{12}^k , I_{12}^k , ξ_{12}^k , ζ_{12}^k e $\delta t_{stc,12}^{rel,k}$ permanecem nas equações com forte dependência da distância entre as antenas dos satélites e dos receptores, pois quanto maior for este distanciamento, mais significantes são estes efeitos (HAUSCHILD, 2017).

Para que seja possível obter as equações de DD, basta realizar a subtração entre duas expressões de SD obtidas a partir das observações de dois satélites ($p_{12}^{kl} = p_{12}^l - p_{12}^k$), ou seja, a configuração mínima para tornar possível a dupla diferença é composta de, ao menos, dois satélites e dois receptores. Esta configuração é apresentada na Figura 7.

Figura 7: Configuração para Dupla Diferença (DD).



Fonte: Teunissen e Montenbruck (2017).

Dessa forma, as equações de DD, considerando os satélites k e l , bem como os receptores 1 e 2, são representadas das seguintes formas (HAUSCHILD, 2017):

$$p_{12}^{kl} = \rho_{12}^{kl} + cd_{12}^{kl} + \xi_{12}^{kl} + T_{12}^{kl} + I_{12}^{kl} + e_{12}^{kl} \quad (6)$$

$$\varphi_{12}^{kl} = \rho_{12}^{kl} + c\delta_{12}^{kl} + \zeta_{12}^{kl} + T_{12}^{kl} - I_{12}^{kl} + \lambda(\omega_{12}^{kl} + N_{12}^{kl}) + \epsilon_{12}^{kl}. \quad (7)$$

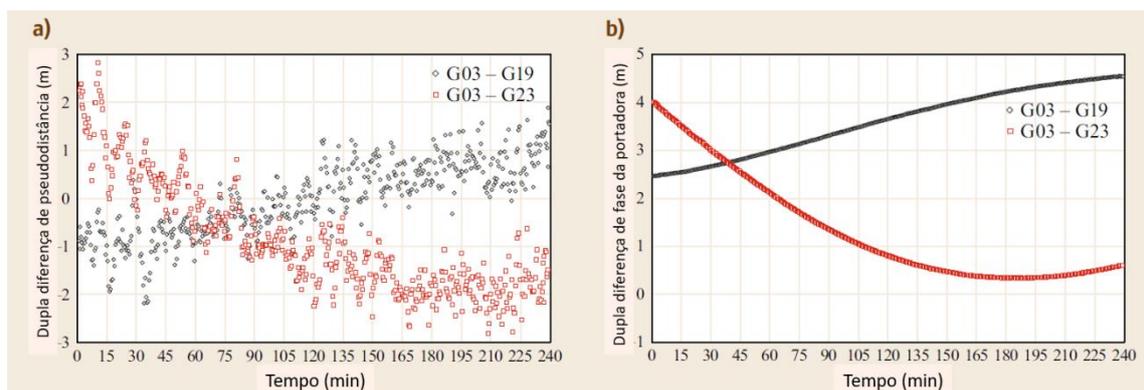
Nota-se que, nas equações (5) e (6), os erros dos relógios, tanto dos satélites quanto dos receptores, bem como as correções devido aos efeitos relativísticos são todos eliminados. Os termos referentes à atmosfera neutra (T_{12}^{kl}), à ionosfera (I_{12}^{kl}), ao atraso de grupo (ξ_{12}^{kl}) e à correção de fase *wind-up* (ω_{12}^{kl}) são todos mantidos nas equações gerais da DD, porém, em casos em que a distância entre os receptores é curta (linha de base pequena), eles também são cancelados. De forma semelhante, os fatores correspondentes aos *biases* (d_{12}^{kl} e δ_{12}^{kl}) permanecem na fórmula completa, entretanto, quando são utilizados satélites de mesmo sistema de posicionamento e receptores de características e configurações similares, tais termos também são eliminados. Caso sejam utilizados satélites de diferentes constelações, este termo será acrescido do ISB (*inter-system bias*), que não se cancelará com a obtenção da DD. Além disso, em sistemas FDMA, o erro referente ao relógio do receptor não é eliminado, visto que são utilizadas frequências diferentes em cada satélite (MONICO, 2008).

Assim, com a anulação da influência de diversos efeitos que degradariam a qualidade do posicionamento, as DD possuem a capacidade de atingir acurácias a níveis centimétricos. Esta possibilidade se verifica principalmente quando são utilizadas DD de

fase devido ao pequeno comprimento desta observável. Entretanto, cabe ressaltar a necessidade de estimar os valores inteiros da ambiguidade de DD para que estes níveis de acurácia sejam atingidos. Do contrário, haverá o enfraquecimento das soluções de alguns parâmetros, como erros dos relógios dos satélites e do receptor e os atrasos ionosféricos e da atmosfera neutra, devido à correlação direta destes com a ambiguidade (WÜBBENA et al., 2001 apud SEEBER, 2003).

A Figura 8 apresenta a comparação das DD calculadas com a pseudodistância e com a fase, considerando uma linha de base curta (4,8 m).

Figura 8: Comparação entre DD de pseudodistâncias e de fases.



Fonte: Adaptado de Teunissen e Montenbruck (2017).

Na Figura 8 observa-se que enquanto as DD das pseudodistâncias variam em poucos metros, as de fase se diferem em poucos centímetros, não sendo possível distinguir as diferenças na escala utilizada.

2.2.2. Posicionamento Relativo Cinemático

Nesta subseção, serão apresentados os modelos utilizados para a realização do posicionamento relativo. Esta modelagem é empregada no software de processamento RTKLIB (utilizado nessa pesquisa) quando o modo de posicionamento relativo cinemático é selecionado.

Inicialmente, são realizadas algumas simplificações nas equações de dupla-diferença quando são envolvidas linhas de bases curtas, cujo limite considerado será de 10 Km. Assim, as equações de DD se tornam da seguinte forma (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$p_{12}^{kl} = \rho_{12}^{kl} + e_{12}^{kl} \quad (8)$$

$$\varphi_{12}^{kl} = \rho_{12}^{kl} + \zeta_{12}^{kl} + \lambda(N_{12}^k - N_{12}^l) + \epsilon_{12}^{kl}, \quad (9)$$

em que, devido à linha de base curta, são desconsiderados os termos relativos às influências atmosféricas, aos erros de sincronização dos relógios dos satélites e dos receptores, bem como ao de fase *wind-up*. Contudo, ainda permanece o erro de centro de fase, o qual é calculado e corrigido com o auxílio do arquivo de configurações de antenas (“*.ATX”). Por fim, os termos e_{12}^{kl} e ϵ_{12}^{kl} também se mantêm, abrangendo os efeitos de multicaminho e os erros aleatórios.

Ressalta-se, na equação da DD de fase, a utilização das ambiguidades de SD para diferentes satélites (N_{12}^k e N_{12}^l), as quais são utilizadas para manter a seleção do satélite base escolhido para o posicionamento. Como critério para essa escolha, automaticamente no software, é selecionado o que apresenta o maior ângulo de elevação a cada época, fazendo, porém, a distinção entre os sistemas de posicionamento, para que não haja a incidência dos erros sistemáticos entre sistemas (*inter system bias* – ISB).

Tendo como base estas equações, utiliza-se o Filtro de Kalman Estendido (EKF - *Extended Kalman Filter*) para estimar as posições, as velocidades, as ambiguidades e os erros do posicionamento. O Filtro de Kalman é um estimador recursivo não tendencioso e de variância mínima, que realiza a estimativa do vetor estado atual combinando as observações atuais e a adição do vetor estado predito para o mesmo instante de tempo (MARQUES, 2012; GEMAEL et al., 2015). De forma geral este filtro opera em dois passos distintos: predição e atualização.

Em sua forma primitiva, o filtro de Kalman realiza a predição de estados baseados em modelos lineares, sujeitos a ruídos gaussianos. Porém, para sistemas não lineares (como é o caso das observações GNSS) foi desenvolvido o EKF, que, por ocasião da predição, realiza a linearização do vetor estado. Dessa forma, as médias e as covariâncias são linearizadas a cada época e seguem para a etapa de atualização do filtro (MEDEIROS, 2020).

Considerando o posicionamento relativo estimado com m satélites e dois receptores de dupla frequência (1 e 2), um utilizado como base (b) e outro em movimento, também denominado *rover* (r), a fase de predição de um vetor estado $x = (r_r^T, v_r^T, N_1^T, N_2^T)^T$ – composto pela posição da estação *rover* (r_r), obtida pelo posicionamento por ponto simples, sua velocidade (v_r) e pelas ambiguidades de SD em

cada frequência i utilizada ($N_i = (N_{rb,i}^1, N_{rb,i}^2, \dots, N_{rb,i}^m)^T$) – e sua matriz covariância P , numa época t_k , obedecem às seguintes fórmulas gerais (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$\hat{x}_{k+1}(-) = F_k^{k+1} \hat{x}_k(+) \quad (10)$$

$$P_{k+1}(-) = F_k^{k+1} P_k(+) (F_k^{k+1})^T + Q_k^{k+1}, \quad (11)$$

onde F_k^{k+1} é a matriz de transição que relaciona os vetores estados da época t_k para a época t_{k+1} . Por meio desta também ocorre a linearização do sistema, conforme visa o EKF. Q_k^{k+1} representa a matriz covariância dos ruídos do sistema no mesmo intervalo de tempo. Ressalta-se que as equações de predição apresentadas estão na forma geral, na qual os índices $(-)$ e $(+)$ indicam os valores antes e depois da fase de atualização do EKF, servindo, portanto, para a predição em todas as épocas subsequentes.

Em seguida, inicia-se a fase de atualização, onde os vetores de estado preditos recebem a contribuição dos vetores de medidas de DD de fases e pseudodistâncias $y = (\varphi_1^T, \varphi_2^T, p_1^T, p_2^T)^T$ – em que $\varphi_i = (\varphi_{rb,i}^{12}, \varphi_{rb,i}^{13}, \varphi_{rb,i}^{14}, \dots, \varphi_{rb,i}^{1m})^T$ e $p_i = (p_{rb,i}^{12}, p_{rb,i}^{13}, p_{rb,i}^{14}, \dots, p_{rb,i}^{1m})^T$ – bem como dos resultados obtidos mediante à aplicação dos modelos descritos pelas equações das observáveis $h(x) = (h_{\varphi,1}^T, h_{\varphi,2}^T, h_{p,1}^T, h_{p,2}^T)^T$, em que:

$$h_{\varphi,i} = \begin{bmatrix} \rho_{rb}^{12} + \lambda_i(N_{rb,i}^1 - N_{rb,i}^2) \\ \rho_{rb}^{13} + \lambda_i(N_{rb,i}^1 - N_{rb,i}^3) \\ \vdots \\ \rho_{rb}^{1m} + \lambda_i(N_{rb,i}^1 - N_{rb,i}^m) \end{bmatrix} e \quad h_{p,i} = \begin{bmatrix} \rho_{rb}^{12} \\ \rho_{rb}^{13} \\ \vdots \\ \rho_{rb}^{1m} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Assim, as equações de atualização do EKF são dadas por (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_{k-1}(-) + K_k (y_k - h(\hat{x}_k(-))) \quad (13)$$

$$P_k(+) = (I - K_k H(\hat{x}_k(-))) P_k(-) \quad (14)$$

$$K_k = P_k(-) H(\hat{x}_k(-)) (H(\hat{x}_k(-)) P_k(-) H(\hat{x}_k(-))^T + R_k)^{-1}, \quad (15)$$

em que K representa a matriz ganho de Kalman; $H(x)$, a matriz das derivadas parciais e R a matriz covariância dos erros de medidas.

Ao finalizar a fase de atualização do EKF após a última época, são obtidas a posição, a velocidade e as ambiguidades de SD. Prossegue-se, então, para o cálculo do vetor de ambiguidades de DD ($N_{rb,i}^k - N_{rb,i}^l = N$), os quais são essenciais para a realização do posicionamento de alta acurácia. Para este propósito, inicialmente, os resultados são transformados em sua forma de DD, utilizando as seguintes expressões (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$\hat{x}'_k = G\hat{x}_k(+) = (\hat{r}_r^T, \hat{v}_r^T, \hat{N}_r^T)^T \quad (16)$$

$$P'_k = GP_k(+)G^T = \begin{bmatrix} Q_R & Q_{NR} \\ Q_{RN} & Q_N \end{bmatrix}, \quad (17)$$

onde G é a matriz de transformação de simples diferença para dupla diferença. Em seguida, a solução pelo vetor de ambiguidades é realizada por meio da utilização do método dos mínimos quadrados inteiros (MMQI), expresso por (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$\tilde{N} = \underset{N \in \mathbb{Z}}{\operatorname{argmin}} \left((N - \hat{N})^T Q_N^{-1} (N - \hat{N}) \right). \quad (18)$$

Para solucionar o MMQI, o aplicativo utiliza a técnica MLAMBDA, uma modificação do método LAMBDA, o qual visa otimizar a busca pelo número inteiro adequado para a solução. Esta ferramenta matemática é dividida em duas partes: a redução do espaço de procura e o processo de busca discreta da solução. O MLAMBDA permite a realização destes dois passos de forma mais eficiente, exigindo menos capacidade computacional para a obtenção das soluções (CHANG et al., 2005).

Em seguida, o vetor inteiro encontrado por este método é validado num teste para verificar a confiabilidade da solução para a fixação da ambiguidade. Nesta verificação é definida uma razão entre as somas ponderadas dos quadrados dos resíduos de uma segunda melhor solução \tilde{N}_2 e a da considerada a melhor solução \tilde{N} , como demonstrado a seguir (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$R = \frac{(\tilde{N}_2 - \hat{N})^T Q_N^{-1} (\tilde{N}_2 - \hat{N})}{(\tilde{N} - \hat{N})^T Q_N^{-1} (\tilde{N} - \hat{N})} > R_{thres}, \quad (19)$$

onde R_{thres} é o valor limite da razão para a fixação da ambiguidade, o qual pode ser alterado conforme a decisão do usuário nas configurações do RTKLIB.

Não havendo sucesso na validação, utilizam-se as soluções *float* (reais) das ambiguidades para o cálculo das posições e das velocidades (\hat{r}_r e \hat{v}_r). Do contrário, a solução fixa da posição da antena do *rover*, \check{r}_r , e sua velocidade, \check{v}_r , são obtidas pelas seguintes equações (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$\begin{bmatrix} \check{r}_r \\ \check{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{r}_r \\ \hat{v}_r \end{bmatrix} - Q_{RN}Q_N^{-1}(\hat{N} - \check{N}). \quad (20)$$

Caso haja sucesso da validação do vetor de ambiguidades, como demonstrado anteriormente, este pode ser utilizado para melhorar a convergência dos resultados. Esta peculiaridade ocorre por meio da utilização das seguintes injunções na fase de atualização do EKF (TAKASU; YASUDA, 2013):

$$y = \check{N} \quad (21)$$

$$h(x) = Gx \quad (22)$$

$$H(x) = G \quad (23)$$

$$R = \text{diag}(\sigma_c^2, \sigma_c^2, \sigma_c^2, \dots) , \quad (24)$$

onde σ_c é o desvio-padrão do valor de injunção para valores inteiros de ambiguidades (=0,001 ciclo) e G , a matriz de transformação de simples diferença para dupla diferença.

2.3. O Geoide

O geoide foi introduzido por Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) como um modelo refinado do planeta Terra. Inicialmente, foi definido como a superfície equipotencial do campo da gravidade terrestre que mais se aproxima do nível médio dos oceanos. Esta definição física considera que a massa d'água se movimenta livremente de forma homogênea, livre de variações temporais e sujeita apenas à força gravitacional. Após atingir este equilíbrio, a superfície gerada assumiria a superfície equipotencial do campo de gravidade, a qual se estenderia pelos continentes (TORGE, 2001).

Conforme verificado pela Oceanografia, o nível médio dos mares não é uma superfície equipotencial do campo de gravidade devido à existência das correntes oceânicas e outros efeitos quase-estacionários. Além disso, sua variação temporal pode, apenas, ser parcialmente reduzida por meio do cálculo de médias ou de modelagens, já que variam por períodos muito longos.

Entretanto, Torge (2001) afirma que uma definição refinada da superfície geoidal (a nível centimétrico de acurácia) seria possível, aplicando condições mínimas sobre os desvios entre o nível médio do mar e o geoide. Uma destas condições se aplicaria ao considerar o geoide uma superfície equipotencial que melhor se adequa ao NMM em uma certa época.

Outra opção seria defini-lo como a superfície que mais se aproxima do nível do mar medido por um ou uma série de marégrafos, de longo período de observação (aproximadamente 19 anos), utilizados para a definição do *datum* vertical de uma determinada área, país ou continente. Embora o resultado não seja extensível a toda área coberta pelos oceanos, esta definição seria factível numa área considerável por meio de aproximações e correções (TORGE, 2001).

Dessa forma, é possível verificar que uma das formas de definição da superfície geoidal, considerando uma visão mais clássica do geoide, é a análise e a definição do NMM, o qual será detalhado logo adiante.

2.4. O Nível Médio do Mar e a Topografia do Nível Médio do Mar

O nível do mar varia constantemente devido a diversos fatores de diferentes escalas espaciais e temporais. Quando estes fatores periódicos são removidos, um valor estável é obtido: o NMM (COSTA, 2007).

Contrariando a definição clássica, atualmente, verifica-se que o NMM não coincide com a superfície equipotencial do campo de gravidade terrestre representada pelo geoide. A diferença entre estas superfícies é denominada topografia do nível médio do mar (TNMM). A TNMM é afetada por variações temporais de longo prazo, anuais, sazonais e de caráter transitório as quais ocorrem por diversas razões e em diferentes escalas espaciais. Porém, mesmo reduzindo todas estas influências, uma diferença quase estacionária ainda permanece, devido a efeitos oceanográficos e meteorológicos aproximadamente constantes que geram correntes marinhas e inclinações na superfície do mar (TORGE, 2001). Dessa forma, a análise destes efeitos permite realizar a medição

e o estudo do comportamento da TNMM, a qual possui grande importância para a definição da superfície geoidal em áreas marítimas.

As variações de caráter transitório da superfície marítima são basicamente as ondas de curto período, geradas por ventos locais. Seu impacto no NMM é mínimo e são facilmente atenuados por determinados procedimentos adotados durante a medição ou pela utilização de filtros de dados (SILVA, 2022).

Outras flutuações do nível do mar, de caráter sazonal, podem ser de origem meteorológica (pressão atmosférica, ventos), oceanográfica (correntes marinhas, diferenças na densidade da água, a qual é função da temperatura, pressão e salinidade) e, também, devido à variações no ciclo hidrológico (derretimento de geleiras, fenômenos meteorológicos atípicos, como monções, etc.). As oscilações periódicas decorrentes destas flutuações variam entre as ordens de 0,1 e 1 m (TORGE, 2001).

Existem também efeitos contínuos gerados pelas alterações climáticas, os quais vêm impactando, de forma permanente, o NMM no decorrer das últimas décadas. O principal deles, o aquecimento global, tem causado derretimentos de geleiras que resultam no aumento contínuo dos níveis oceânicos. Torge (2001) afirmou que a estimativa do acréscimo anual seria de 1 a 2 mm/ano, com a tendência de alcançar a adição de 0,5 a 1 m sobre o NMM atual no próximo século. Corroborando com esta afirmação, o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Changes – IPCC*) projetou o aumento do NMM global entre 0,43 e 0,84 m até o ano de 2100 (OPPENHEIMER et al., 2019).

A variação periódica decorrente da maré oceânica é o principal efeito que influencia nos níveis dos mares. Consiste na oscilação periódica decorrente da maré oceânica, resultante das forças gravitacionais dos principais corpos celestes que atuam no planeta, o Sol e a Lua (FRANCO, 2009). Tais efeitos variam de acordo com a localidade, da ordem de poucos centímetros (aproximadamente 30 cm em algumas áreas oceânicas) a valores que superam 10 m (valor máximo observado superior a 15 m, na Baía de Fundy, Canadá) (TORGE, 2001). Dada a importância desta influência, o presente trabalho se ocupará em detalhar este efeito na seção 2.5.

O estudo do NMM remonta séculos de acompanhamento e análise, os quais dependeram sempre dos métodos de coleta de dados. O registro contínuo e prolongado dos níveis dos mares só foi iniciado na década de 1770, com a utilização da régua maregráfica aderida à costa (ADEBISI et al, 2021). Normalmente, os dispositivos utilizados para coletar dados altimétricos dos mares são os marégrafos, os quais podem

ser de diversos tipos, dentre os quais a versão mecânica analógica, também conhecido como marégrafo de boia e contrapeso, é o mais simples e ainda o mais utilizado (MARCOS et al, 2019, IBGE, 2010). A tecnologia destes dispositivos se desenvolveu com as invenções dos marégrafos de pressão, acústicos e Radar (ADEBISI et al, 2021). Embora eles possuam a vantagem de possibilitar a captação de praticamente todos os movimentos que afetam o nível do mar, a maioria dos tipos de marégrafo possui a desvantagem de estarem instalados em terra, sendo suscetíveis aos movimentos verticais terrestres.

A Oceanografia também dispõe de outros métodos que, de forma indireta, conseguem definir a superfície do NMM. Um destes métodos é conhecido como nivelamento estérico, o qual assume que as superfícies equipotencial e isobárica são coincidentes em uma certa profundidade onde não há movimentação (aproximadamente 2.000 m de profundidade). Pela densidade da água, a equação de equilíbrio hidrostático fornece a diferença de potencial gravitacional (ou altura dinâmica) entre a superfície local e esta superfície estática. Sua aplicação se limita apenas a regiões de altas profundidades. Além deste método, existe também o nivelamento geostrófico, ou dinâmico, que é baseado nas equações da hidrodinâmica e na dinâmica das correntes marinhas observadas na região. Por meio dele, é possível obter o NMM em baixas profundidades, porém depende de medições acuradas das velocidades destas correntes (TORGE, 2001).

A altimetria por satélites, iniciada com o lançamento da missão GEOS-3 (*Geophysical Satellite 3*), no ano de 1975, e impulsionada de forma substancial pela missão espacial Topex/Poseidon, que esteve em operação entre 1992-2006, trouxe grandes avanços em relação à medição do nível dos oceanos, bem como na determinação do nível médio global e sua análise no decorrer dos anos (PLAG; PEARLMAN, 2009, CAZENAVE et al, 2018). Entretanto, os sinais refletidos próximos à costa (distância menor que 15 Km) recebem interferência, degradando as observações realizadas (MARTI et al, 2021). Além disso, este método possui uma taxa de amostragem muito baixa, o que impede o registro contínuo e o estudo da maré nestas áreas (SHI et al, 2020). De forma a suprir tais lacunas, o GNSS surge como uma alternativa bastante eficaz tanto para a altimetria quanto para a maregrafia.

Em geral, os dispositivos GNSS não tem a necessidade de serem instalados junto a costa, além de serem capazes de fornecer informações referenciadas à Materialização do Referencial Internacional Terrestre (ITRF - *International Terrestrial Reference Frame*), facilitando a integração dos dados altimétricos obtidos com os já existentes (ADEBISI et

al, 2021). Atualmente, a tecnologia GNSS vem sendo aplicada na estimativa do NMM com a utilização dos seguintes métodos:

- Por meio de boias GNSS (ADEBISI et al, 2021; SUN et al, 2018), aplicando o posicionamento cinemático em tempo real (RTK) (LIN et al, 2017), o posicionamento por ponto preciso (PPP) (MAQUEDA et al, 2016) ou o cinemático pós-processado (SUN et al, 2018);
- Reflectometria GNSS (GNSS-R), que utiliza o princípio dos efeitos de multicaminho para inferir os atributos do ambiente ao redor da antena do dispositivo (NIEVINSKI; LARSON, 2014). Diversos estudos têm verificado a utilidade desta técnica na estimativa do NMM (PUENTE e VALDÉS, 2019; LÖFGREN, 2014; BAO et al, 2016);
- Embarcações equipadas com GNSS, as quais, em regiões abrigadas, permitem o cálculo e o estudo do NMM (OLIVEIRA Jr. et al., 2010) e contribuem para a coleta de dados de altura do nível do mar quando percorrendo longos trajetos (FOSTER et al, 2009; PINEAU-GUILLOU e FOSTER, 2013).

O registro da variação do nível do mar por este último método também permitiu estudos com o objetivo de definição do NMM e da TNMM (LAVROG et al, 2015; LYCOURGHOTIS, 2021).

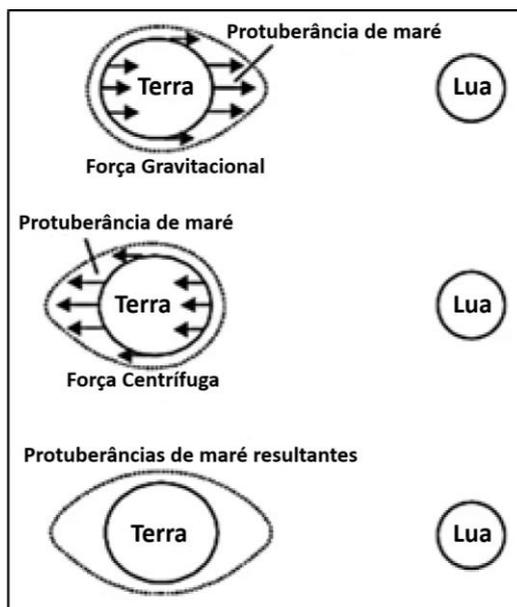
2.5. Marés

Segundo Franco (2009) maré é a variação periódica do nível do mar sob a influência de forças astronômicas. Sua análise é essencial para a definição do NMM de maneira adequada, visto que é o principal fenômeno que altera do nível do mar. Seu estudo se iniciou ainda na antiguidade, sendo interesse de personalidades, como Aristóteles (384-322 a.C.), Newton (1643-1727) e Laplace (1749-1827). Anos depois, o conhecimento sobre o tema foi refinado por pesquisadores como Thompson (1824-1907), Darwin (1845-1912), Doodson (1890-1968) e Cartwright (1926-2015), cujas contribuições possibilitaram uma elevada compreensão do fenômeno (COSTA, 2007).

A maré é, primordialmente, o resultado da atuação da força de atração gravitacional entre a Terra e a Lua, bem como da força centrífuga gerada pela rotação do planeta ao redor do centro de massa do sistema Terra-Lua. O efeito promovido pelo equilíbrio destas forças é o acúmulo de massa d'água na direção dos vetores resultantes que acompanham

o movimento orbital lunar, cujo período é de 27,3 dias (FRANCO, 2009). A Figura 9 ilustra a construção deste fenômeno.

Figura 9: Forças geradoras de maré.

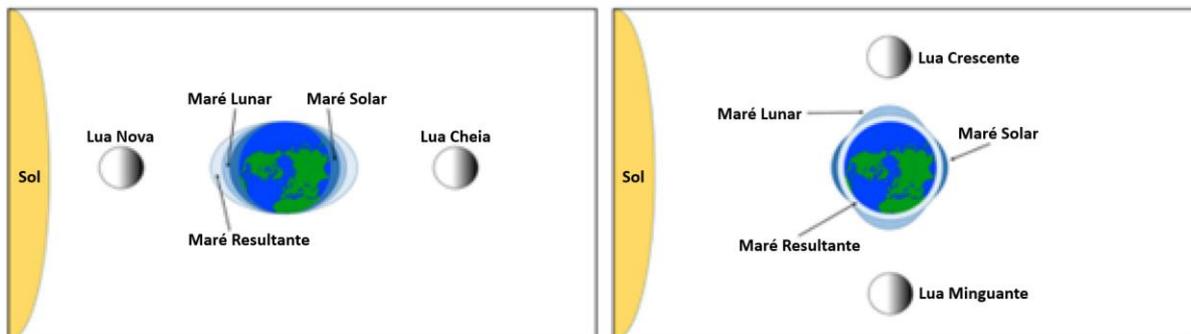


Fonte: Adaptado de <https://edurev.in/t/167558/Long-Question-Answers-Movements-of-Ocean-Water>.

Este movimento resultante aliado à dinâmica de rotação terrestre, com período de 24 horas, ocasiona a variação vertical, aproximadamente diária, dos níveis dos mares. Dependendo do local onde a maré é observada, o fenômeno pode completar um ou dois ciclos a cada 24h50min, período equivalente a um dia lunar médio.

Analogamente, as mesmas interações gravitacionais ocorrem entre a Terra e o Sol, também causando movimentos similares nas massas d'água, porém com menor intensidade. Como consequência, os efeitos gerados pelas influências lunar e solar acabam interagindo de forma construtiva ou destrutiva como apresenta a Figura 10.

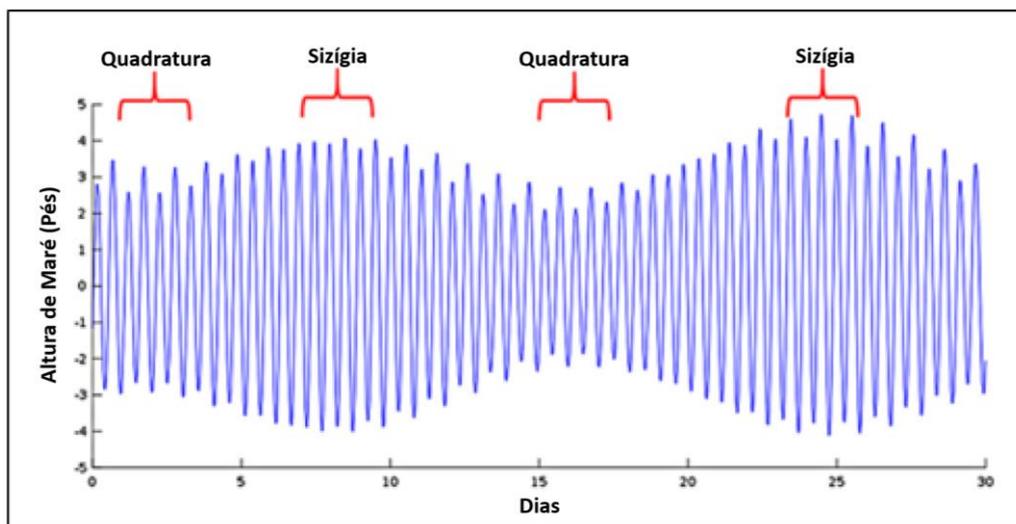
Figura 10: Interações entre as influências da Lua e do Sol sobre as massas d'água terrestre: (esquerda) interação construtiva e (direita) destrutiva.



Fonte: Adaptado de <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/11-1-tidal-forces/>.

Assim, levando em consideração apenas estes efeitos descritos, é possível reproduzir, de forma básica, o movimento da maré oceânica. A Figura 11 exemplifica o fenômeno.

Figura 11: Movimento da maré oceânica.



Fonte: Adaptado de <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/chapter/11-1-tidal-forces/>.

Na Figura 11, é possível observar os períodos de interação construtiva e destrutiva, os quais são denominados maré de sizígia e maré de quadratura, respectivamente. A primeira ocorre em períodos de Lua cheia e nova, enquanto a outra, nos quartos crescente e minguante da Lua (FRANCO, 2009).

Entretanto, numa análise mais abrangente do fenômeno, a maré também é afetada por outros fatores de maior escala temporal. Por estar intimamente ligada ao movimento

orbital lunar, ela também é influenciada pelas variações periódicas deste movimento. Dentre estas, destaca-se a precessão da órbita da Lua, verificado pela movimentação de seu nodo ascendente em relação ao ponto vernal. Esta variação se completa a cada 18,61 anos, possuindo, dentre as oscilações periódicas, o maior período factível de ser observado (o período de outras variações orbitais lunar e terrestre podem chegar a dezenas de milhares de anos) (OPEN UNIVERSITY, 1999, PUGH, 1996). Dessa forma, o conhecimento adequado do movimento da maré em uma certa região requer uma série de observações de, no mínimo, 18,61 anos.

O cumprimento deste requisito é de suma importância em termos de definição de referenciais verticais que se baseiam na determinação do NMM. A OHI recomenda o registro e a análise maregráfica do mesmo período de 18,61 anos para a definição do nível de referência batimétrico e para a unificação dos *data* verticais (OHI, 2008). Da mesma forma, a teoria clássica de determinação dos referenciais terrestres exigia o mesmo período de observação do nível do mar para o estabelecimento das origens das medições altimétricas (LUZ; GUIMARÃES, 2003 apud SANTANA, 2020).

Além de todos os fatores descritos, a maré também recebe influência de elementos não astronômicos como a ação meteorológica e processos hidrodinâmicos. A atuação dos ventos e a variação da pressão atmosférica são capazes de alterar os padrões de circulação e os gradientes de superfície estabelecidos nos oceanos. Logo, fenômenos como tempestades, ciclones e sistemas frontais acabam afetando a dinâmica das ondas de maré, principalmente em latitudes maiores, onde a incidência destes eventos tende a ser maior (PUGH, 1996).

Os processos hidrodinâmicos são decorrentes da interação da massa d'água com o fundo e com seus limites costeiros. Isto ocorre devido à distribuição desigual das profundidades pelas áreas marinhas e ao impedimento natural gerado pelos continentes. Esta interação resulta, principalmente, na dissipação da energia da onda de maré, que, por sua vez, resulta em modificações na amplitude, na direção e no sentido de propagação do fenômeno. Tanto este efeito quanto a ação meteorológica têm, por consequência, impactos na dinâmica da maré e na definição do NMM (PUGH, 1996, TORGE, 2001).

A análise matemática deste evento é realizada por meio da expansão harmônica, onde uma determinada altura da maré $\xi(x, t)$, numa posição x e época t , é o resultado do somatório de N_c componentes, representadas em termos de amplitude A_k e atraso de fase em Greenwich $G_k(x)$, conforme a expressão (25) (DOODSON, 1921).

$$\xi(x, t) = \sum_{k=1}^{N_c} A_k(x) \cos[\omega_k t - V_k - G_k(x)] \quad (25)$$

onde ω_k e V_k são a frequência e a fase astronômica da componente k , respectivamente.

Foram definidas dezenas de componentes que contribuem para a variação da maré, cujos períodos são superiores a 8h (FRANCO, 2009). Assim, para que seja possível a análise apropriada deste fenômeno, quaisquer variações com período inferior que sejam detectadas por ocasião da medição no nível do mar precisam ser descartadas.

No presente trabalho, a medição do nível do mar foi realizada por um receptor GNSS instalado em uma embarcação em movimento, o qual captou diversas variações de alta frequência durante a pesquisa. Então, a necessidade de anular estes ruídos motivou a realização de um experimento onde foram testados filtros de dados discretos para extrair dados de maré a partir de dados GNSS. Maiores detalhes sobre este estudo seguem na subseção seguinte.

2.5.1. Experimento sobre Filtragem de Dados Maregráficos

Como explicado na seção anterior, para o estudo de marés, são importantes apenas oscilações de baixa frequência e ao coletar dados GNSS, uma grande quantidade de ruídos de alta frequência é esperada. Muitos destes são provenientes da própria variação instantânea do nível do mar, porém, devido aos seus comportamentos e características, eles não têm relação com a variação causada pelas forças geradoras de maré e, portanto, há a necessidade de serem retirados do sinal coletado para que somente a maré local possa ser analisada.

Sobre este assunto, foi realizado um estudo que buscou verificar, dentre dois tipos de filtros, qual deles seria o mais adequado para a extração de dados maregráficos a partir de dados de posicionamento GNSS. Em seguida, como uma forma de aplicação prática dos resultados, foi realizado a classificação da maré na região da Baía de Guanabara.

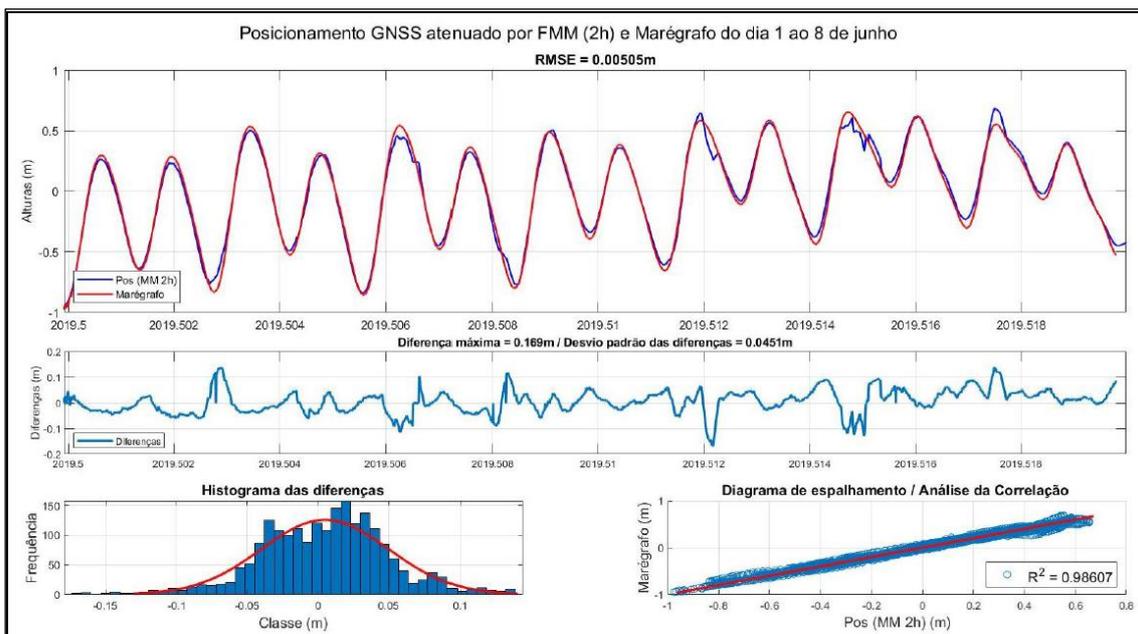
Grande parte deste trabalho consistiu basicamente na realização de comparações entre dados filtrados, originalmente obtidos a partir do posicionamento vertical realizado por um receptor instalado em uma embarcação amarrada ao cais da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), no período de 01 a 08 de junho de 2019. Como informações de referência, foi coletada, de forma concomitante, a sequência de alturas do nível do mar por um marégrafo situado nas proximidades da embarcação.

Neste estudo, foram realizados testes com dois filtros passa-baixa de diferentes características: a compressão *wavelet* e o filtro de média móvel (FMM). O primeiro método consiste numa ferramenta de remoção de altas frequências por meio da utilização do banco de filtros de bases ortogonais, uma das aplicações da transformada *wavelet* discreta. Sua configuração tem, como principais parâmetros, a função *wavelet* mãe escolhida, o número de momentos nulos desta função e a quantidade de níveis de aproximação do banco de filtros (MALAT, 2009).

Por outro lado, o FMM realiza a filtragem a partir do cálculo de médias sucessivas ao longo do sinal discreto de entrada. Ele depende apenas do tamanho de sua janela amostral, sendo bem mais simples que o filtro anterior (SMITH, 1999). Sua apresentação e descrição mais detalhada será realizada na subseção 3.3.3.

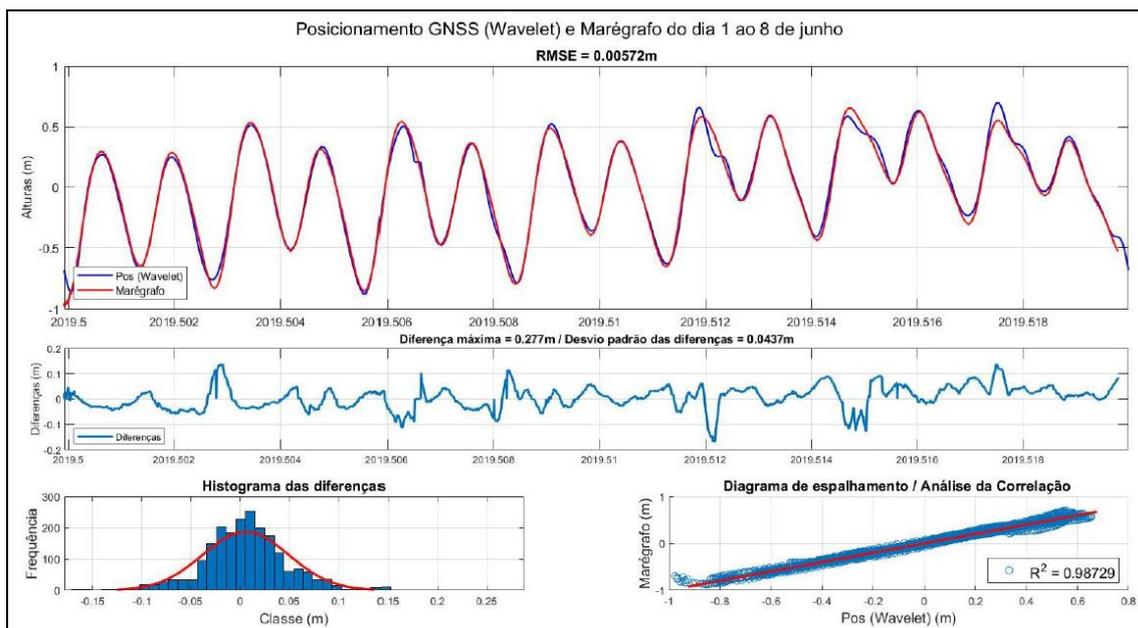
Os testes foram realizados com diferentes parâmetros em cada filtro, sendo calculados, em cada um dos testes, grandezas estatísticas que representavam o grau de proximidade entre o resultado obtido e os dados maregráficos de referência, os quais não necessitaram de tratamentos adicionais. Nas Figura 12 e Figura 13 pode-se verificar graficamente a comparação realizada entre a melhor configuração da compressão *wavelet* e a do FMM, respectivamente.

Figura 12: Comparação entre dados maregráficos e dados filtrados por FMM.



Fonte: MATLAB.

Figura 13: Comparação entre dados maregráficos e dados filtrados por compressão *wavelet*.



Fonte: MATLAB.

As comparações apresentadas nas Figura 12 e Figura 13 consistiram, no primeiro quadro, na plotagem das alturas do NM, obtidos pelo marégrafo utilizado como referência, junto aos resultados obtidos a partir dos filtros de dados; o segundo quadro mostra o comportamento das diferenças entre os dados plotados; em seguida, no canto inferior esquerdo, é demonstrado o histograma das diferenças e, por fim, o último quadro mostra o diagrama de espalhamento dos dados comparados. Em ambas, é possível atestar graficamente a similaridade dos filtros, os quais apresentaram resultados com comportamentos muito semelhantes aos dados de referência.

Na Tabela 1, são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos calculados para validar, de forma quantitativa, a comparação realizada entre as melhores configurações. Os parâmetros escolhidos foram o RMSE, o desvio-padrão (σ) e o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 1: Comparação entre os filtros de dados estudados.

Método de Suavização	RMSE (mm)	σ (cm)	R ² (%)
Filtro de Média Móvel de 2 horas (480 dados)	5,05	4,51	98,6
Compressão por <i>wavelet</i> de <i>Daubech</i> y de 14 momentos nulos, com aproximação em 9 níveis de frequência	5,72	4,37	98,73

Fonte: O autor.

Pela Tabela 1, também é possível verificar a similaridade entre os métodos, embora haja uma vantagem mínima da compressão *wavelet* sobre o FMM quando confrontados os parâmetros calculados. Entretanto, por não haver uma diferença significativa entre os resultados e por se tratar de um método de simples aplicação e implementação, o FMM foi considerado o mais adequado para o objetivo requerido pelo projeto em lide.

2.6. Modelos Globais de Geopotencial (MGG)

O entendimento preciso do campo gravitacional terrestre é um fator essencial para a Geodésia. Compreender as variações e características deste campo é fundamental para o desenvolvimento de sistemas de referência confiáveis e a determinação acurada de altitudes em todo o planeta. Além disso, esta compreensão possibilita a realização de correções em observações geodésicas, fazendo com que elas levem em consideração as variações gravitacionais em seu processo de medição, resultando em maior precisão e confiabilidade destas medidas (IBGE, 2021). Com isso, áreas como a cartografia, a engenharia civil e a geofísica podem ser muito beneficiadas com o avanço deste entendimento.

A base teórica que possibilitou o desenvolvimento dos modelos do campo gravitacional foi construída durante muitos anos por pesquisadores como Clairaut, deSitter, Helmert, Pizzeti, Somigliana e Lambert. Eles foram fundamentais para formular matematicamente as variações da gravidade do planeta Terra, considerando sua massa, raio e achatamento. Ademais, medições de gravidade distribuídas por toda superfície

terrestre permitiram o refinamento desta base teórica, a qual foi intensificada à medida em que a quantidade de dados gravimétricos foram aumentando (RAPP, 1998).

Neste sentido, o advento da era espacial, com o lançamento dos satélites artificiais, contribuiu substancialmente para o aumento da disponibilidade de dados gravitacionais. Dentre eles, destacaram-se os satélites das missões CHAMP (*CHALLENGING Mini-satellite Payload*), a qual esteve em operação de 2002 a 2010, GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), de 2002 a 2017, e GOCE (*Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer*), de 2009 a 2013, que contribuíram com informações do campo gravitacional com uma acurácia e resolução espacial sem precedentes (FLECHTNER; SCHUH; SNEEUW, 2014 apud SANTANA, 2020). Assim, a crescente quantidade de dados terrestres e espaciais aliada ao contínuo desenvolvimento computacional permitiram o desenvolvimento dos Modelos Globais de Geopotencial (MGG).

O MGG consiste numa aproximação matemática do potencial gravimétrico externo da Terra, sendo composto por um conjunto de coeficientes e suas respectivas incertezas. Segundo Sansò e Sideris (2013), determinadas grandezas vinculadas ao potencial gravitacional, denominadas funcionais do campo de gravidade, também estão contidas em um MGG. Dentre estas, estão os distúrbios da gravidade, as anomalias da gravidade, as anomalias de altitude, as ondulações geoidais e os valores de gravidade sobre o elipsoide e a superfície terrestre (INCE et al., 2019).

Normalmente, o MGG é expresso por meio de coeficientes obtidos no desenvolvimento da expressão do potencial gravitacional em harmônicos esféricos, descrita por Tapley et al. (2004 apud BOTAI; COMBRINK, 2012) na equação:

$$V(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} + \frac{GM}{r} \sum_{n=1}^{N_{\text{máx}}} \sum_{m=0}^l \left(\frac{\alpha}{r}\right) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) [\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda]. \quad (26)$$

Da equação (26), $V(r, \varphi, \lambda)$ é o potencial gravitacional na coordenada esférica (r, φ, λ) ; α , o raio equatorial da Terra; G , a constante gravitacional; M , a massa da Terra; \bar{P}_{nm} o polinômio de Legendre e $\{\bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}\}$ são os coeficientes esféricos normalizados de grau n e ordem m . Conforme Guimarães (2010), os valores estimados para estes coeficientes, obtidos até um grau e ordem L , representam um modelo de geopotencial. Teoricamente, o grau e a ordem possuem correlação direta com a resolução e a acurácia

do modelo, ou seja, quanto maiores forem estes fatores, melhores são sua resolução e sua acurácia (GUIMARÃES, 2010, BOTAI; COMBRINK, 2012).

Dependendo da base de dados utilizada para a construção dos MGG, eles podem ser divididos em três classes primárias (RAPP, 1998, FEATHERSTONE, 2002, GUIMARÃES, 2010, BOTAI; COMBRINK, 2012):

- MGG derivados apenas de dados satelitais: Modelos obtidos por meio da análise das órbitas dos satélites artificiais;
- MGG combinados: gerados a partir da combinação de dados gravimétricos terrestres e oceânicos, dados de altimetria satelital e aerogravimetria. A integração destes dados possibilita o aumento no grau dos coeficientes esféricos obtidos pelo MGG;
- MGG adaptados: desenvolvidos com base em MGG enquadrados nas demais classes e ajustados por meio da aplicação de novos dados, não necessariamente já aplicados.

Desde 2003, o Centro Internacional de Modelos Globais da Terra (ICGEM - *International Centre for Global Earth Models*), criado pelo Serviço Internacional do Campo de Gravidade (IGFS - *International Gravity Field Service*) da IAG, tem a responsabilidade pela validação, gestão e divulgação dos MGG, além de disponibilizar ferramentas interativas de cálculos e apresentação dos modelos. Em setembro de 2023, estavam disponíveis no endereço eletrônico do ICGEM¹, de forma gratuita, 180 MGG estáticos desenvolvidos por diversas instituições e centros de pesquisas internacionais. Dentre eles, destaca-se o modelo EIGEN-6C4, cujos dados foram utilizados como base para o modelo geoidal brasileiro MAPGEO2015, o qual será apresentado a seguir.

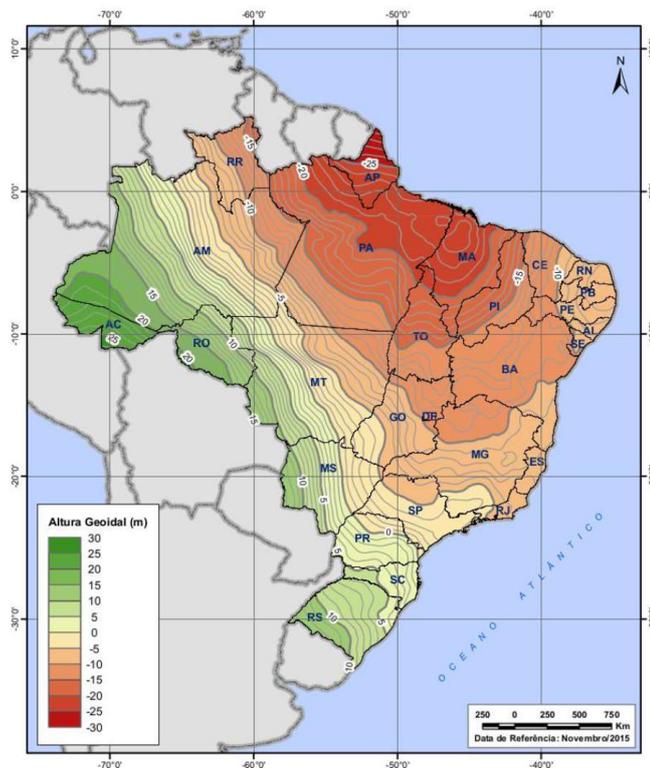
2.6.1. MAPGEO2015

O MAPGEO2015, assim como seus antecessores (MAPGEO92, MAPGEO2004 e MAPGEO2010), foi concebido e construído de forma conjunta pelo IBGE e a Escola Politécnica da USP (EPUSP). Este projeto também contou com o apoio da Subcomissão de Gravidade e Geóide da América do Sul (SCGGSA) e da IAG, por meio do Serviço Internacional do Geóide (ISG - *International Service for the Geoid*) (BLITZKOW et al.,

¹ http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime.

2016). Seu objetivo é fornecer a ondulação geoidal de pontos de interesse do usuário, cujas coordenadas sejam referenciadas ao SIRGAS2000 e compreendidas entre as latitudes 6°N e 35°S e entre as longitudes 75°W e 30°W no território brasileiro (IBGE, 2023), como apresenta a Figura 14.

Figura 14: Modelo geoidal MAPGEO2015.



Fonte: Blitzkow et al. (2015).

Segundo Santana (2020), o MAPGEO2015 pode ser considerado como um exemplo de MGG adaptado, pois utilizou, em sua construção, dados de outro modelo estabelecido e foi personalizado para um propósito específico por meio de refinamentos regionais. Entretanto, o autor também afirma que, por disponibilizar, dentre as demais funcionais do campo de gravidade, apenas valores de ondulação geoidal, sua classificação mais correta seria de um modelo geoidal.

A ondulação geoidal ou altura geoidal (N) é a funcional que representa o desnível entre o elipsoide de referência e o geóide, por meio dos quais são medidas as altitudes geométricas (h) e ortométricas (H), respectivamente. A relação entre estas altitudes se dá pela equação (GEMAEL, 2012):

$$H = h - N \quad (27)$$

A necessidade por, especificamente, modelos geoidais decorre da utilização cada vez mais frequente do posicionamento GNSS, que fornece altitudes geométricas, em aplicações como cartografia e engenharia civil, que necessita de altitudes ortométricas para seus objetivos próprios. Assim, estudos com o foco de determinação cada vez mais precisa da superfície geoidal e da ondulação geoidal em território brasileiro foram incentivadas (BLITZKOW et al., 2016, MATOS; BLITZKOW, 2008, MACHADO; BLITZKOW; MATOS, 2013), resultando em um modelo geoidal preciso e confiável.

A modelagem da ondulação geoidal se dá por meio da equação (BLITZKOW, 1996 apud GUIMARÃES, 2010) :

$$N(\varphi, \lambda) = N_L(\varphi, \lambda) + \delta N_L(\varphi, \lambda) \quad (28)$$

onde N_L representa a componente de médio e longo comprimento de onda da ondulação geoidal e δN_L , a componente de curto comprimento. Normalmente, a primeira é calculada a partir de um MGG, estendendo sua série até determinado grau e ordem. A segunda componente é obtida por meio de medições gravimétricas (GUIMARÃES, 2010).

No caso do MAPGEO2015, as componentes de longo e médio comprimentos foram determinadas com base nos coeficientes do modelo EIGEN-6C4, até grau e ordem 200. Por outro lado, as de curto comprimento vieram da integração entre os dados gravimétricos de 947.953 estações distribuídas pela América do Sul, sendo 450.589 localizadas em território brasileiro, e informações do Modelo Digital de Elevação (MDE) SAM3s_v2, um dos produtos gerados por dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). O sistema de maré permanente utilizado neste modelo foi o de maré livre² (BLITZKOW et al., 2016).

Em termos de resolução, o MAPGEO2015 disponibiliza dados de ondulação geoidal numa grade de 5' de arco, semelhante ao seu antecessor (MAPGEO2010),

² Consiste no sistema que desconsidera, totalmente, os efeitos diretos e indiretos no potencial gravitacional da maré astronômica, proveniente das interações gravitacionais da Terra com a Lua e o Sol (IHDE; MÄKINEN; SACHER, 2019)

entretanto, devido à maior densidade de dados gravimétricos e à utilização de um MGG mais preciso, ele apresenta uma melhoria na consistência com o GNSS de 20% em comparação ao MAPGEO2010 e um RMS de $\pm 0,17$ metros (BLITZKOW et al., 2016).

Como contribuição mais recente a nível de referenciais altimétricos, o modelo MAPGEO2015 serviu como base para o desenvolvimento do modelo de conversão de altitudes geométricas para altitudes físicas, compatíveis com o datum vertical do SGB, hgeoHNOR2020, que será descrito na seção seguinte.

2.6.2. HgeoHNOR2020

Em 2018, foi realizado o Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais (REALT-2018), no qual considerou dados gravimétricos de 2142 referências de níveis (RRNN), componentes da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), para a obtenção de altitudes normais em suas respectivas localidades. Tal inclusão, aliada à adequação de procedimentos de análise e tratamento, possibilitou o estabelecimento de novos níveis de qualidade para o referencial altimétrico do SGB (IBGE, 2019). Com isso, também houve a necessidade de promover a evolução dos modelos de conversão de altitudes.

Neste contexto, o IBGE desenvolveu o hgeoHNOR2020, que tem por objetivo fornecer um fator de correção (η) para transformar altitudes elipsoidais (h), referenciadas ao SIRGAS2000, para altitudes normais vinculadas ao REALT-2018 (H_N), conforme a equação:

$$H_N = h - \eta. \quad (29)$$

Para a construção do modelo, foram utilizadas altitudes normais do REALT-2018, ondulações geoidais fornecidas pelo MAPGEO2015 e altitudes elipsoidais obtidas em 1335 RRNN com conexão GNSS contínua, denominadas SAT-RN, para o cálculo dos resíduos iniciais ε_0 , conforme a expressão (IBGE, 2021):

$$\varepsilon_0 = h - H_N - N \quad (30)$$

Em seguida, é aplicado o método de Colocação por Mínimos Quadrados (CMQ) aos resíduos iniciais para obter uma grade de correções ω a ser adicionada à grade do modelo base (MAPGEO2015) e sua respectiva grade de desvio-padrão σ_ω . A grade resultante desta adição fornece os fatores de correção propriamente ditos, como expressa a equação (IBGE, 2021):

$$\varepsilon = h - H_N - (N + \omega) = h - H_N - \eta \quad (31)$$

Como o hgeoHNOR2020, teve como base o MAPGEO2015, ele carregou algumas de suas características, dentre as quais destaca-se a utilização do mesmo sistema de maré permanente.

Nas avaliações do modelo, foram verificados avanços expressivos em termos de altimetria em território nacional. O Erro Médio Quadrático (EMQ) dos resíduos de todas as estações consideradas no cálculo final do modelo foi de 6,5 centímetros. Considerando as mesmas estações utilizadas para avaliar o MAPGEO2015, no ano de 2015, o EMQ foi de 10,2 centímetros, enquanto o do modelo base foi de 17 centímetros (IBGE, 2021).

Embora, teoricamente, os fatores de correção disponibilizados pelo hgeoHNOR2020 não sejam equivalentes à ondulação geoidal por não serem provenientes de um modelo gravimétrico que obedeceu às metodologias convencionais para a modelagem do campo gravimétrico (IBGE, 2021), estudos mais recentes tem considerado esta equivalência verdadeira, comprovando essa real possibilidade de aplicação (SILVEIRA; SOUZA; NIEVINSKI, 2023, FILHO et al., 2022). Ademais, levando em consideração a adequação do modelo à superfície de referência do REALT-2018, a qual foi reajustada por meio de alturas normais obtidas por dados gravimétricos, sugere-se a maior proximidade deste referencial com o geoide ou quase-geoide existente no território brasileiro. Dessa forma, o presente trabalho seguirá a mesma linha de pensamento, considerando os fatores de correção disponibilizados pelo hgeoHNOR2020 como valores de ondulação geoidal.

2.7. Modelos Globais Oceânicos (MGO)

Os MGO consistem em modelos gerados a partir de observações da Dinâmica do Nível do Mar, tendo como base dados provenientes de satélites altímetros (SANTANA, 2020). Por meio destes, são obtidas, como medidas primárias, as altitudes da superfície

do mar instantânea, conhecidas como SSH (*Sea Surface Height*), que normalmente são referenciadas ao elipsoide de referência. Em seguida, tais medidas podem ser manipuladas a fim de gerar produtos que permitam a representação do comportamento oceânico, como modelos empíricos de maré, perfis de Anomalias de Nível do Mar, do NMM e da TNMM.

A disponibilização destes modelos é realizada por determinadas instituições que se aplicam no desenvolvimento desta temática. Destacam-se, para o presente trabalho, as seguintes:

- DTU (*Danmarks Tekniske Universitet*): é um instituto dinamarquês que tem como foco as áreas de Engenharia e Ciências Naturais. Seus produtos são disponibilizados por meio de um serviço FTP, denominado DTU Space. Dentre estes produtos destacam-se os Modelos do campo de gravidade (*DTU Ocean gravity Field Mapped*), modelos globais de marés oceânicas (*DTU Global Ocean Tide Model*), modelos globais de superfície média do Mar (DTU Ocean wide Mean Sea Surface) e Modelos da TNMM (*DTU Mean Dynamic Topography*).
- CNES (*Centre National d'Études Spatiales*): Consiste no instituto de estudos espaciais francês. Seus produtos são fornecidos por meio da plataforma Aviso+, gerenciada pelo CLS (*Collecte Localisation Satellites*). Dentre eles, citam-se os Modelos de Marés, Modelos de NMM e Modelos de TNMM.

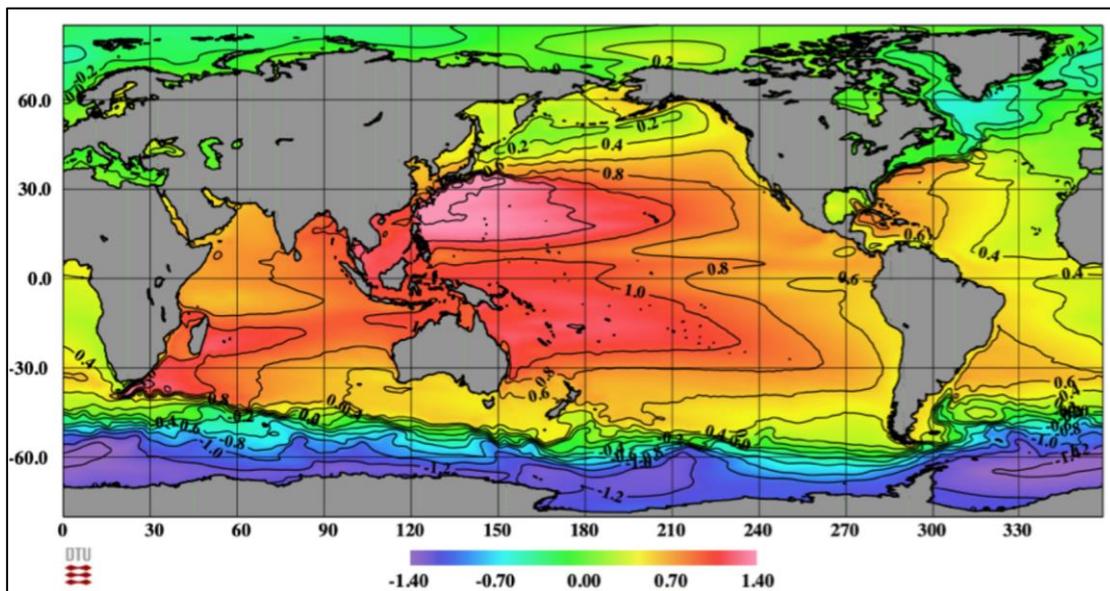
2.7.1. Modelos de TNMM

Para a presente pesquisa, serão utilizados os modelos globais de TNMM DTU22MDT, criado pelo DTU, e o MDT CNES-CLS22, desenvolvido pelo CNES. Ambos possuem $(1/8)^\circ$ de resolução e são baseados em séries de dados com período igual ou superior a 20 anos, tempo superior ao recomendado para a definição de referenciais altimétricos baseados no nível do mar (IHO, 2008, LUZ; GUIMARÃES, 2003).

O modelo DTU22MDT consiste numa evolução de seu antecessor, o DTU19MDT. Ele é baseado no MGG combinado XGM2019e, que utilizou dados das missões GRACE e GOCE. Além disso, a gravidade marinha obtida por altimetria satelital foi incluída para completar as partes não resolvidas do MGG até a componente harmônica de grau e ordem 2160. O modelo de nível médio utilizado foi o DTU21MSS, o mais

recente atualmente, que utilizou dados de diversas missões altimétricas com dados médios que consideram uma série temporal de 20 anos (1993-2012). A filtragem dos dados foi realizada por meio do filtro Gaussiano com largura variável e anisotropia, combinado com um filtro específico para regiões costeiras (KNUDSEN; ANDERSEN; MAXIMENKO, 2022) . A Figura 15 ilustra o modelo.

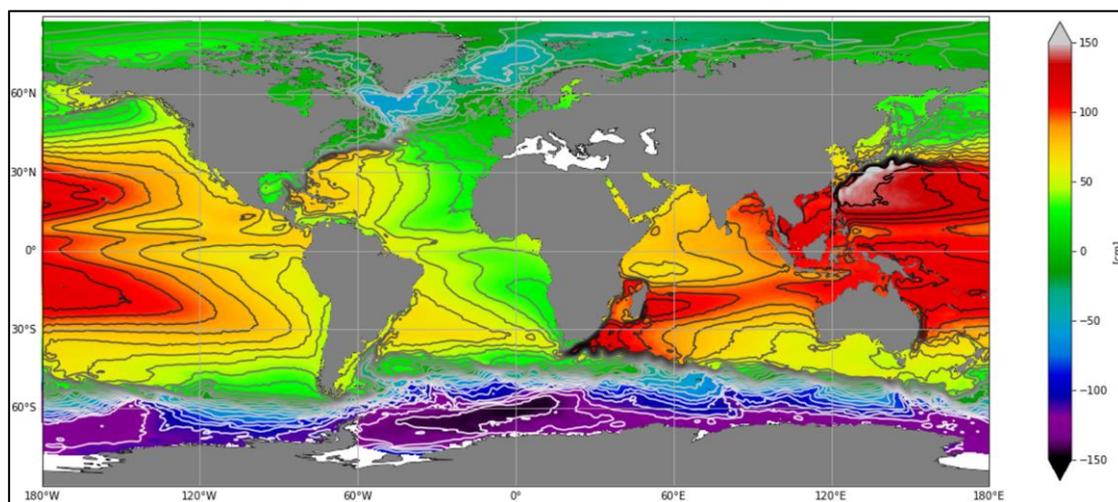
Figura 15: Modelo DTU22MDT.



Fonte: Knudsen et al. (2022).

Neste mesmo escopo, o MDT CNES-CLS22 se difere do MDT CNES-CLS18, seu antecessor, pela utilização do Modelo Global de Geopotencial GOCO06S, baseado nos dados completos da missão GOCE reprocessados e em 14 anos de dados da missão GRACE. Em geral, a filtragem dos dados foi similar ao modelo anterior, por meio de um filtro desenvolvido por Rio et al. (2011), entretanto também foi aplicado o filtro lagrangeano ao longo da costa para evitar que dados filtrados indevidos atingissem regiões costeiras. O modelo ainda recebeu a contribuição de uma longa série de dados coletados *in situ*, de 1993 a 2021 (JOUSSET et al., 2022). A representação gráfica do modelo está ilustrada pela Figura 16.

Figura 16: Modelo MDT CNES-CLS22.



Fonte: Jousset et al. (2022).

Em ambos os modelos, não foram encontradas informações concretas sobre os sistemas de maré permanente que foram utilizados em sua implementação.

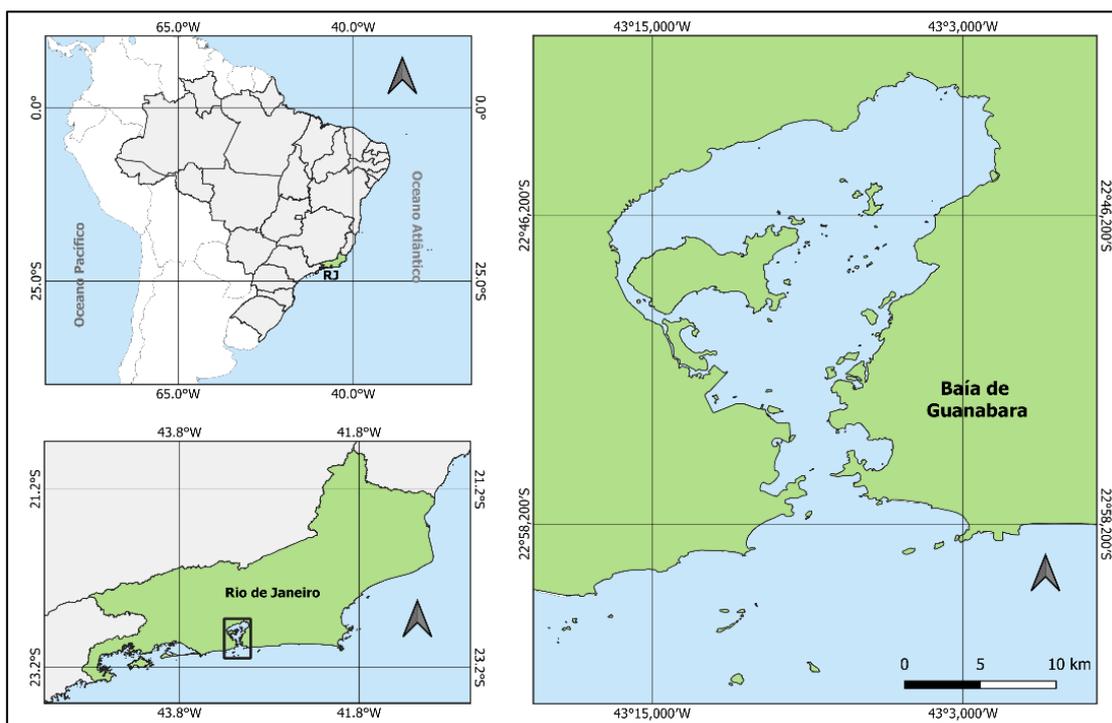
3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados detalhes sobre a área de estudo, os materiais utilizados e os métodos empregados para o cumprimento dos objetivos propostos pelo trabalho.

3.1. Área de Estudo

O presente estudo teve como foco a região da Baía de Guanabara-RJ, ilustrada pela Figura 17.

Figura 17: Área de estudo.



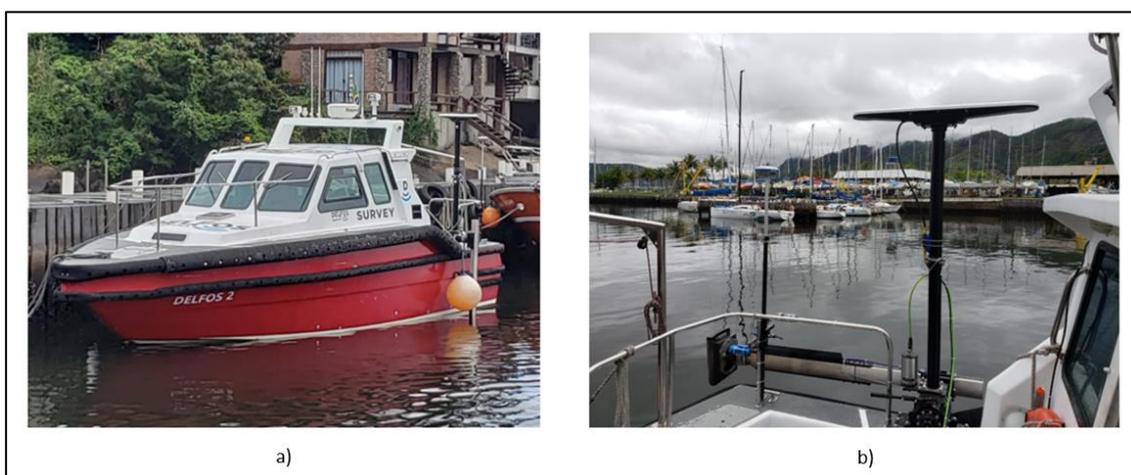
Fonte: O autor.

A escolha desta área foi realizada com o intuito de aproveitar o planejamento da empresa Delfos Marítima, que teve por objetivo a realização de um levantamento hidrográfico na região. Mesmo assim, a área da Baía de Guanabara demonstrou ser favorável a realização da pesquisa por ser abrigada de influências meteorológicas e oceanográficas intensas, impedindo a ocorrência de grandes variações do nível do mar durante a coleta de dados em campo.

3.2. Material

A realização do estudo contou com o apoio da empresa Delfos Marítima, a qual cedeu a embarcação Delfos 2 para a navegação na Baía de Guanabara. Esta consiste numa embarcação hidrográfica que dispõe de um receptor GNSS (GPS e GLONASS), de dupla frequência, integrado ao sistema de navegação e sensor de atitude Seapath 130, que é vinculado ao ecobatímetro multifeixe 2040. Os materiais mencionados estão apresentados pela Figura 18.

Figura 18: a) Embarcação Delfos 2; b) Antena do receptor GNSS Seapath 130.

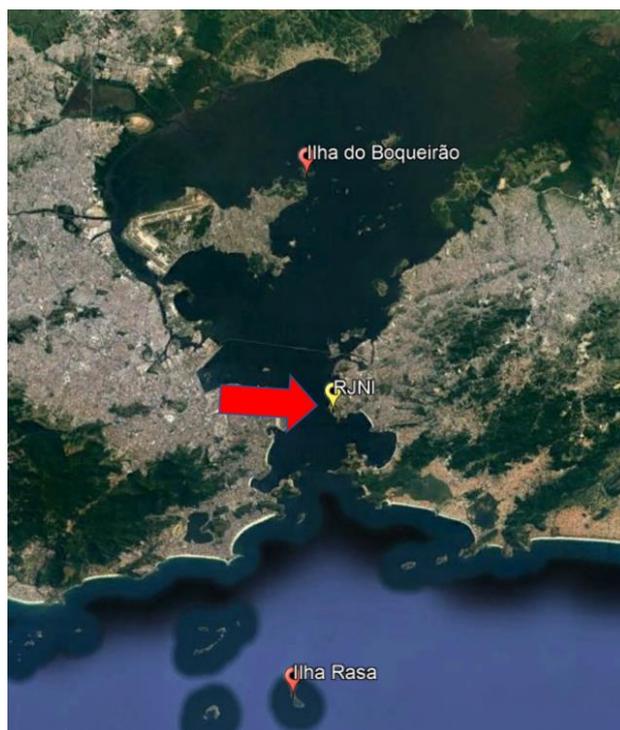


Fonte: O autor.

Para a realização do posicionamento relativo pós-processado, foram utilizados os arquivos RINEX, de observação e de navegação, da estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) localizada em Niterói-RJ (RJNI), disponibilizados pelo IBGE³. A Figura 19 apresenta a localização desta estação.

³ <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuado-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=downloads>

Figura 19: Localização da Estação RJNI.



Fonte: Google Earth.

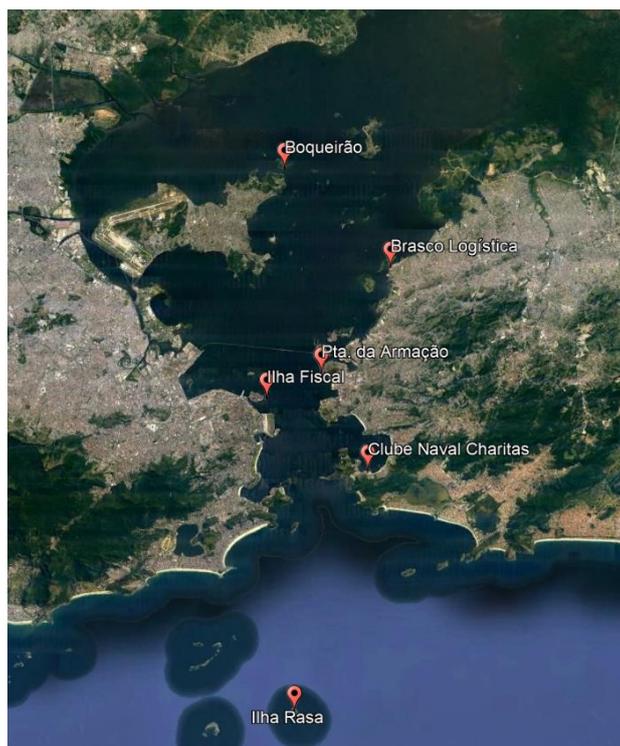
Os dados maregráficos foram coletados, no período de 29 de outubro a 02 de dezembro de 2021, por meio de seis marégrafos situados nos limites da área de interesse. Os locais onde foram instalados, os tipos de marégrafos utilizados estão descritos na Tabela 2 e a disposição geográfica destes ao redor da área da Baía de Guanabara está demonstrada na Figura 20. Além disso, as séries de alturas do nível do mar adquiridas em cada uma destas estações maregráficas encontram-se ilustradas na Figura 21.

Tabela 2: Marégrafos utilizados na pesquisa.

Localização	Coordenadas	Tipo de Marégrafo
Ilha Rasa	23° 03' 41.60"S 043° 08' 54.97"O	Pressão
Clube Naval Charitas	22° 56' 07.83"S 043° 06' 29.77"O	Pressão
Ilha Fiscal	22° 53' 47.99"S 043° 09' 57.34"O	Radar
Ponta da Armação	22° 52' 59.89"S 043° 08' 05.80"O	Boia e Contrapeso
Brasco Logística <i>Offshore</i>	22°49' 27.17"S 043° 05' 28.27"O	Boia e Contrapeso
Ilha do Boqueirão	22° 46' 32.93"S 043° 09' 24.74"O	Pressão

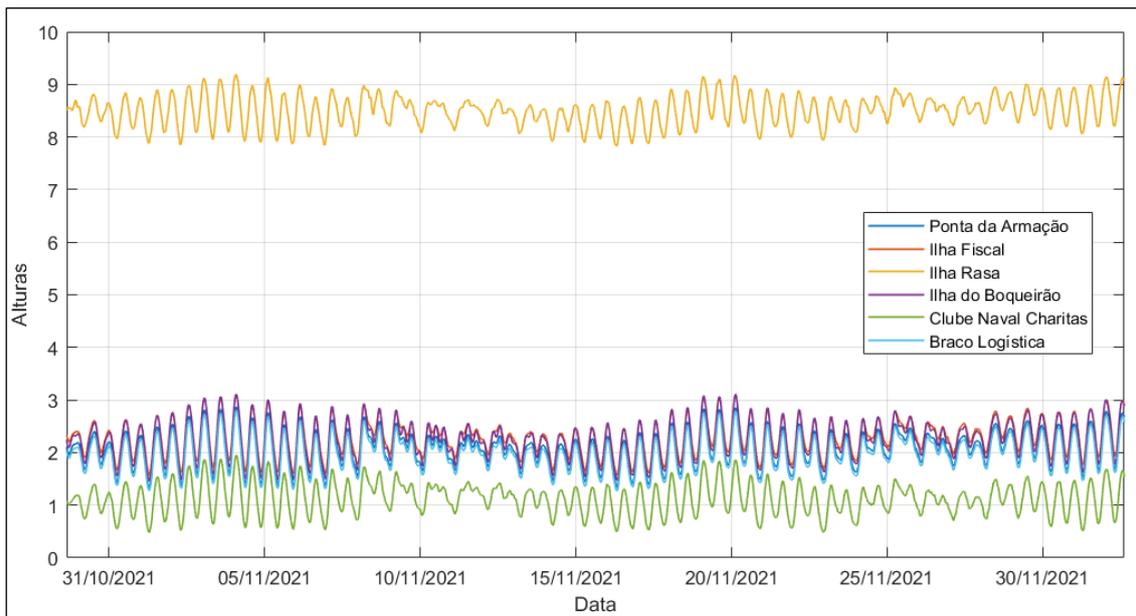
Fonte: O autor.

Figura 20: Disposição dos marégrafos utilizados na pesquisa.



Fonte: Google Earth.

Figura 21: Dados altimétricos medidos pelos marégrafos.

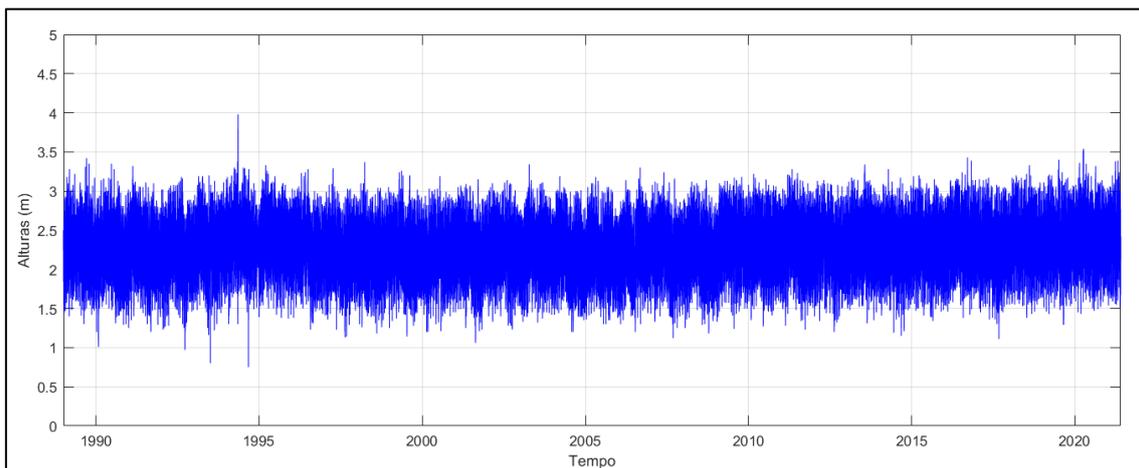


Fonte: O autor.

Na Figura 21, a discrepância considerável entre os dados do marégrafo da Ilha Rasa e os demais existe por conta da maior profundidade verificada nesta localização.

Além dos dados maregráficos coletados, foi utilizada uma série de dados de pouco mais de 32 anos (1º de janeiro de 1989 a 30 de maio de 2021) obtida pelo marégrafo da Ponta da Armação. Esta série de dados foi utilizada para o cálculo do NMM de referência para a modelagem proposta, seguindo as orientações mencionadas na seção 2.5. A Figura 22 ilustra o gráfico da série de dados em função do tempo.

Figura 22: Registro de dados de 32 anos do marégrafo da Ponta da Armação.



Fonte: O autor.

Os dados de ondulação geoidal empregados na modelagem foram obtidos por meio do modelo de conversão de altitudes hgeoHNOR2020, disponível no sítio eletrônico do IBGE⁴. A partir do carregamento de um arquivo TXT com as coordenadas horizontais obtidas no posicionamento relativo, os fatores de correção e seus respectivos desvios-padrões foram disponibilizados. A Figura 23 apresenta parte do arquivo gerado.

Figura 23: Extrato do arquivo de saída do modelo de conversão de altitudes hgeoHNOR2020.

1	-22.919649950	-43.120035590	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
2	-22.919662267	-43.120059479	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
3	-22.919674820	-43.120082587	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
4	-22.919689366	-43.120104944	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
5	-22.919701517	-43.120128161	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
6	-22.919714864	-43.120150666	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
7	-22.919729029	-43.120173565	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
8	-22.919741087	-43.120197434	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA
9	-22.919754120	-43.120220306	-6.13	0.05	hgeoHNOR_IMBITUBA

Fonte: IBGE (2023).

Na Figura 23, ressaltam-se os valores de precisão, que permaneceram 0,05 m em todas as posições consideradas.

⁴<https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/31283-hgeoHnor2020-modeloconversaoaltitudesgeometricasgns-datumverticalsgb.html?=&t=processar-os-dados>

Por fim, foram empregados os dados de TNMM dos modelos DTU22MDT e MDT CNES-CLS2022 para a comparação com o modelo desenvolvido. O primeiro foi obtido por meio do acesso ao diretório FTP da DTU, denominado *DTU Space*⁵. Nele, foi possível obter o arquivo referente ao modelo global, bem como o de suas incertezas, ambos nos formatos GRD (*grid*) e XYZ.

O segundo modelo foi acessado por meio da plataforma Aviso+⁶, mediante a realização de cadastro e uso de credenciais. Nesta plataforma, é possível selecionar os limites da região desejada e os tipos de dados que o usuário deseja acessar. Dessa forma, foram selecionados os dados da TNMM da área estudada e da região ao redor, assim como das incertezas distribuídas por esta região. O formato do arquivo disponibilizado com todas estas informações foi o NETCDF (*Network Common Data Form*).

Para a representação geográfica dos dados, foram utilizados os arquivos SHP (*shapefile*) de produtos cartográficos disponibilizados no endereço do Portal de Mapas⁷, pelo IBGE.

Os softwares utilizados na pesquisa foram os seguintes:

- Processamento GNSS: RTKLIB, versão 2.4.3;
- Cálculos em geral, representações gráficas, aplicação de filtros de dados e interpolações: MATLAB, versão R2023b;
- Representações geográficas dos dados: Google Earth e QGIS, versão 3.28.11.

3.3. Métodos

Nesta seção, serão apresentadas as fases da metodologia que permitiram atingir os objetivos da presente pesquisa. O estudo visa dar continuidade aos resultados encontrados nas pesquisas realizadas sobre esta mesma temática (BOUIN, 2009; LAVROG et al, 2015; MACHUCA, 2018; LYCOURGHOTIS, 2021), os quais obtiveram resultados que contribuíram para o entendimento do NMM e da TNMM em suas respectivas áreas de interesse.

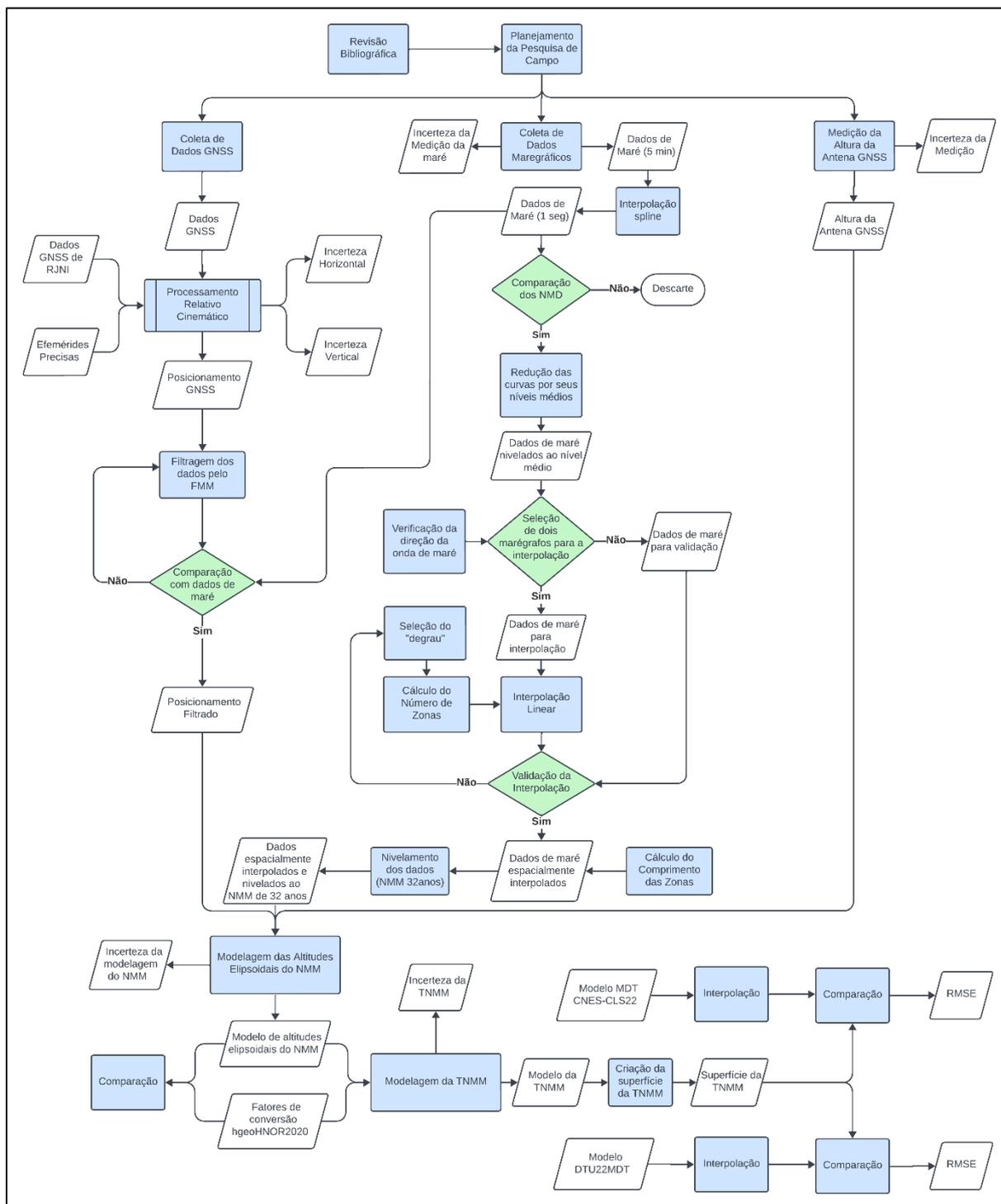
Toda a metodologia empregada no trabalho em lide está sintetizada no fluxograma ilustrado na Figura 24.

⁵ <https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU22/MDT/>

⁶ <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt/mdt-global-cnes-cls.html>

⁷ <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>

Figura 24: Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: O autor.

A fim de detalhar cada método empregado, esta seção será dividida em quatro partes: a primeira (subseções 3.3.1 a 3.3.3) tratará da coleta e do processamento dos dados GNSS, bem como da filtragem dos dados de posicionamento GNSS; a segunda parte

(subseções 3.3.4 a 3.3.7) discorrerá sobre a aquisição de dados maregráficos e sua interpolação no tempo e no espaço, concluindo com seu nivelamento ao nível de referência da modelagem; a terceira (subseções 3.3.8 a 3.3.9) apresentará as modelagens das altitudes elipsoidais do NMM, a comparação do modelo gerado com informações de ondulação geoidal e a modelagem da superfície topográfica do NMM. Por fim, a quarta parte (subseções 3.3.10 e 3.3.11) tratará da representação geográfica dos dados de TNMM e a comparação com os modelos globais interpolados para a área do estudo.

3.3.1. Coleta dos dados GNSS

A coleta de dados GNSS cinemáticos foi realizada no dia 02 de novembro de 2021, das 9:06h às 17:33h, horário de Brasília. Este ocorreu ao longo do trajeto percorrido pela lancha Delfos II, com o intervalo de aquisição de 1 segundo.

Cabe ressaltar que devido à localização da estação base RJNI ser bem próximo à região estudada, foram observadas linhas de base curtas, inferiores a 10 Km, em todo o trajeto. Não foram observados problemas na aquisição dos dados ou relativos a perdas de sinal.

Os dados coletados consistiram em medidas de pseudodistância e de fase da onda portadora, emitidos por satélites dos sistemas de posicionamento GPS e GLONASS, gravadas inicialmente no formato RTCM3. A conversão para o formato RINEX foi efetuada por meio do módulo RTKCONV do RTKLIB.

Antes do início do levantamento e logo após sua conclusão, foram realizadas medições da altura da antena em relação ao nível do mar. A altura da haste da antena, partindo desta até o nível de referência da embarcação, medida em projeto, foi de 1,935 m. Foi realizada, então, a medição deste nível de referência até o nível do mar. Após a realização de medições sucessivas, foi encontrado o valor de $(1,350 \pm 0,005)$ m. Dessa forma, para este estudo foi considerado o comprimento de $(3,285 \pm 0,005)$ m.

3.3.2. Processamento dos dados GNSS

Os dados coletados, no formato RINEX, foram processados pelo software RTKLIB, com o objetivo de realizar o posicionamento relativo cinemático. As configurações utilizadas no processamento estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3: Configuração utilizada no processamento pelo RTKLIB.

Modo do Posicionamento	Relativo Cinemático
Frequências	L1 e L2
Tipo de filtragem	Combinada
Máscara de Elevação	10°
Correções Ionosféricas	OFF
Correções da Atmosfera Neutra	OFF
Efemérides	Precisas
Método de resolução de ambiguidades	<i>Fix and Hold</i>
Razão Mínima para fixação da ambiguidade	2

Fonte: O autor.

Sobre a configuração apresentada na Tabela 3, optou-se por utilizar o tipo de filtragem combinada⁸, o qual, em geral, resulta na convergência mais acelerada para os resultados fixos do posicionamento.

As correções ionosféricas e referentes à atmosfera neutra foram desabilitadas por conta das linhas de base curtas observadas em todo o trajeto. Além disso, como apresentado na subseção 2.2.2, o próprio software desconsidera tais correções quando a distância entre a base e o *rover* é inferior a 10 Km. Logo, não foram incluídos arquivos referentes aos erros dos relógios, bem como não foram modeladas as influências da ionosfera e da atmosfera neutra. Apenas os arquivos de efemérides precisas dos sistemas GPS e GLONASS, fornecidos pelo Centro de Determinação de Órbitas da Europa (CODE – *Centre for Orbit Determination in Europe*) no sítio eletrônico do IGS⁹, foram inseridos.

Optou-se também pelo método de resolução da ambiguidade *Fix and Hold*, que insere injunções na atualização do EKF quando o teste de fixação da ambiguidade é validado. O resultado destas inserções é a convergência das posições estimadas de modo mais acelerada (TAKASU; YASUDA, 2013).

⁸ Os tipos de filtragem determinam a direção, no tempo, em que é aplicado o filtro de Kalman. Estes podem ser direto (*forward*), reverso (*backward*) ou combinado (*combined*). Este último tipo associa os resultados dos dois primeiros tipos da seguinte forma: caso as filtragens direta e reversa resultarem em valores fixos do posicionamento, a combinada utilizará a média entre estes como resultado; se apenas um dos dois for fixo, ele será o resultado da filtragem combinada, com o *status* de posicionamento fixo; por fim, se ambos forem *float*, a média das estimativas será utilizada, na condição de posicionamento *float*.

⁹ <https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/2182/>

3.3.3. Filtragem dos Dados de Posicionamento pelo FMM

O FMM consiste em um método de atenuação bastante conhecido e comumente aplicado em tratamento de sinais (SMITH, 1999). De uma forma geral, um Filtro de Média Móvel (FMM) calcula o n -ésimo valor da sequência de saída $y[n]$ por meio da média simples de M_T valores da sequência de entrada $x[n]$. No software MATLAB, o FMM é implementado da seguinte forma:

$$y[n] = \frac{(x[n - M_P] + x[n - (M_P - 1)] + \dots + x[n + (M_F - 1)] + x[n + M_F])}{M_T} \quad (32)$$

$$y[n] = \frac{1}{M_T} \sum_{k=-M_F}^{M_P} x[n - k], \quad (33)$$

em que $M_T = (M_P + M_F + 1)$ e $\{M_P, M_F\} \in \mathbb{N}$.

Como visto na subseção 2.5.1, o FMM resulta na remoção de altas frequências do sinal de entrada (filtro passa-baixa), dependendo exclusivamente da janela amostral M_T . No escopo deste estudo, as componentes de alta frequência são consideradas ruídos do sinal de entrada e, no FMM, a redução destes ruídos ocorre numa taxa igual a raiz quadrada de M_T (SMITH, 1999).

Neste trabalho, o FMM foi aplicado nos dados de posicionamento relativo cinemático, sendo testados diversos valores para a janela amostral de forma semelhante ao estudo desenvolvido na subseção 2.5.1. Nestes testes, o resultado de cada filtragem foi comparado a uma das curvas de maré medidas na região, com ambos reduzidos de seus valores médios.

A escolha desta referência se deve ao fato de que a única variação periódica que é esperada na região é a oscilação da maré. Além disso, quaisquer outras alterações na altitude, como a da ondulação geoidal, ocorreram numa taxa de variação muito baixa. Assim, ao anular os demais fatores aproximadamente constantes pela subtração dos dados filtrados por seus respectivos valores médios, uma curva bem próxima da variação da maré da região restou. Isto tornou possível a comparação com dados maregráficos medidos na área de estudo.

A referência selecionada foi a sequência de alturas coletadas pela estação da Ponta da Armação, que se localizava próximo à região central do trajeto percorrido. Então,

foram calculados a diferença máxima entre as curvas e o RMSE, além de serem realizadas análises gráficas para certificar a proximidade da curva com a informação de referência.

3.3.4. Coleta de Dados Maregráficos

A coleta dos dados maregráficos necessários para a realização da modelagem foi realizada pelos marégrafos listados na Tabela 2. O intervalo de aquisição em todos estes marégrafos foi de 5 minutos. Houve a necessidade, portanto, de realizar a interpolação destes dados para adequá-los ao intervalo selecionado para os dados de posicionamento.

Para isso foi utilizado o método spline cúbico para obter dados de maré a cada um segundo. Este método de interpolação é constantemente utilizado para gerar dados aproximados e atenuados, com a vantagem de exigir pouco esforço computacional (SCHUMAKER, 2007).

3.3.5. Verificação dos dados maregráficos

Quando a distância entre os marégrafos é pequena, espera-se que eles estejam sujeitos aos mesmos efeitos meteorológicos e oceanográficos. Este fato resulta na semelhança entre os comportamentos dos NMM calculados em todos estes marégrafos. Assim, pela comparação entre estes níveis, é possível verificar se houve algum problema durante a medição destas alturas.

No presente trabalho, optou-se por realizar a comparação dos níveis médios diários (NMD), os quais puderam ser obtidos pela aplicação do Filtro de Godin, como sugere Franco (2009). Este filtro consiste basicamente na aplicação sucessiva de três FMM: um de 24 horas, seguido de outro de 25 horas e, por fim, mais um de 24 horas. Por meio deste, componentes harmônicas com período inferior a 25 horas, como é o caso das componentes diurnas e semidiurnas do Sol e da Lua, foram completamente atenuadas (FRANCO, 2009). Assim, considerando a escala temporal do estudo realizado (aproximadamente mensal), apenas o movimento do nível do mar resultante de efeitos meteorológicos ou oceanográficos de escala sinótica (de 1 a 10 dias) foram observados, permitindo a verificação almejada.

A comparação foi realizada com as curvas dos NMD reduzidos de seu nível médio, a fim de permitir uma melhor visualização do comportamento destes níveis

médios. Por fim, o marégrafo que apresentou diferenças significativas comparado aos demais teve sua aplicação descartada nos passos seguintes da metodologia.

3.3.6. Interpolação espacial dos dados maregráficos

Neste trabalho, foi utilizado o método denominado zoneamento de maré (MARINHA DO BRASIL, 2017). Este consiste na interpolação linear, ao longo do espaço geográfico, dos dados observados em duas estações maregráficas, situadas nos extremos da região. O resultado é a divisão da área considerada em subáreas (zonas) e a atribuição de curvas de maré distintas a cada uma destas.

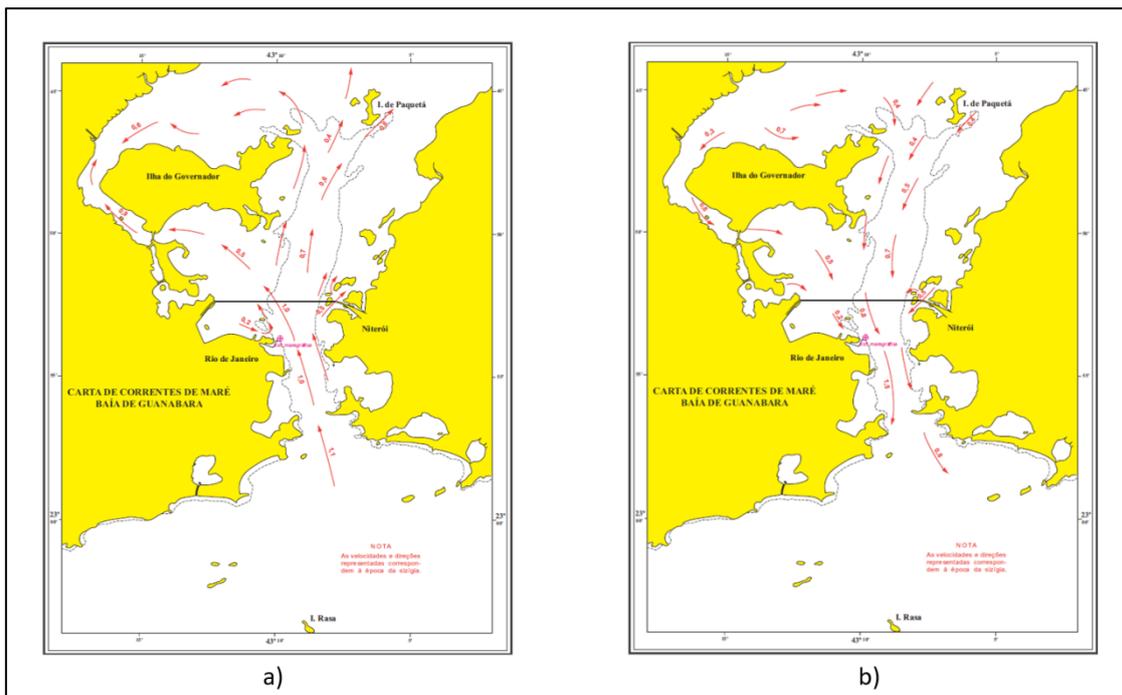
Este procedimento, normalmente, tem como foco a redução de dados maregráficos em medições batimétricas. Contudo, para este trabalho, tal procedimento foi adaptado, levando em consideração a diferente natureza dos dados empregados na modelagem almejada.

O zoneamento de maré é concluído mediante a realização de seis passos: a verificação da direção do zoneamento, a adoção de uma referência vertical única para toda a região, o cálculo da quantidade de subáreas, a interpolação linear dos dados, a determinação do comprimento de cada subárea e a validação do zoneamento.

3.3.6.1. Verificação da direção do zoneamento de maré

O zoneamento de maré deve ser realizado, preferencialmente, na direção de propagação da onda de maré. Dessa forma, primeiramente, foi investigado como o fenômeno se comporta dentro da região do presente estudo. Consultou-se, para isso, a Carta de Correntes de Maré da região da Baía de Guanabara (DHN, 2012). Esta publicação apresenta informações horárias sobre a direção, o sentido e a velocidade das correntes geradas pelas ondas de maré de seis horas antes até seis horas depois do pico da maré, o qual é denominado preamar. A Figura 25 apresenta os momentos de maior intensidade destas correntes.

Figura 25: Carta de Correntes de Maré da Baía de Guanabara-RJ: a) 2 horas antes da preamar e b) 2 horas depois da preamar.



Fonte: DHN (2012).

Na Figura 25, é possível observar que as ondas de maré, bem como suas correntes, propagam-se na direção N-S, aproximadamente. Dessa forma, os marégrafos situados nos limites da região, na direção verificada, são os localizados na Ilha Rasa e na Ilha do Boqueirão. Suas respectivas curvas de maré foram utilizadas como os valores limites para a interpolação realizada.

3.3.6.2. Adoção de referência vertical única

Primeiramente, deve-se assumir que os NMM calculados em marégrafos de uma mesma região, num mesmo período, são coincidentes. Esta premissa auxilia na adoção de um mesmo referencial vertical para toda a região.

Este passo foi concluído ao serem reduzidos, das curvas de maré, seus respectivos níveis médios. Por meio deste procedimento, as diferenças de escala geradas pela utilização de diferentes tipos de marégrafo foram anuladas. Ademais, todas as curvas passaram a ser referenciadas a este nível médio comum, possibilitando a realização do zoneamento de maré propriamente dito.

Em levantamentos hidrográficos, normalmente o nível de referência utilizado é o nível de redução (NR), que consiste no *datum* das cartas náuticas desenvolvidas pela DHN. Neste contexto, todas as medições de maré estariam acima deste nível. Entretanto, uma das tarefas da modelagem proposta foi anular as alturas maregráficas em torno do nível médio. Dessa forma, este foi adotado como referência comum a toda região.

3.3.6.3. Cálculo da quantidade de subáreas (zonas)

Foi calculado o número de subáreas em que a região estudada deveria ser dividida. Este número pode ser obtido a partir dos módulos dos valores máximos de diferença de alturas de maré ou de diferenças de fase, por meio das expressões 34 e 35,

$$N_z = \frac{2|\Delta H|}{degrau} + 1 \quad (34) \quad ;$$

$$N_z = \frac{|\Delta T|}{t_{degrau}} + 1 \quad (35)$$

onde N_z é o número de zonas em que a área será dividida; ΔH e ΔT as diferenças máximas de altura e de fase entre as curvas de maré, respectivamente; *degrau* a maior diferença entre subáreas adjacentes e t_{degrau} o tempo necessário para que a altura do nível do mar se desloque, verticalmente, o comprimento definido pela variável *degrau*. Caso as quantidades de zonas resultarem em valores decimais, deve-se arredondar para cima.

Em levantamentos hidrográficos, o valor da variável *degrau* não pode exceder 10 cm, sendo este valor normalmente atribuído a este termo (MARINHA DO BRASIL, 2017). Porém, neste estudo, foram testados e considerados valores menores com o objetivo de possibilitar maior suavidade à representação espacial do fenômeno.

Após calcular o número de zonas pelas diferenças de alturas e de fase, o maior valor encontrado entre os resultados foi considerado para a realização do zoneamento.

3.3.6.4. Interpolação linear dos dados maregráficos

Foi realizada a interpolação linear dos dados maregráficos por meio da expressão (36), que calcula a altura de maré $H_Z(t, i)$ em uma zona i qualquer, entre os marégrafos A e B com alturas $H_A(t)$ e $H_B(t)$, respectivamente.

$$H_Z(t, i) = H_A(t) + \left(\frac{H_B(t) - H_A(t)}{N_Z - 1} \right) i \quad , \text{onde} \quad i = [1, 2, \dots, (N_Z - 2)] \quad (36)$$

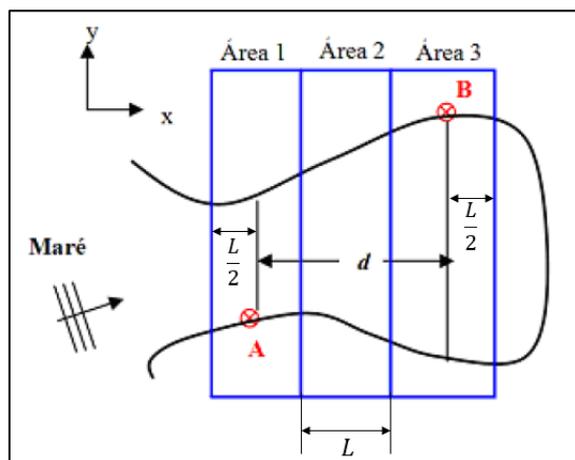
3.3.6.5. Cálculo do comprimento das subáreas (zonas)

Foi calculado o comprimento destas subáreas, às quais foram atribuídas as curvas provenientes da interpolação. Para isso, a distância entre as estações maregráficas da Ilha Rasa e da Ilha do Boqueirão foi inserida na expressão (37) para a obtenção destes comprimentos (MARINHA DO BRASIL, 2017).

$$L = \frac{d}{N_Z - 1} \quad (37)$$

em que L é o comprimento das zonas de maré e d a distância entre as estações. A Figura 26 exemplifica um esquema da distribuição de subáreas geradas entre duas estações maregráficas A e B.

Figura 26: Distância entre estações no zoneamento de maré.



Fonte: Marinha do Brasil (2017)

Ressalta-se que os marégrafos utilizados para o zoneamento devem ser considerados na região central das zonas limites, como demonstrado na Figura 26.

3.3.6.6. Validação do zoneamento de maré

A validação do zoneamento de maré foi realizada por meio de observações concomitantes, registradas por marégrafos dispostos no interior da região dividida em subáreas. Para isso, compararam-se as sequências de alturas obtidas por estes marégrafos com as curvas resultantes da interpolação vinculadas às zonas onde cada um destes marégrafos se situavam (MARINHA DO BRASIL, 2017). Esta comparação se deu pelo cálculo do RMSE entre as curvas, possibilitando a ratificação da qualidade da interpolação.

Ademais, esta validação também serviu para confirmar a escolha do valor da variável *degrau*. Neste sentido, foram testadas as dimensões de 10 a 1 cm para este desnível. O que resultou em menor RMSE na comparação com a maior parte dos marégrafos foi selecionado.

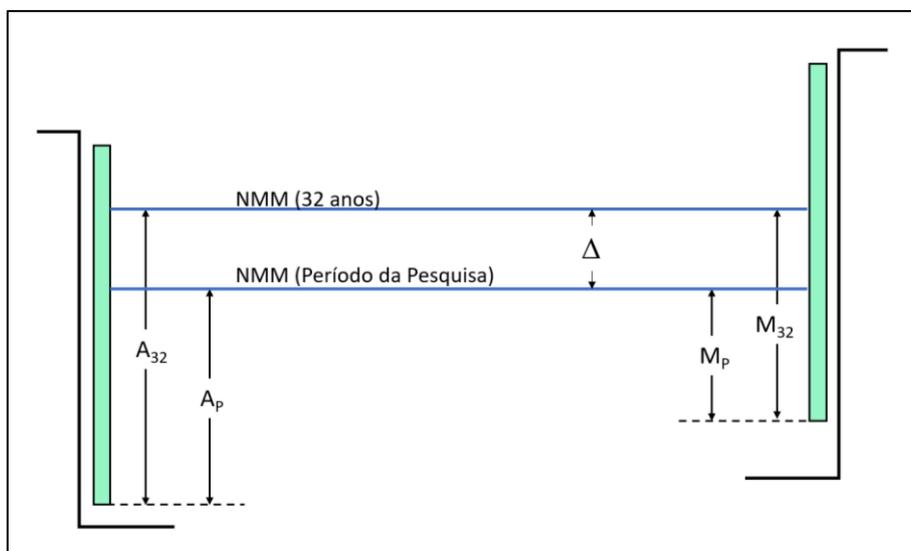
3.3.7. Nivelamento dos dados maregráficos

Conforme orientado na seção 2.5, os dados foram nivelados ao NMM obtido pelo marégrafo com período superior a 18,61 anos de observação. Dessa forma, o nível médio calculado a partir de alturas medidas continuamente durante pouco mais de 32 anos (1°

de janeiro de 1989 a 30 de maio de 2021) pelo marégrafo da Ponta de Armação foi utilizado.

O procedimento adotado foi uma adaptação do “Método da Lâmina d’Água”, descrito na Norma da Autoridade Marítima (NORMAM) nº 501 (MARINHA DO BRASIL, 2023). O nivelamento se iniciou com a determinação, neste mesmo marégrafo, do desnível entre o NMM obtido no período da pesquisa de campo e o estimado em mais de três décadas. Logo após, considerando a aproximação que assume o mesmo nível médio para toda a região, o desnível encontrado foi aplicado a todos os dados maregráficos, posicionando-os, assim, neste nível de referência com melhor determinação. A Figura 27 ilustra este nivelamento, realizado entre a estação da Ponta da Armação e um dos marégrafos no interior da área considerada.

Figura 27: Nivelamento dos dados maregráficos.



Fonte: O autor.

Da Figura 27, A_P e A_{32} são os níveis médios obtidos durante o período da pesquisa e o que abrangeu pouco mais de 32 anos de dados, respectivamente, calculados e representados na escala do marégrafo da Ponta da Armação; M_P e M_{32} , os níveis médios destes mesmos períodos referentes a um dos marégrafos do interior da região e Δ a diferença entre os NMM considerados. Dessa forma, o nivelamento se deu pelo uso das expressões (38) e (39).

$$\Delta = A_{32} - A_P \quad (38)$$

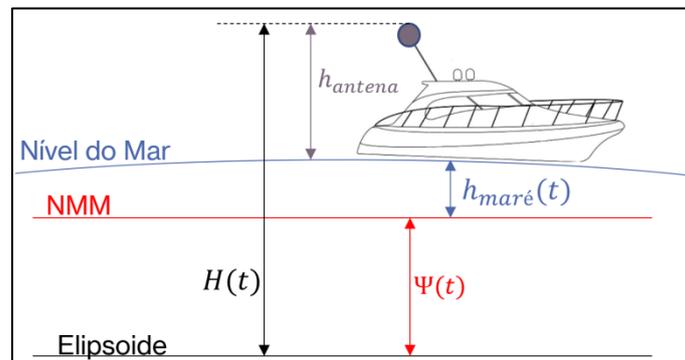
$$M_{32} = M_p + \Delta \quad (39)$$

Com a realização deste procedimento, toda a modelagem realizada passou a ser referenciada a este nível médio obtido por meio de longa série de dados, seguindo a recomendação da OHI sobre a determinação de referenciais altimétricos.

3.3.8. Modelagem das altitudes elipsoidais do NMM

Após realizar todo o tratamento nos dados descritos nas seções anteriores, deu-se início à modelagem das altitudes elipsoidais do NMM, conforme à expressão (40), obedecendo o diagrama apresentado na Figura 28.

Figura 28: Ilustração da metodologia adotada.



Fonte: O autor.

$$H(\varphi, \lambda, t) = \Psi(\varphi, \lambda, t) + h_{antena} \pm h_{maré}(t) \quad (40)$$

em que $H(t)$ é a altitude elipsoidal da antena na coordenada (φ, λ) e no instante t ; $\Psi(t)$, a altitude elipsoidal do nível médio do mar (NMM) na coordenada (φ, λ) e no instante t ; h_{antena} , a altura da antena em relação à linha d'água e $h_{maré}(t)$, a altura da maré no instante t . A incerteza do modelo foi estimada *a posteriori* por meio da lei de propagação das incertezas.

Ressalta-se que os dados de posicionamento utiliza o sistema livre de maré e a variação da maré em torno do nível médio não considera os sistemas de maré

permanentes, sendo, dessa forma, independente destes. Logo, o resultado obtido esteve no sistema livre de maré.

3.3.9. Comparação entre o modelo de altitudes elipsoidais e dados de ondulação geoidal

Conforme a definição de Gauss, a altitude elipsoidal do nível do mar Ψ coincidiria com a ondulação geoidal existente na região. Assim, com a intenção de verificar a validade desta afirmação, foi realizada a comparação entre os valores encontrados pela modelagem com fatores de conversão η obtidos pelo conversor de altitudes hgeoHNOR2020, que, no presente estudo, foi considerado equivalente à ondulação geoidal.

Esta comparação foi feita pelo cálculo da raiz do erro quadrático médio (RMSE) entre as curvas geradas pelos resultados de Ψ e η em cada instante. Como resultado, era esperado uma diferença significativa entre os modelos, devido, principalmente a existência da TNMM, gerada por efeitos hidrodinâmicos, que se intensificam nas regiões costeiras por conta de sua baixa profundidade.

3.3.10. Modelagem da TNMM

Após ser verificada sua existência pela comparação realizada na subseção anterior, o estudo prosseguiu com a modelagem da TNMM por meio da expressão (41).

$$TNMM(\varphi, \lambda) = \Psi(\varphi, \lambda) - \eta(\varphi, \lambda) \quad (41)$$

onde $\eta(\varphi, \lambda)$ representa o fator de conversão de altitudes fornecido pelo hgeoHNOR2020 na posição (φ, λ) . Da mesma forma, a incerteza do modelo gerado foi estimada *a posteriori* pela lei de propagação de incertezas.

Como ambos os termos da modelagem se encontram no sistema livre de maré, o modelo de TNMM resultante também considerou o mesmo sistema de maré permanente.

3.3.11. Representação geográfica e comparação entre os modelos de TNMM

Para a representação geográfica do modelo desenvolvido e dos modelos globais, foi gerada uma grade regular de 50 m de resolução, no software QGIS, cobrindo a área percorrida no levantamento. Utilizando métodos de interpolação e extrapolação, todos estes dados foram distribuídos nesta grade, possibilitando a comparação entre os modelos empregados.

Para o modelo gerado, foi utilizado o método conhecido como krigagem (*kriging*). Esta é uma técnica de interpolação geoespacial que visa estimar valores desconhecidos em locais específicos com base em observações disponíveis em pontos conhecidos. Originária da geostatística, a krigagem leva em consideração a estrutura espacial da variabilidade dos dados para realizar interpolações mais precisas. Ao contrário de métodos tradicionais, ela não apenas estima valores, mas também fornece uma medida de incerteza associada a cada estimativa. Isso é alcançado ao incorporar informações sobre a autocorrelação espacial e a variabilidade local, permitindo uma representação mais realista da distribuição dos dados em toda a área de estudo. A krigagem é amplamente utilizada em diversas áreas, como geociências, sensoriamento remoto, agricultura e ambientalismo, para modelar e mapear fenômenos espaciais de maneira eficaz e precisa (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Para os modelos globais, no entanto, foi empregado o método de interpolação bilinear. Este consiste em uma técnica comum utilizada para estimar valores desconhecidos em uma grade bidimensional com base em informações conhecidas nos pontos adjacentes. O método assume uma variação linear da superfície entre os pontos conhecidos mais próximos. Para cada ponto desconhecido, a interpolação bilinear utiliza os valores nos quatro pontos mais próximos para calcular uma estimativa ponderada, levando em consideração as distâncias relativas. Essa técnica é particularmente eficaz em situações em que a variação dos valores é relativamente suave e a influência dos pontos vizinhos é considerada uniforme (GETREUER, 2011), como acontece com os modelos globais de TNMM.

A comparação entre os modelos foi realizada por meio da diferenciação entre a superfície gerada na pesquisa e as obtidas pelas interpolações dos modelos globais, bem como por cálculos do RMSE entre estas representações.

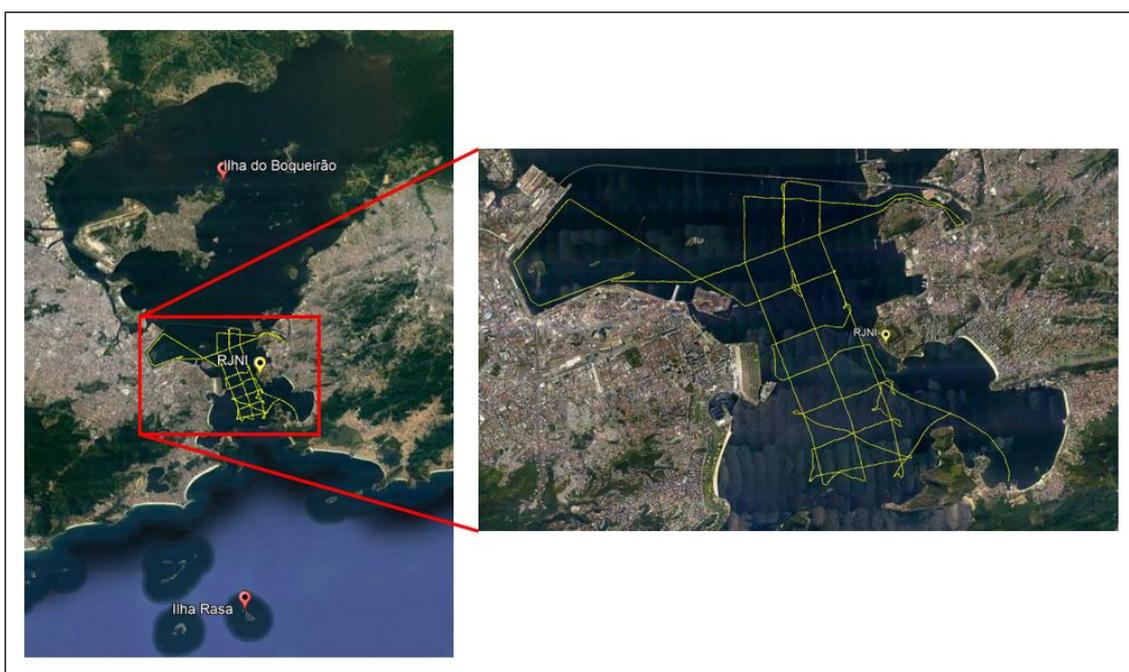
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o cumprimento de todas as etapas da metodologia, no presente capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1. Posicionamento GNSS

Após o processamento dos dados GNSS pelo software RTKLIB, foi possível verificar, efetivamente, o trajeto realizado. A Figura 29 o ilustra, localizando-o na área de estudo.

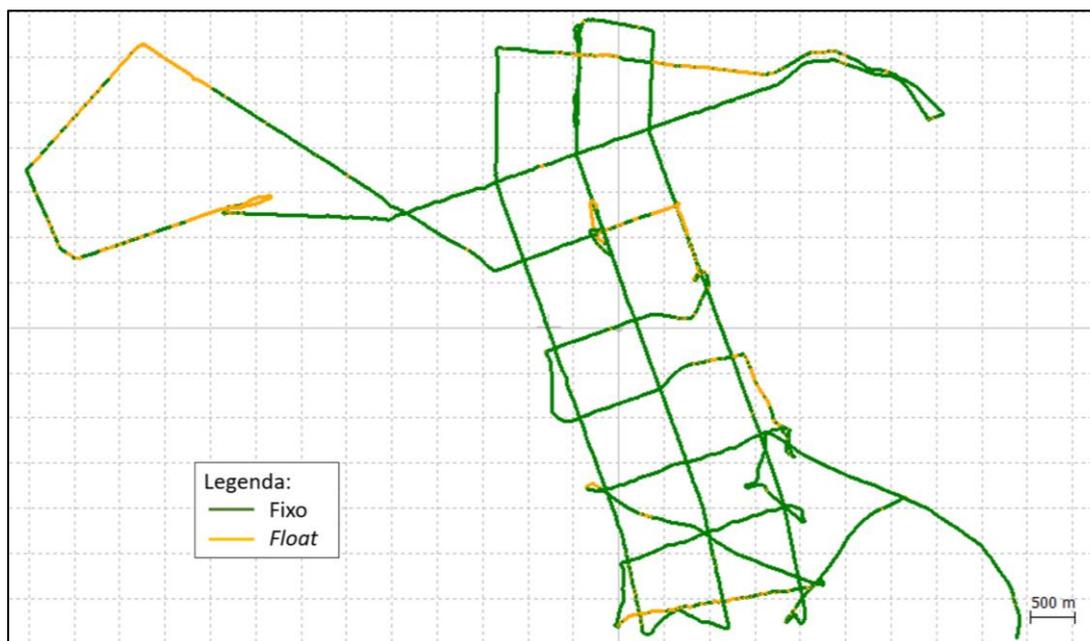
Figura 29: Trajeto percorrido em relação à área de estudo.



Fonte: Google Earth.

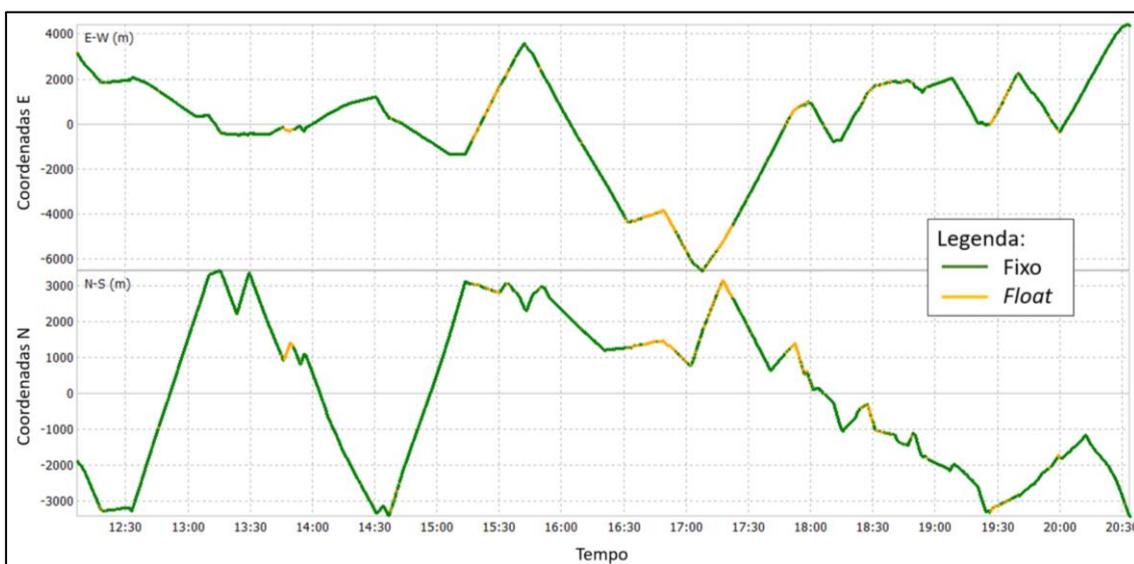
As Figura 30 e Figura 31 ilustram o resultado do posicionamento planimétrico no RTKLIB, onde é possível analisar alguns parâmetros deste resultado. Nestas figuras, a utilização das cores verde e amarela representam os resultados obtidos com os valores fixos de ambiguidade (83,0% da totalidade dos dados), e os que utilizaram os valores *float* (17,0% dos resultados), respectivamente.

Figura 30: Resultado do posicionamento horizontal obtido pelo software RTKLIB.



Fonte: O autor.

Figura 31: Componentes N e E do posicionamento.

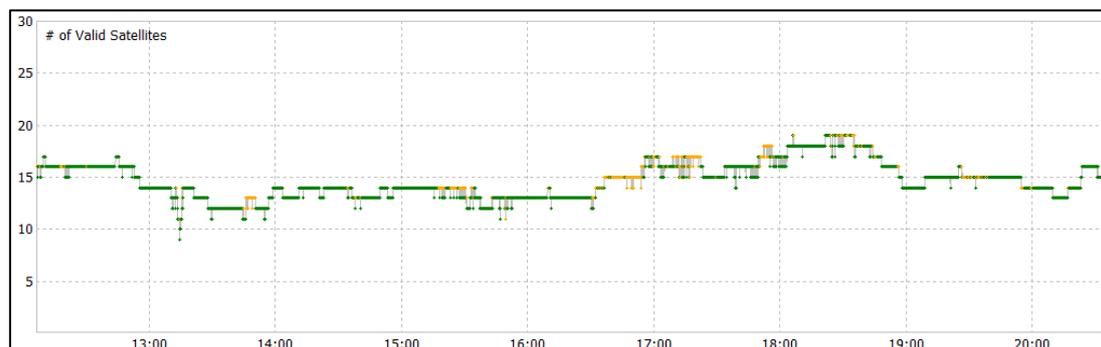


Fonte: O autor.

Pelas Figura 30 e Figura 31 pode-se verificar que mesmo com algumas alterações no *status* dos valores de ambiguidade, não foram observadas discontinuidades no posicionamento horizontal. Além disso, a grande quantidade de posições estimadas com valores fixos de ambiguidade é um indicativo de que o posicionamento foi realizado com alta acurácia, como descrito na seção 2.2.

Foi verificada, ainda, a utilização de 9 a 19 satélites no processamento dos dados, conforme apresenta a Figura 32.

Figura 32: Número de satélites utilizados no processamento.

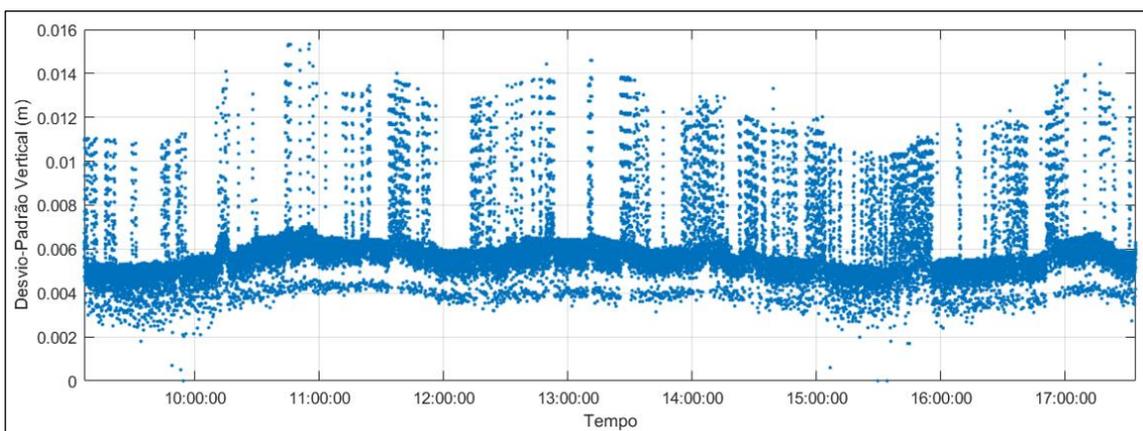


Fonte: O autor.

Da mesma forma, a alta quantidade de satélites também sinalizou uma elevada qualidade do posicionamento, visto que quanto maior é este número, mais alto é o total de observáveis consideradas no ajustamento das posições pelo EKF (subseção 2.2.2).

Esta sinalização foi ratificada pelas precisões horizontais e verticais estimadas no processamento. Em termos de precisão horizontal, a Figura 33 ilustra o comportamento dos desvios-padrões em toda a trajetória, o qual permaneceu inferior a 1,6 cm em praticamente toda a trajetória, e valor médio de 0,6 cm.

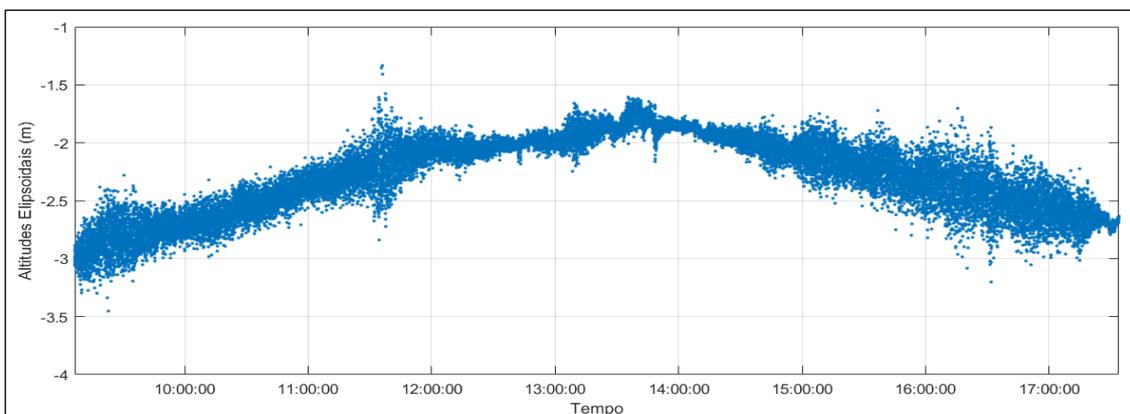
Figura 33: Desvios-padrões do posicionamento horizontal (m).



Fonte: O autor.

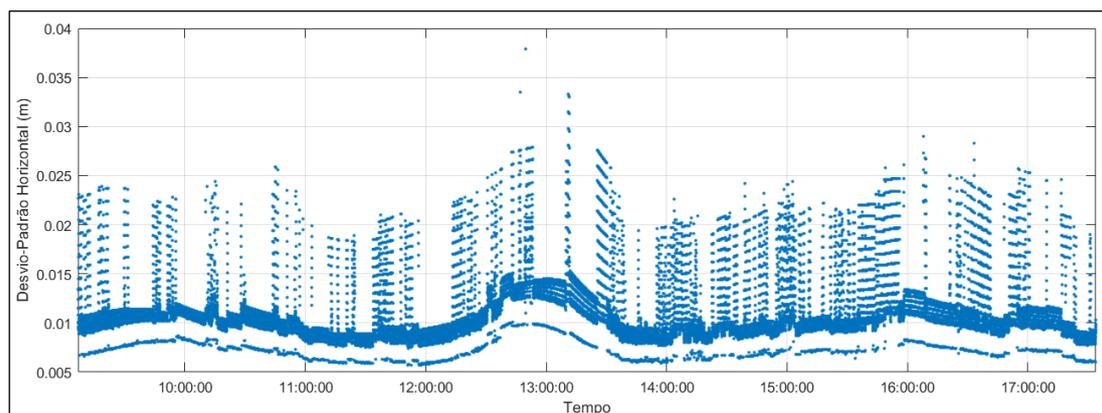
Em se tratando da componente altimétrica, o resultado do posicionamento vertical e o comportamento de suas precisões são ilustradas nas Figura 34 e Figura 35, respectivamente.

Figura 34: Componentes verticais do posicionamento.



Fonte: O autor.

Figura 35: Desvios-padrões do posicionamento vertical (m).



Fonte: O autor.

A Figura 34 mostra que as altitudes elipsoidais estimadas variam de -3,45 a -1,34 m, considerando a presença de todos os ruídos que incidiram no posicionamento, como a sua própria instabilidade e fatores ambientais como vento e ondas. Na Figura 35, pode-se notar que o desvio-padrão se manteve sempre inferior a 4,0 cm, e com média de 1,1 cm. As precisões verticais e horizontais analisadas reforçam a elevada qualidade do posicionamento estimado, o que permitiu a pesquisa seguir para o passo seguinte, que consistiu na filtragem dos resultados pelo FMM.

Como demonstrado nas subseções 2.5.1 e 3.3.3, o FMM depende apenas do tamanho de sua janela amostral. Logo, foram testados diversos valores, comparando os resultados com a curva de maré obtida na estação da Ponta da Armação. Ressalta-se que ambos os dados foram reduzidos de seus respectivos níveis médios.

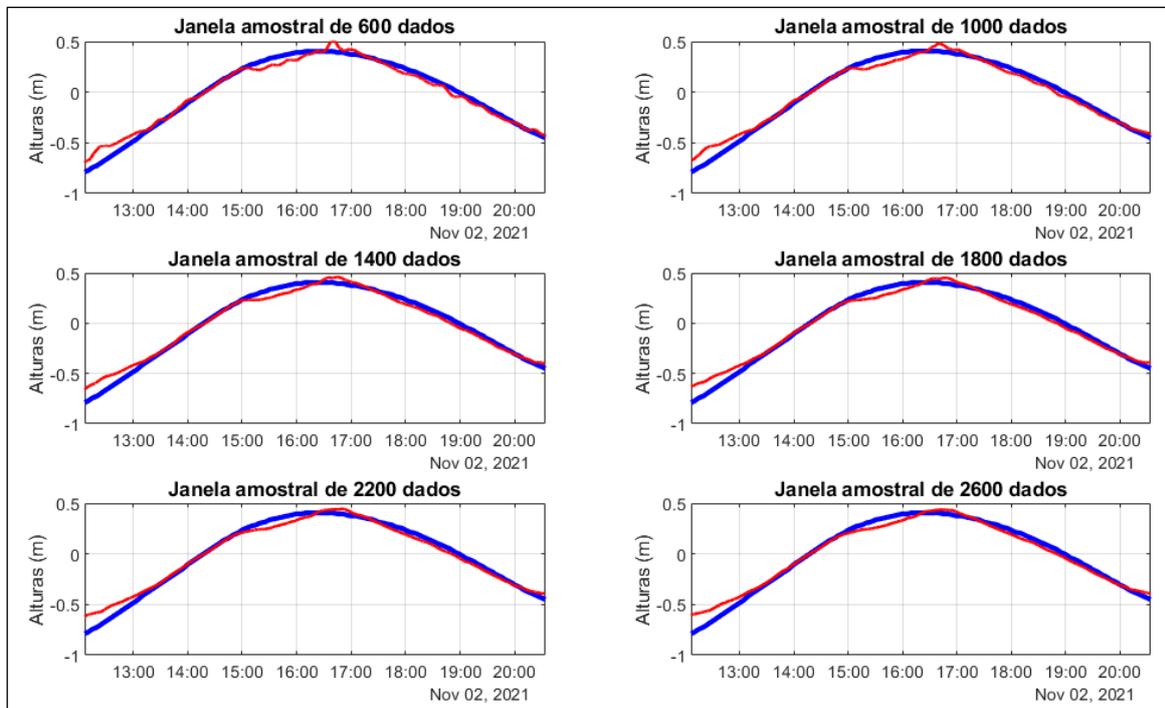
Em cada comparação foram calculados a diferença máxima e o RMSE entre as curvas. Na Tabela 4 estão lançados os resultados destes cálculos para alguns dos valores testados. Outrossim, a Figura 36 apresenta estes confrontos de forma gráfica.

Tabela 4: Análise das janelas amostrais do FMM.

Janela Amostral	Diferença Máxima (cm)	RMSE (cm)
600 pontos	17,2	5,8
1000 pontos	14,9	5,7
1400 pontos	13,5	5,6
1800 pontos	15,1	5,3
2200 pontos	16,8	5,3
2600 pontos	18,0	5,6

Fonte: O autor.

Figura 36: Comparações entre os resultados do FMM, com janelas amostrais variadas (vermelho), e a curva de maré da Ponta da Armação (azul).



Fonte: O autor.

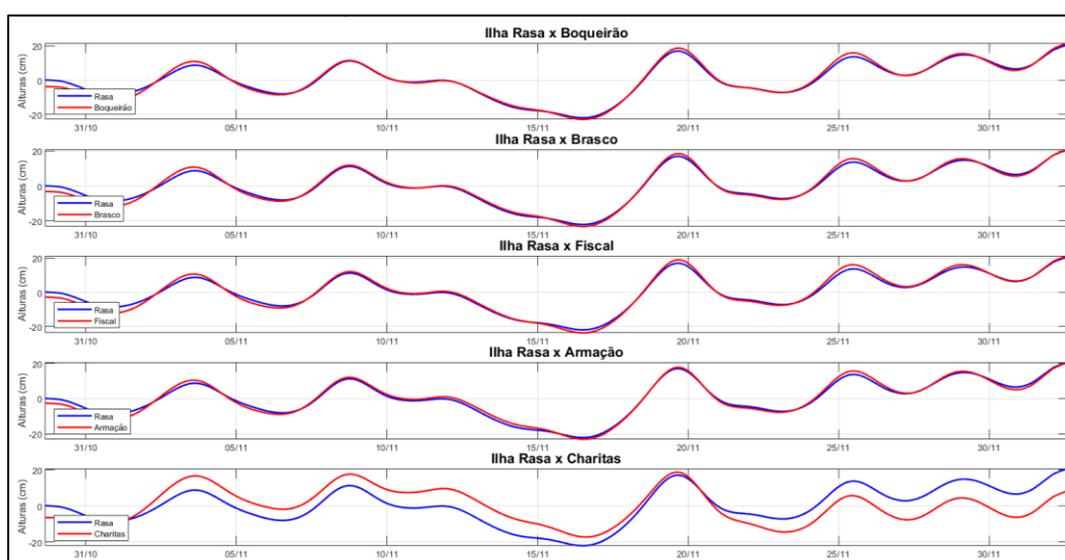
Na Tabela 4 é possível observar que todos os valores de RMSE calculados se mantiveram muito próximos, com variação da ordem de unidades de milímetros. Assim, constata-se que este não pode ser considerado um bom parâmetro para a decisão. Por outro lado, as diferenças máximas obtidas, que variaram centímetros, apontam para a maior proximidade entre a referência e o resultado da filtragem obtido com a janela de 1400 pontos.

Na análise dos gráficos da Figura 36, é possível perceber, ainda, a presença de influência de ruídos de alta frequência nas duas primeiras filtragens (janelas de 600 e 1000 pontos). Ademais, nos três últimos filtros (janelas de 1800, 2200 e 2600 pontos), embora haja uma atenuação considerável em relação aos demais, verifica-se o afastamento crescente dos dados de referência, principalmente nos primeiros instantes da série. Logo, ratifica-se a escolha da janela de 1400 pontos (23min20seg) para a filtragem dos dados de posicionamento GNSS. A respectiva curva resultante será empregada na modelagem proposta.

4.2. Maregrafia

Os dados de alturas maregráficas obtidos, demonstrados na seção 3.2, foram primeiramente verificados em termos de variação do NMD, a fim de confirmar se estão sujeitos às mesmas influências meteoceanográficas ou se foram coletados de forma adequada. A Figura 37 apresenta a comparação dos NMD de todos os marégrafos envolvidos, utilizando os dados da estação da Ilha Rasa como referência. Esta escolha foi realizada de forma aleatória, visto que qualquer um dos marégrafos poderia ser selecionado como referência.

Figura 37: Verificação dos NMD reduzidos à média.



Fonte: O autor.

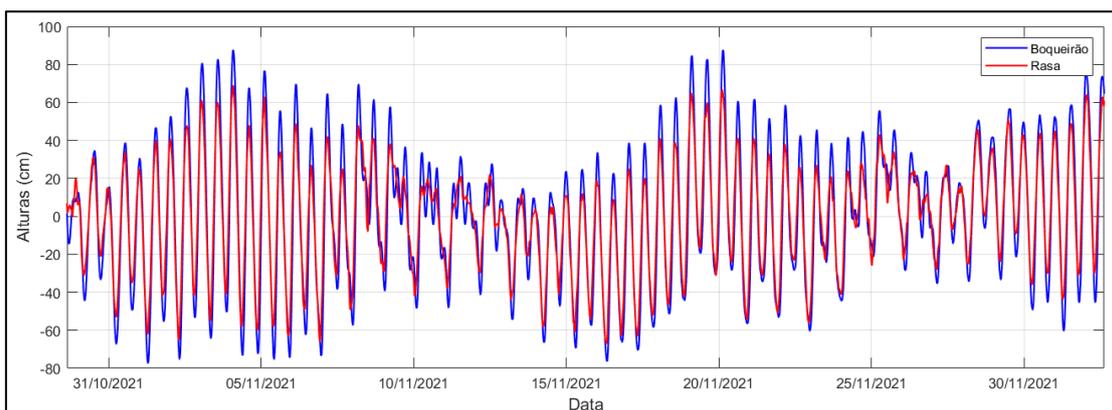
A comparação mostra que os dados maregráficos são bastante similares entre si, com exceção dos coletados na estação do Clube Naval Charitas que mesmo reduzido de seu valor médio, o comportamento dos seus NMD não teve uma proximidade constante com as demais estações, apresentando uma diferença máxima de 12,94 cm em relação ao do marégrafo da Ilha Rasa. Esta discrepância provavelmente deve-se a problemas na aquisição dos dados, visto que não existem motivos para considerar que haja uma diferença considerável na dinâmica da maré entre as localidades. Dessa forma, decidiu-se descartar o marégrafo de Charitas e prosseguir com os demais nas fases seguintes.

Em seguida, outra ação preliminar foi a adoção do mesmo nível médio para toda a região do estudo. Para isso, todas as curvas foram subtraídas de seu respectivo nível médio, passando a variar em torno de um único NMM. Cabe ressaltar que este

procedimento também posicionou todas as séries maregráficas num mesmo referencial altimétrico, o qual também consistia num requisito para a realização do zoneamento.

Iniciou-se, então, a procura pela quantidade de zonas nas quais seria dividida a área estudada. Conforme conclui-se na seção 3.3.6.1, a propagação da onda de maré na região acontece, aproximadamente, na direção Sul-Norte. Optou-se então por realizar o zoneamento entre as estações da Ilha Rasa e da Ilha do Boqueirão. A Figura 38 apresenta as curvas de maré destes marégrafos que serão interpoladas, reduzidas de seus respectivos níveis médios.

Figura 38: Curvas de maré dos marégrafos da Ilha Rasa e da Ilha do Boqueirão reduzidos de seus respectivos valores médios



Fonte: O autor.

Na Figura 38 pode-se observar que os dados se mantiveram em fase durante todo o período, diferindo entre si apenas da amplitude. Este fato permitiu concluir que o número de zonas que seria obtido pela diferença de fase seria mínimo. Com isso, o cálculo foi realizado apenas considerando as diferenças de amplitudes, cujo valor máximo foi de 30,32 cm.

Os dados obtidos pelos demais marégrafos foram utilizados na validação do zoneamento, por meio da comparação de suas respectivas sequências de alturas de maré com os dados interpolados. Esta validação serviu para auxiliar na decisão do valor mais apropriado para a quantidade de subáreas, mediante à seleção do valor da variável *degrau*.

Naturalmente, a escolha de um valor mínimo seria o ideal para a atenuação de descontinuidades geradas pelas interpolações. Porém, decidiu-se realizar testes para verificar a possibilidade de adotar um valor maior de *degrau*. Neste contexto, foram realizados comparativos com valores de *degrau*, de 10 a 1,0 cm, calculando, em cada

teste, os valores de RMSE entre as curvas dos marégrafos no interior da região (Brasco, Ilha Fiscal, Ponta da Armação). Os resultados encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros estatísticos do zoneamento com diversos valores de degrau.

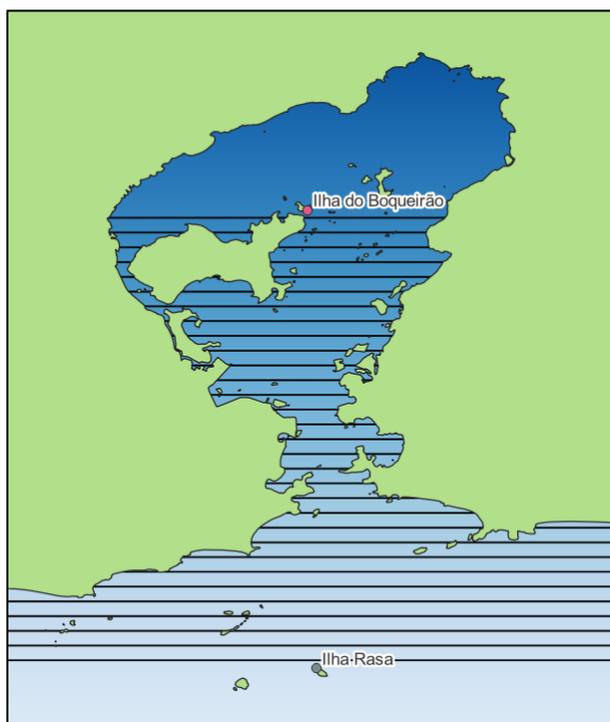
Degrau (cm)	Qtd de zonas	RMSE (cm)		
		Brasco	Ilha Fiscal	Pta. da Armação
10	5	3,55	5,31	5,78
6	7	1,87	3,60	4,03
5	8	1,78	3,01	3,41
4	9	1,78	2,61	2,96
3	12	1,89	2,41	2,72
2	17	2,15	2,26	2,31
1	32	2,42	2,12	2,27

Fonte: O autor.

Foi verificada a redução dos valores de RMSE à medida em que a altura do *degrau* decresce em dois dos três marégrafos considerados. E mesmo o aumento do RMSE com valores menores de *degrau* no marégrafo de Brasco não foi considerado relevante, por conta da ordem de grandeza milimétrica deste aumento e pelo valor do RMSE se manter similar aos dos marégrafos da Ponta da Armação e da Ilha Fiscal, que tiveram seu valor reduzido. Portanto, foi selecionado, dentre os valores testados, o *degrau* com 1,0 cm de altura, o qual resultou em 32 zonas de maré.

Como a distância entre os marégrafos da Ilha Rasa e da Ilha do Boqueirão é de 31,65 Km, as zonas geradas tiveram o comprimento calculado pela expressão (37), resultando em, aproximadamente, 980 m, como ilustra a Figura 39.

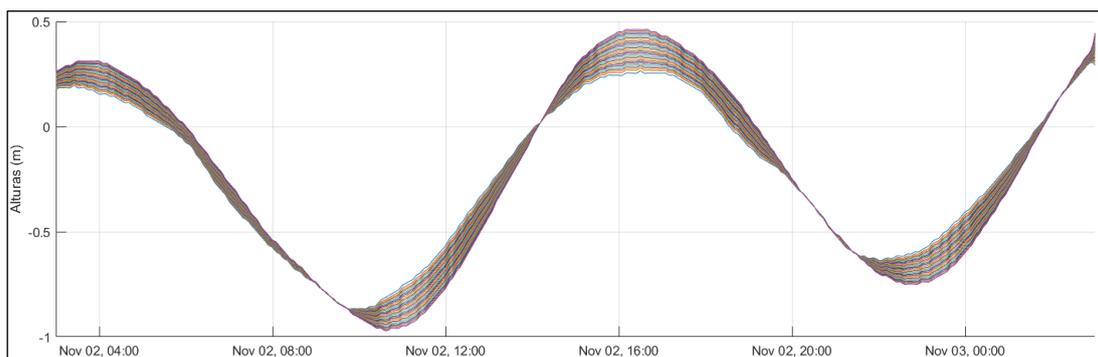
Figura 39: Zonas de maré na região da Baía de Guanabara.



Fonte: O autor.

Em seguida, as curvas foram niveladas ao NMM da Ponta da Armação, obtido com pouco mais de 32 anos de dados. Para isso, a diferença neste mesmo marégrafo entre o nível médio calculado na pesquisa de campo e o nível superior a três décadas foi determinado pela expressão (38), tendo como resultado 21 cm. Logo após, este desnível foi aplicado a todas as curvas de maré obtidas na interpolação pela equação (39), referenciando-as ao NMM estabelecido por um período maior de dados. A Figura 40 apresenta as curvas das 32 zonas de maré, niveladas a este novo NMM.

Figura 40: Curvas de maré interpoladas niveladas ao NMM de 32 anos.

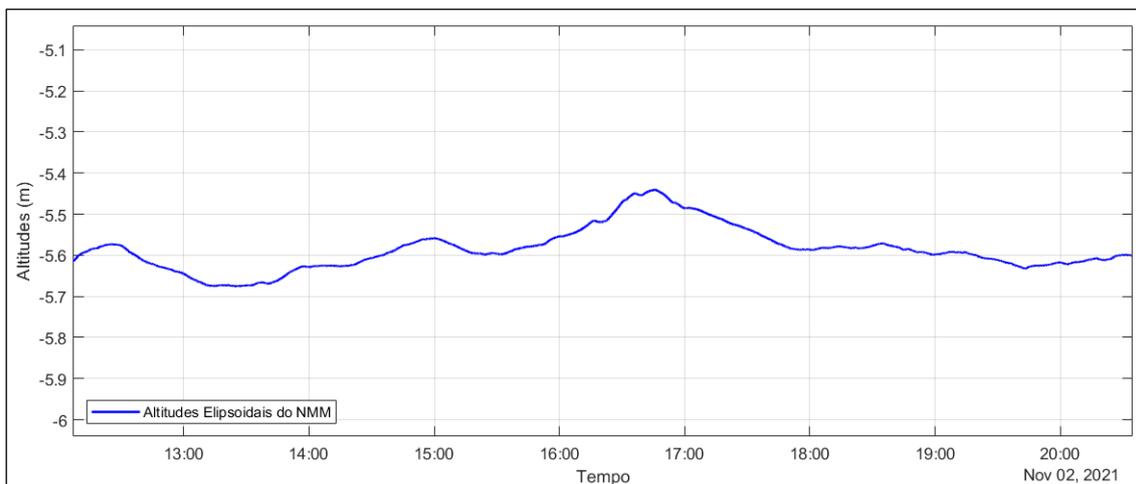


Fonte: O autor.

4.3. Modelagem das altitudes elipsoidais do NMM

Em seguida, as altitudes elipsoidais medidas pelo posicionamento, os dados maregráficos e a altura da antena, que permaneceu constante durante todo o período, foram inseridos na equação (40), a fim de realizar a modelagem propriamente dita das altitudes elipsoidais do NMM. A Figura 41 apresenta o resultado desta modelagem em função do tempo.

Figura 41: Modelo de Altitudes Elipsoidais do NMM em função do Tempo.



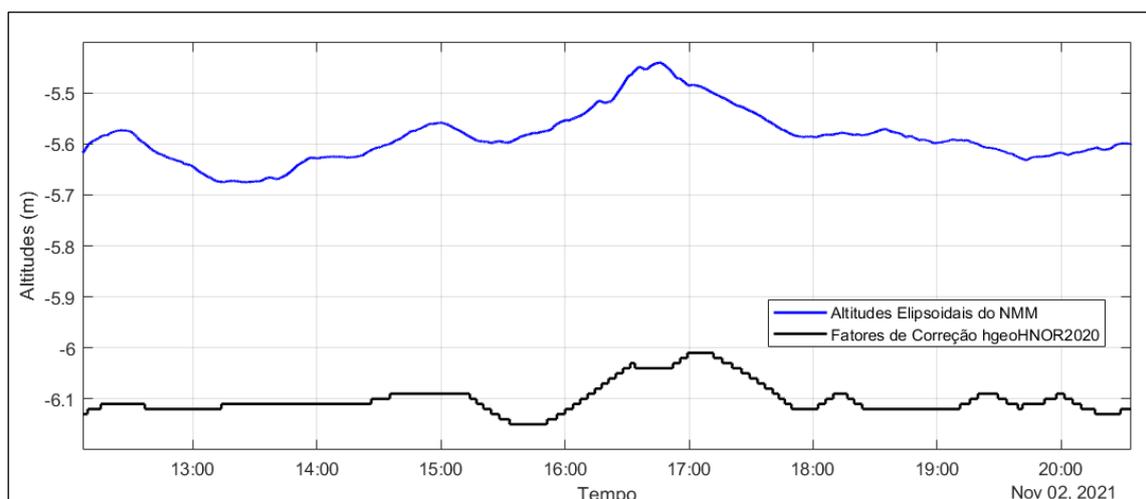
Fonte: O autor.

A Figura 41 mostra que as altitudes elipsoidais do NMM variam de -5,67 a -5,44 m, com média de -5,58 m e desvio-padrão de 5,5 cm. A baixa variação dos dados no sentido vertical sugere a anulação adequada dos efeitos maregráficos, permitindo uma

representação satisfatória do NMM no trajeto realizado. Da mesma forma, a precisão do modelo, obtida por meio da propagação dos erros das variáveis envolvidas, ratifica a qualidade deste modelo.

Logo após, estes valores foram comparados aos fatores de correção extraídos do conversor de altitudes hgeoHNOR2020, a fim de verificar a aplicação da definição do geóide criada inicialmente por Gauss e ainda levada em consideração por alguns autores que se dedicam à temática. A Figura 42 apresenta o gráfico, em função do tempo, da modelagem das altitudes do NMM obtida na pesquisa e dos fatores de correção do hgeoHNOR2020 no decorrer da trajetória realizada.

Figura 42: Comparação das Altitudes Elipsoidais do NMM com os Fatores de Correção do hgeoHNOR2020



Fonte: O autor.

Na Figura 42 pode-se observar uma diferença considerável entre as grandezas comparadas, a qual é matematicamente representada pelo RMSE de 51,6 cm, obtido entre elas. Esta discrepância é decorrente da existência da TNMM nesta região, gerada pelos fatores descritos na seção 2.4. Comprova-se, então, que a definição de geóide que o vincula ao NMM não deve ser aplicada nesta região.

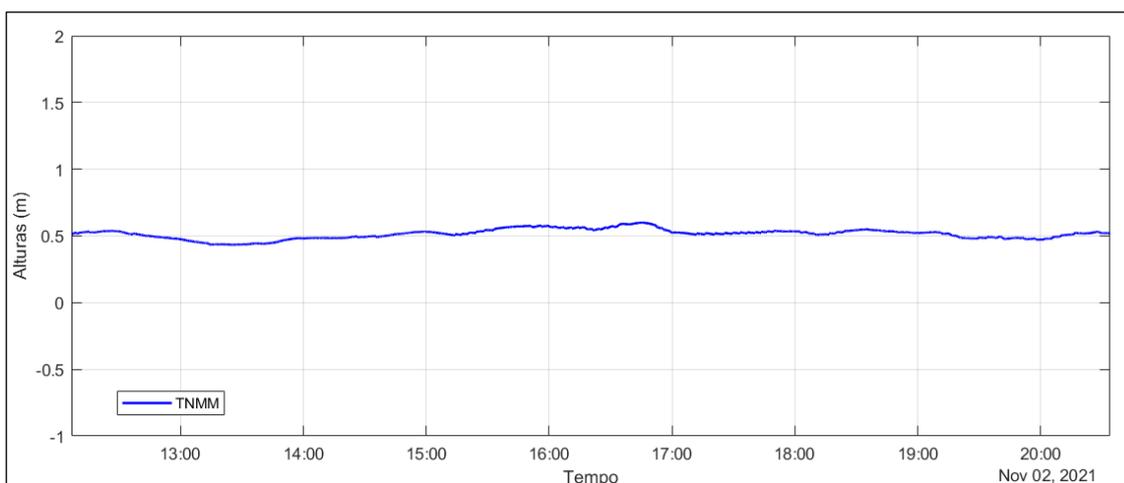
Por outro lado, é possível verificar uma certa semelhança no comportamento dos dados de NMM e de ondulação geoidal. Isso foi confirmado pelo cálculo do Índice de Correlação de Pearson, que resultou em 72,9%, o que representa uma forte correlação positiva entre os dados. Este resultado sugere que o NMM, mesmo não coincidindo com o geóide, comporta-se de maneira semelhante a uma superfície equipotencial do campo

de gravidade. Dessa forma, a aplicação de uma correção equivalente à TNMM tornaria o NMM uma boa representação do geóide, pelo menos nesta localidade, o que comprova a importância da determinação desta diferença.

4.4. Modelagem da TNMM

Foi então dado início à modelagem da TNMM pela aplicação das altitudes elipsoidais do NMM e dos fatores de correção do hgeoHNOR2020 na equação (41). O gráfico do resultado, em função do tempo, está retratado na Figura 43.

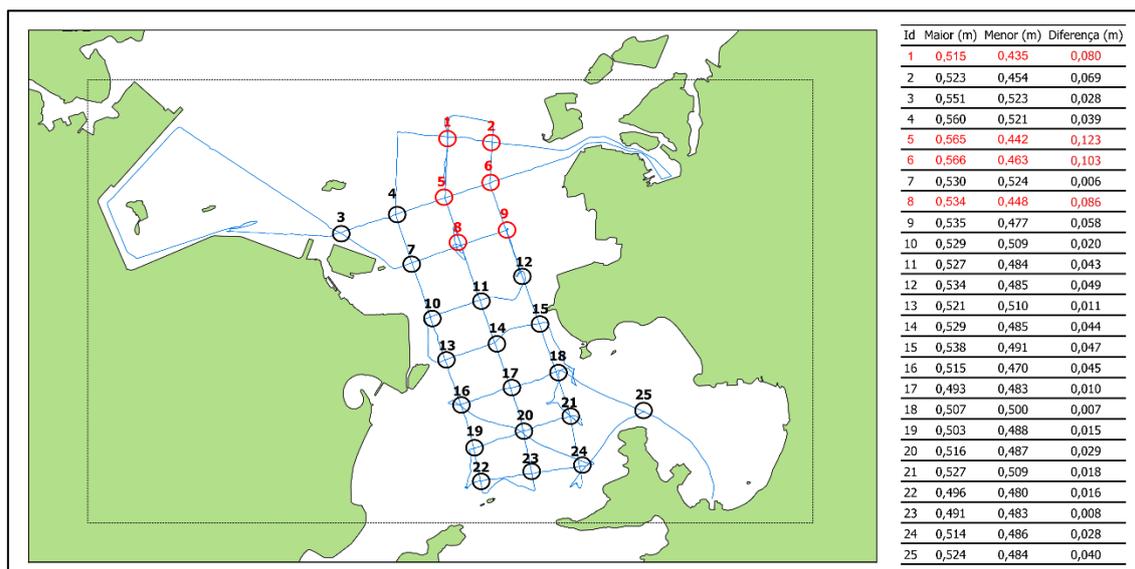
Figura 43: Modelo de TNMM em função do tempo.



Fonte: O autor.

O modelo de TNMM gerado varia de 43,5 a 60,0 cm e possui o valor médio de 51,5 cm e precisão de $\pm 7,4$ cm. Em seguida, o modelo foi analisado geograficamente ao longo da trajetória percorrida. Nesta análise, foram verificados que, em alguns pontos de cruzamento do trajeto, os valores estimados diferem em até 12,3 cm (Figura 44).

Figura 44: Verificação dos valores de TNMM nos cruzamentos do trajeto.

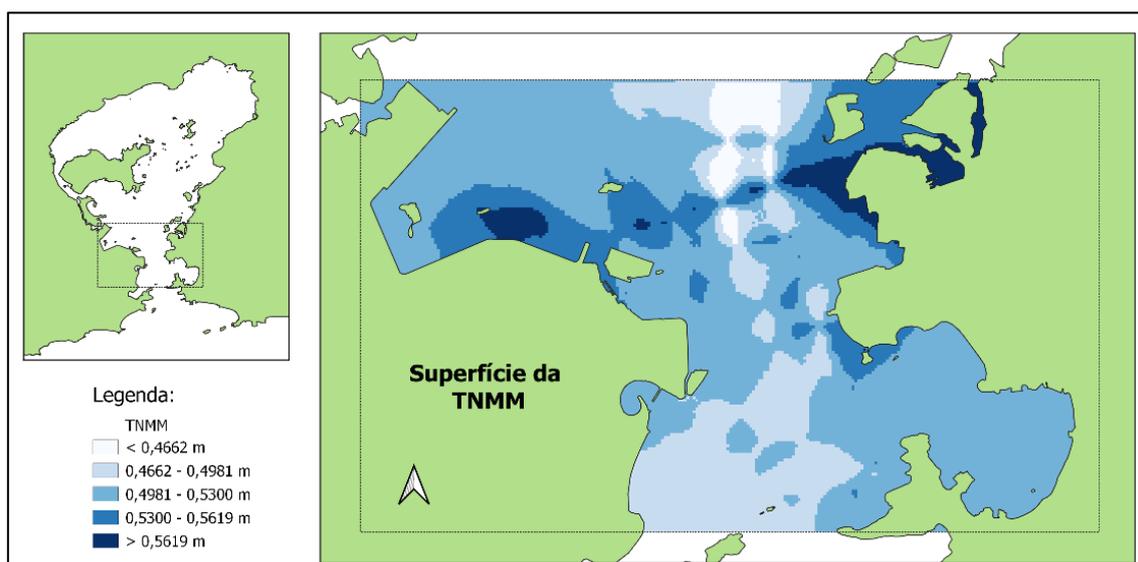


Fonte: O autor.

Na Figura 44 os pontos de intercessão onde foram verificadas as maiores diferenças foram destacados. Todas estas diferenças estão dentro do limite estabelecido pela precisão estimada pelo modelo ($2 \times 7,4 = 14,8$ cm). Com isso, o modelo de TNMM desenvolvido foi considerado satisfatório.

Em seguida, a fim de representá-lo na área de estudo e possibilitar a comparação com os modelos globais, os valores obtidos para cada posição da trajetória foram extrapolados, por meio do método de krigagem, para uma grade regular de 50 m (Figura 45).

Figura 45: Superfície da TNMM.

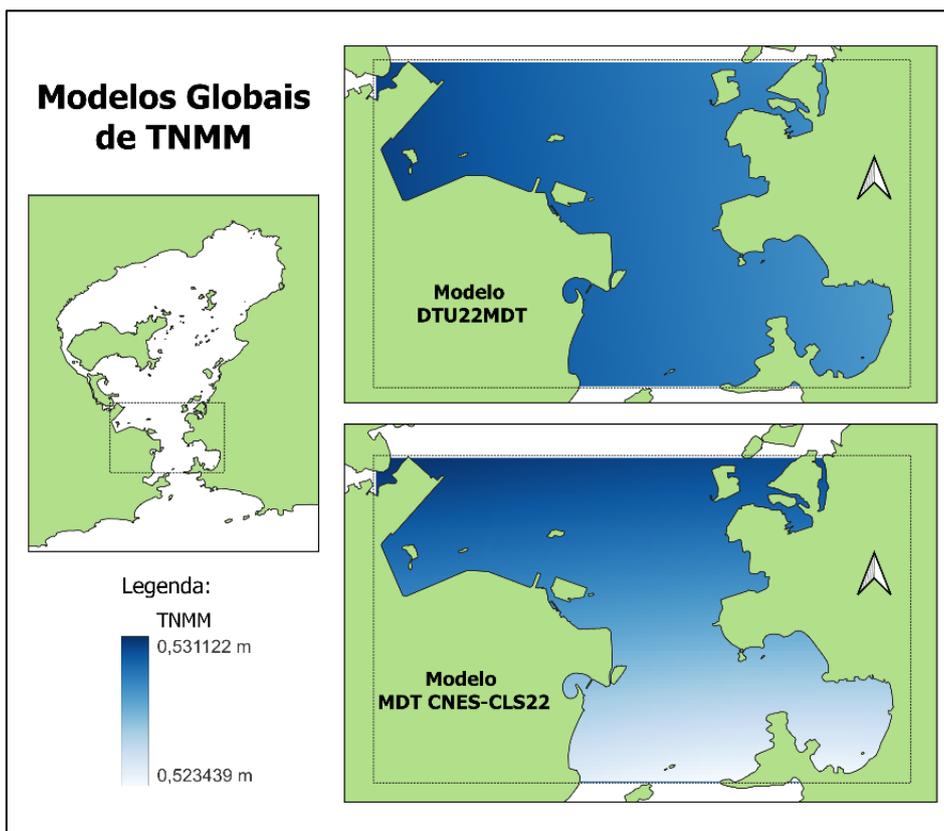


Fonte: O autor.

Na região central ao norte da superfície gerada, representada pela Figura 45, verifica-se a falta de uniformidade dos valores de TNMM, a qual é resultado das diferenças observadas nas interseções das linhas percorridas no trajeto. As demais áreas, no entanto, apresentaram comportamento uniforme conforme o esperado.

Como visto na seção 2.7.1, os modelos globais DTU22MDT e MDT CNES-CLS22 tem resolução de $0,125^\circ$, que equivale a 13,89 Km. Portanto, eles precisaram ser interpolados para a mesma grade regular construída, a fim de permitir a comparação com os resultados obtidos por este estudo. Como mencionado na seção 3.3.11, o método de interpolação bilinear foi utilizado para ambos, gerando as superfícies retratadas na Figura 46.

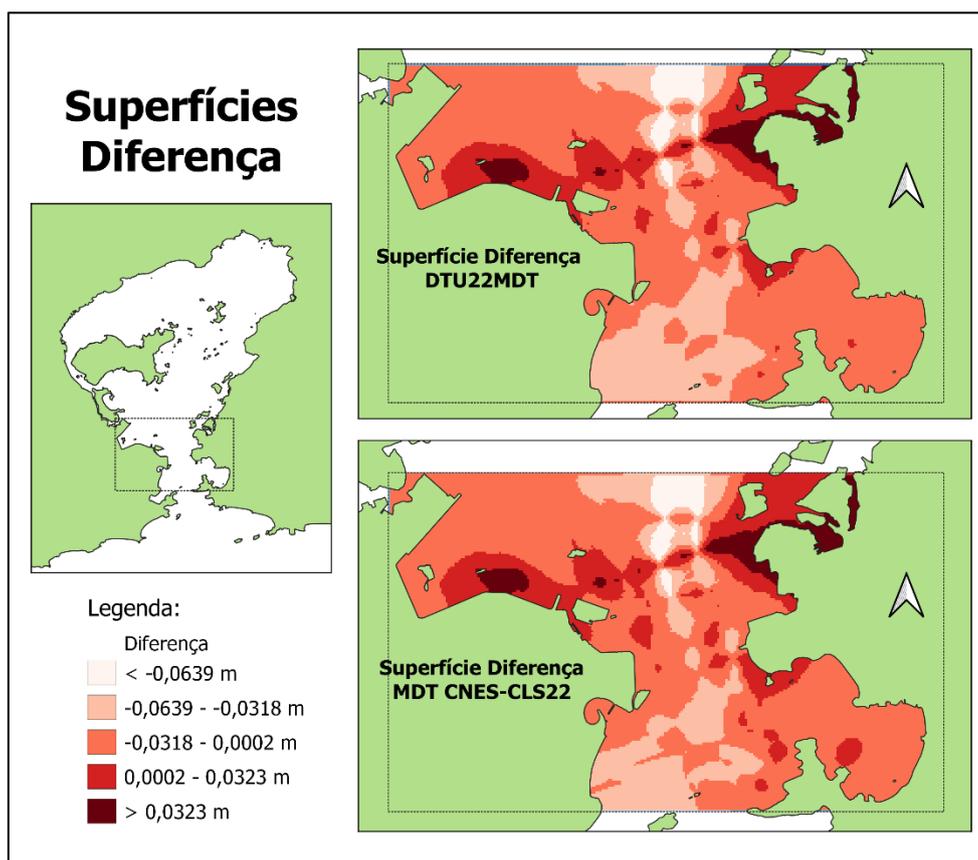
Figura 46: Modelos Globais de TNMM interpolados.



Fonte: O autor.

Na comparação com o modelo desenvolvido, foram calculados os RMSE de 2,6 e 2,5 cm em relação às superfícies interpoladas dos modelos DTU22MDT e MDT CNES-CLS22, respectivamente. Estes resultados comprovam a proximidade dos valores de TNMM obtidos neste trabalho com os estimados por estas instituições de pesquisa. Por fim, para consolidar esta conclusão, foram obtidas as superfícies de diferença em cada uma destas comparações (Figura 47).

Figura 47: Superfícies Diferença.



Fonte: O autor.

Na comparação com o modelo da DTU, as diferenças variaram de -9,5 a 6,3 cm, enquanto com o do CNES, oscilaram entre -9,6 e 6,4 cm. Dentre os fatores que contribuem para existência desta discrepância estão a utilização de modelos geoidais diferentes; o uso de resoluções consideravelmente distintas pelos modelos de TNMM comparados; as incertezas das medições e os erros decorrentes das interpolações realizadas.

Além disso, um fator que, provavelmente, pode ter incrementado estas diferenças é o fato de não serem considerados os efeitos da velocidade da lancha utilizada sobre sua variação vertical. Este efeito, denominado *squat*, é um fenômeno hidrodinâmico que consiste no abaixamento de um objeto em movimento sobre a superfície de um líquido, que aumenta à medida em que sua velocidade aumenta. Mesmo assim, as pequenas diferenças encontradas demonstram a proximidade entre o modelo desenvolvido e os modelos globais, comprovando a qualidade dos resultados obtidos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve por pretensão ressaltar a importância e contribuir para o estudo do NMM, da TNMM e da temática da unificação dos referenciais verticais altimétricos e batimétricos em regiões costeiras. Para este fim, seu objetivo foi propor a modelagem da TNMM na Baía de Guanabara-RJ. Nela, foram empregados dados de posicionamento GNSS coletados, em campo, por uma embarcação que realizou um trajeto predeterminado no interior da área de interesse, alturas de maré medidas por marégrafos distribuídos nos limites desta região e os fatores de correção extraídos do conversor de altitudes hgeoHNOR2020, assumidos como dados de ondulação geoidal. As incertezas de todas estas medidas foram consideradas e propagadas para a estimativa final do modelo obtido.

Inicialmente, foi realizada a revisão bibliográfica, a partir de onde foram obtidas as bases teóricas para o presente trabalho. Nela, foram abordados os princípios sobre o posicionamento GNSS, com ênfase no método relativo pós-processado; o geóide e sua relação com o NMM; a TNMM; marés oceânicas; o desenvolvimento dos MGG até chegar ao conversor de altitudes hgeoHNOR2020 e os MGO da TNMM, utilizados como parâmetros de comparação para o modelo desenvolvido.

Em seguida, no dia 02 de novembro de 2021, uma pesquisa de campo foi empreendida na região da Baía de Guanabara, com o intuito de coletar os dados GNSS e de alturas maregráficas. O posicionamento GNSS foi realizado por meio do método relativo pós-processado, pelo software RTKLIB, com dados de dupla frequência dos sistemas GPS e GLONASS, utilizando a estação da RBMC localizada em Niterói-RJ como base. Durante a trajetória o posicionamento estimado variou entre valores de ambiguidade fixos e *float*, resultando em valores médios de desvios-padrões horizontais e verticais de 0,6 e 1,1 cm, respectivamente.

Aliado a isso, durante todo o mês de novembro de 2021, foi realizada a aquisição de dados de maré em seis estações maregráficas distribuídas pela área de estudo. Tais informações foram adequadamente verificadas, tratadas e interpoladas ao longo da localidade, tendo como base dois dos marégrafos situados nos limites da região. Os resultados da interpolação ainda foram validados pela comparação com dados reais obtidos pelos demais marégrafos. A fim de considerar um nível de referência solidamente determinado, as curvas resultantes foram niveladas ao NMM determinado por uma série de registros do nível do mar de 32 anos, adquirida na estação da Ponta da Armação. Foi

então iniciada a modelagem das altitudes elipsoidais do NMM por meio dos dados de posicionamento GNSS, da variação da maré em torno do nível médio e da altura da antena, a qual foi a média das medidas realizadas antes e depois do levantamento. O modelo gerado abrangeu a trajetória percorrida pela embarcação e teve sua precisão vertical estimada em $\pm 5,5$ cm.

Logo após, este modelo foi comparado aos fatores de conversão extraídos pelo modelo hgeoHNOR2020, considerado, no presente estudo, como dados de ondulação geoidal. Este passo da metodologia visou o cumprimento do objetivo específico de verificar a definição tradicional de geóide, formulada por Gauss no século XVIII. Como resultado, foi calculado um RMSE considerável de 51,6 cm, fortalecendo a ideia de que o NMM não coincide com o geóide, principalmente em regiões costeiras, as quais são fortemente influenciadas por efeitos hidrodinâmicos provenientes da interação da água com a superfície terrestre. Entretanto, o índice de correlação obtido na comparação entre os dados, de 72,9%, permitiu concluir uma certa similaridade entre o comportamento do NMM com o de uma superfície equipotencial do campo de gravidade.

O passo seguinte consistiu na modelagem da TNMM ao longo do trajeto percorrido. Esta foi efetuada por meio da utilização do modelo de altitudes elipsoidais do NMM, gerado durante a metodologia, e dos fatores de correção extraídos do hgeoHNOR2020. O modelo resultante gerou dados de TNMM que variaram de 43,5 a 51,6 cm, com o desvio padrão de $\pm 7,4$ cm. Estes dados foram extrapolados para uma grade de 50 m de resolução para, efetivamente, gerar o que se denomina de superfície topográfica do NMM.

Por fim, esta superfície foi comparada com os modelos globais de TNMM DTU22MDT e MDT CNES-CLS22, os quais foram interpolados pelo método bilinear para permitir sua representação na mesma resolução da superfície gerada no presente trabalho. Destas comparações, foram geradas superfícies de diferenças que se comportaram de maneira semelhante, aproximando-se, em módulo, de 10 cm em alguns setores da região. Outrossim, foram obtidos os RMSE de 2,6 cm, com modelo da DTU, e de 2,5 cm, com o modelo do CNES, comprovando, assim, a proximidade entre os modelos e a qualidade da superfície gerada. Com isso, pode-se verificar o cumprimento integral dos objetos propostos por esta dissertação.

Este estudo representa um avanço no que diz respeito aos objetivos dos órgãos internacionais em relação à unificação de referenciais verticais. Além disso, contribui para a transição dos métodos antigos de determinação de referenciais altimétricos,

baseados no NMM, para o atual, que leva em consideração uma superfície equipotencial do campo da gravidade padronizada. Ele ainda reforça a possibilidade de emprego do posicionamento GNSS em estudos que requerem a medição do nível do mar com as mais variadas finalidades.

Como possibilidade de aplicação, os resultados obtidos podem contribuir para a compatibilização dos *data* batimétricos e altimétricos, na localidade da Baía de Guanabara, tendo em vista a boa resolução e a acurácia de poucos centímetros obtidas pela modelagem. Isto permite a comunicação entre produtos cartográficos náuticos e terrestres, o que traz vantagens em termos de acompanhamento do nível do mar, planejamento costeiro e prevenção de desastres nesta região.

Além disso, a modelagem proposta tem a possibilidade de ser difundida e adaptada para toda a extensão da costa brasileira e internacional. A disponibilidade global dos sistemas de posicionamento GNSS e o incremento de sua acurácia no decorrer dos anos é um fator de suma importância para esta expansão. Aliado a isso, o intenso tráfego marítimo ao redor do mundo pode ser utilizado neste sentido, por meio da coleta de dados de observáveis no decorrer das rotas dos navios. Com isso, a TNMM teria a possibilidade de ser estimada em larga escala, contribuindo grandemente para os objetivos que envolvem os referenciais verticais.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

De acordo com os resultados e os aprendizados obtidos no desenvolvimento deste trabalho, seguem algumas sugestões de melhorias para o presente estudo, bem como para trabalhos futuros:

- Realizar a modelagem proposta, percorrendo o trajeto planejado em um número maior de dias, a fim de permitir o ajustamento dos valores de posicionamento estimados.
- Realizar a modelagem proposta, empregando um sistema de navegação inercial na fase de coleta de dados, com o objetivo de auxiliar na compensação de quaisquer movimentos não considerados na metodologia supracitada;
- Realizar a modelagem proposta, utilizando modelos de NMM de alta resolução e referenciados ao elipsoide ao invés de gerar este nível por meio de marégrafos convencionais;

- Empregar diferentes sistemas de posicionamento como o Galileo e o Beidou, bem como os sistemas de aumento como o GBAS e o SBAS, para modelar a TNMM;
- Utilizar diferentes métodos de posicionamento, como o DGNSS, o Posicionamento em Redes, o PPP e o RTK;
- Pesquisar sobre diferentes tipos de filtro de dados para tratar dados de posicionamento GNSS;
- Realizar a modelagem da TNMM em ambientes com mais influências meteorológicas e utilizando embarcações de características diferentes a fim de verificar os impactos destes fatores na modelagem;
- Testar outras formas de compensar as variações do nível do mar, utilizando, por exemplo, modelos hidrodinâmicos e reflectometria GNSS;
- Estudar outras formas de interpolação para os dados de TNMM;
- Buscar a integração de bases cartográficas náuticas e terrestre da região com os resultados obtidos no presente estudo.

6. REFERÊNCIAS

ADEBISI, N.; BALOGUN, A.; MIN, T. H.; TELLA, A. Advances in estimating Sea Level Rise: A review of tide gauge, satellite altimetry and spatial data science approaches. **Ocean and Coastal Management**, [s. l.], v. 208, abril 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105632>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0964569121001174?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

AOCEANO (Associação Brasileira de Oceanografia). **Oceanografia**. Disponível em <https://aoceano.org.br/oceanografia/>>. Acesso em: 11 jan. 2023.

BAO, L.; WANG, N.; GAO, F. Improvement of Data Precision and Spatial Resolution of cGNSS-R Altimetry Using Improved Device with External Atomic Clock. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, [s. l.], v. 13, ed. 5, p. 207-211, 2016. DOI 10.1109/LGRS.2015.2506186. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7364160>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

BARROS, S. R. S.; WASSERMAN, J. C.; LIMA, G. B. A. Risco Ambiental na zona costeira: uma proposta interdisciplinar de gestão participativa para os Planos de Controle a Emergências dos portos brasileiros. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 10, n. 2, p. 217-227, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3883/388340129004.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

BLEWITT, G. GPS and space-based geodetic methods. **Geodesy**, v. 3, p. 351-390, 2007.

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; MACHADO W. C.; NUNES, M. A.; LENGROBER, N. V.; XAVIER, E. M. L.; FORTES, L. P. S. MAPGEO2015: O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 68, n. 10, p.1873-1884. 19 nov. 2016. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44289>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

BOTAI, C. M.; COMBRINCK, L. Global geopotential models from Satellite Laser Ranging data with geophysical applications: A review. **South African Journal of Science**. 2012;108(3/4), Art. #662, 10 pages. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4102/sajs.v108i3/4.662>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

BOUIN, M. N.; BALLU, V.; CALMANT, S.; PELLETIER, B. Improving resolution and accuracy of mean sea surface from kinematic GPS, Vanuatu Subduction Zone. **Journal of Geodesy**, Berlim, v. 83, n. 11, ed. 3, p. 1017-1030, Novembro 2009. DOI 10.1007/s00190-009-0320-7. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-009-0320-7>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

CASTRO JR., C. A. C. **Arcabouço gravimétrico brasileiro e o meio ambiente: possibilidades e perspectivas**. 2018. 234 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018. Disponível em:<<http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/8460>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

CAZENAVE, A.; PALANISAMY, H.; ABLAIN, M. Contemporary sea level changes from satellite altimetry: What have we learned? What are the new challenges? **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 62, ed. 7, p. 1639-1653, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.017>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

CHANG, X. W.; YANG, X.; ZHOU, T. MLAMBDA: a modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. **Journal of Geodesy**, [S. l.], ano 2005, n. 79, p. 552-565, 5 nov. 2005. DOI 10.1007/s00190-005-0004-x. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-005-0004-x>. Acesso em: 12 jan. 2023.

COCARD, M.; GEIGER, A.; KAHLE, H. G.; VEIS, G. Airborne laser altimetry in the Ionian Sea, Greece. **Global and Planetary Change**, [s. l.], v. 34, p. 87-96, 2002. DOI [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(02\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(02)00107-8). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818102001078>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

COSTA, D. S. **Variação do nível médio do mar: Técnicas para a Avaliação**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo (USP), São Paulo, 2007. DOI 10.11606/D.3.2007.tde-17012008-110654. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-17012008-110654/en.php>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. Análise de séries temporais maregráficas correlacionadas com observações GNSS no datum vertical brasileiro de Imbituba-SC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 1, p. 73-90, 2016. Disponível em:

<<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/44472/23545/184452>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

DALAZOANA, R. **Estudos dirigidos à análise temporal do datum vertical brasileiro**. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3922>. Acesso em: 21 fev. 2023.

DE SOUZA, L. M. **Análise das variações da topografia do nível "médio" do mar (TNMM) utilizando o CRYOSAT-2 (CS2) e observações maregráficas**. 2021. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/28153>. Acesso em: 21 fev. 2023.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Carta de Correntes de Maré** – Baía de Guanabara (RJ). Niterói: DHN, 2012.

DOODSON, A. T. The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, v. 100, n. 704, Dec. 1, 1921, pp. 305-329. Disponível em: <<http://doi.org/10.1098/rspa.1921.0088>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

FEAIRHELLER, S.; CLARK, R. Other Satellite Navigation Systems. In: KAPLAN, E. D. (ed.); HEGARTY, C. J. (ed.). **Understanding GPS: Principles and Applications**. 2 ed. Artech House, Norwood, 2006. pp. 595-634.

FEATHERSTONE, W. Expected Contributions of Dedicated Satellite Gravity Field Missions to Regional Geoid Determination with some Examples from Australia. **Journal of Geospatial Engineering**. [S.l.], v. 4, n.1, p. 1-18, 2002. Disponível em: <http://www.lsgi.polyu.edu.hk/sTAFF/zl.li/vol_4_1/01_featherstone.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2023

FILHO, H. D. S.; CORNERO, C.; PEREIRA, A.; NERO, M. Cartographic Accuracy Standard (CAS) of the digital terrain model of the digital and continuous cartographic base of the state of Amapá: case study in the city of Macapá. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 28, 2022.

FOSTER, J. H.; CARTER, G. S.; MERRIFIELD, M. A. Ship-based measurements of sea surface topography. **Geophysical Research Letters**, [s. l.], v. 36, ed. 11, 2009. DOI <https://doi.org/10.1029/2009GL038324>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009GL038324>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

FRANCO, A. S. **Marés. Fundamentos, Análise e Previsão**. 2ª edição. Niterói. 2009.

FSA - FEDERAL SPACE AGENCY - INFORMATION ANALYTICAL CENTRE. **Constellation status**. 2019. Disponível em: < <https://glonass-iac.ru/gps/sostavOG/>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. 2 ed. Curitiba: Editora UFPR, 2012. 304p.

_____.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. Ed. Curitiba: UFPR, 2015. 428 p.

GETREUER, P. Linear Methods for Image Interpolation. **Image Processing On Line**, v. 1, 2011, pp. 238–259. Disponível em: <https://doi.org/10.5201/ipol.2011.g_lmii>. Acesso em: 24 dez. 2023.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). **GGOS Focus Area**. Disponível em: < <https://ggos.org/about/org/fa/>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

_____. **What is GGOS?** Disponível em: < <https://ggos.org/about/what-is-ggos/>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

GLONASS. **GLONASS Constellation Status**. Disponível em <<https://www.glonass-iac.ru/en/sostavOG/>>. Acesso em: fev. 2023.

GPS WORLD. **Sanctions Delay Russia's GLONASS-K2 Program**. 2014. Disponível em < <https://www.gpsworld.com/sanctions-delay-russias-glonass-k2-program/>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

_____. **GLONASS: The decade of transition to CDMA signals**. 2023. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/glonass-the-decade-of-transition-to-cdma-signals/>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

_____. **Russia launches Glonass-K2 No. 13.** 2023. Disponível em <<https://www.gpsworld.com/russia-launches-glonass-k2-no-13/>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

GUIMARÃES, G. N. **A altimetria e o modelo geoidal no Estado de São Paulo.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2010. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-20102010-170156/pt-br.php>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

HAUSCHILD, A. Combinations of Observations. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems.** Springer, Berlin, 2017.

HEGARTY, C. J. The Global Positioning System (GPS). In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems.** Springer, Berlin, 2017.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more.** Springer, Vienna, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

IHDE, J.; BARZAGHI, R.; MARTI, U.; SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G. e PAIL, R. (2015). Report of the ad-hoc group on an International Height Reference System (IHR). In: Drewes H., Hornik H.(Eds.) **Travaux de l'AIG 39**, IAG Reports 2011-2015. Disponível em: <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1300913/document.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

IHDE, J.; MÄKINEN, J.; SACHER, M. Conventions for the definition and realization of a European Vertical Reference System (EVRS). **EVRS Conventions 2007.** EVRS Conv, p. 1-10, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jaakko-Maekinen-2/publication/265823560_Conventions_for_the_Definition_and_Realization_of_a_European_Vertical_Reference_System_EVRS_-_EVRS_Conventions_2007_-_links/615cc5e6c04f5909fd857b84/Conventions-for-the-Definition-and-Realization-of-a-European-Vertical-Reference-System-EVRS-EVRS-Conventions-2007.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2023.

INCE, E. S.; BARTHELMES, F.; REISSLAND, S.; ELGER, K.; FÖRSTE, C.; FLECHTNER, F.; SCHUH, H. **ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans.** *Earth System Science Data*, v. 11, p. 647–674, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Modelo hgeoHNOR2020 para conversão de Altitudes Geométricas em Altitudes Normais.** Rio de Janeiro: IBGE, 2021. 51 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101841.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

_____. **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais 2018.** Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <ftp://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2023.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Resolution 3/1919, as amended – Draft Proposal.** 2008. Disponível em: <https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/TWCWG1/TWCWG1-7.1.2bResolution_3-1919-Clean.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2023.

_____. C-13. **Manual de Hidrografia**, Mônaco, 2005. Disponível em: <<https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/C-13.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

JOUSSET, S.; MULET, S.; WILKIN, J.; GREINER, E.; DIBARBOURE, G.; PICOT, N. New Global Mean Dynamic Topography CNES-CLS-22 Combining Drifters, Hydrological Profiles and High Frequency Radar Data. In: **Proceedings of the Ocean Surface Topography meeting (OSTST)**, Venice, Italy, 31 October–4 November 2022. Disponível em: <https://ostst.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/OSTST2022/Presentations/GEO2022-New_global_Mean_Dynamic_Topography_CNES-CLS-22_combining_drifters__hydrological_profiles_and_High_Frequency_radar_data.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2023.

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C.J. **Understanding GPS, Principles and Applications**. Artech House, 2006. (703).

KELECY, T. M.; BORN, G. H.; PARKE, M. E.; ROCKEN, C. Precise mean sea level measurements using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 99, ed. C4, p. 7951-7959, abril 1994. DOI <https://doi.org/10.1029/93JC03355>. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/93JC03355>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

KEY, K. W.; PARKE, M. E.; BORN, G.H. Mapping the sea surface using a GPS buoy. **Marine Geodesy**, [s. l.], v. 21, ed. 1, p. 67-79, 1998. DOI <https://doi.org/10.1080/01490419809388122>. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01490419809388122?needAccess=true>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

KNUDSEN, P.; ANDERSEN, O.; MAXIMENKO, N. A new ocean mean dynamic topography model, derived from a combination of gravity, altimetry and drifter velocity data. **Advances in Space Research**, Volume 68, Issue 2, 2021, Pages 1090-1102. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.12.001>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

LANGLEY, R.B.; TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. Introduction to GNSS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017.

LAVROG, D.; EVEN-TZUR, G.; REINKING, J. Extraction of geoid heights from shipborne GNSS measurements along the Weser River in Northern Germany. **Journal of Geodetic Science**, Berlim, v. 5, ed. 1, p. 148-155, Outubro 2015. DOI doi.org/10.1515/jogs-2015-0014. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jogs-2015-0014/html>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

LIN, Y.; HUANG, C.; CHEN, S.; DOONG, D.; KAO, C. C. Development of a GNSS buoy for monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas. **Sensors**, Suíça, v. 17, ed. 1, p. 105-109, 2017. DOI 10.3390/s17010172. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312497719_Development_of_a_GNSS_Buoy_for_Monitoring_Water_Surface_Elevations_in_Estuaries_and_Coastal_Areas>. Acesso em: 9 jun. 2022.

LÖFGREN, J. S. **Local Sea Level Observations Using Reflected GNSS Signals**. 2014. Tese (PhD) - Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suécia, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/273383831_Local_Sea_Level_Observations_Using_Reflected_GNSS_Signals>. Acesso em: 9 jun. 2022.

LOPES, V. M. **Etnogeomorfologia costeira e estuarina em comunidades de pescadores artesanais no litoral de Goiana, Pernambuco**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26763>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. **Dez anos de monitoramento do nível do mar no IBGE**. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/10anos.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2023.

LYCOURGHOTIS, S. Sea Topography of the Ionian and Adriatic Seas Using Repeated GNSS Measurements. **Water**, [s. l.], v. 13, ed. 6, 2018. DOI 10.3390/w13060812. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/6/812>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MACHADO, W. C.; BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C. Interpolação de anomalias de gravidade através de Redes Neurais visando o cálculo do modelo geoidal de Santa Catarina. In: **Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CBCG)**, 8., 3-5 dez. 2013, Curitiba, PR, Brasil. Disponível em: <https://cbcg.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2013/11/G037_CBCG13.pdf>. Acesso em: 24 dez. 2023.

MACHUCA, M. C. A.; NOSSA, D. A. P.; TRULLO, L. J. S.; BARRERO, F. O.. Construction of the reference (vertical) hydrographic surface for the bays of Buenaventura and Málaga, Colombian Pacific. **Boletín Científico CIOH**, [s. l.], ed. 36, p. 53-69, 2018. DOI 10.26640/22159045.438. Disponível em: <<https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CIOH/article/view/438>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MAQUEDA, M. A. M.; PENNA, N. T.; WILLIAMS, S. D. P.; FODEN, P. R.; MARTIN, I.; PUGH, J. Water Surface Height Determination with a GPS Wave Glider: A Demonstration in Loch Ness, Scotland. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [s. l.], v. 33, ed. 6, p. 1159-1168, 2016. DOI 10.1175/JTECH-D-15-0162.1.

Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/33/6/jtech-d-15-0162_1.xml>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MARCOS, M.; WÖPPELMANN, G.; MATTHEWS, A.; PONTE, R. M.; BIROL, F.; ARDHUIN, F.; COCO, G.; SANTAMARÍA-GOMEZ, A.; BALLU, V.; TESTUT, L.; CHAMBERS, D.; STOPA, J. E. Coastal Sea Level and Related Fields from Existing Observing Systems. **Surveys in Geophysics**, [s. l.], v. 40, p. 1293-1317, 2019. DOI <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09513-3>. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10712-019-09513-3>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MARENGO, J. A., SCARANO, F. R., KLEIN, A. F., SOUZA, C. R. G. e CHOU, S. C. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas. **Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC)**, p. 184, 2016.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. NORMAM-501 (1 ed.). **Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos**, Niterói, 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dhn/normam/normam-501.html>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

_____. **O que é a Amazônia Azul e por que o Brasil quer se tornar potência militar no Atlântico**. [S. l.], 2022. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/economia-azul/noticias/o-que-%C3%A9-amaz%C3%B4nia-azul-e-por-que-o-brasil-quer-se-tornar-pot%C3%Aancia-militar-no-atl%C3%A2ntico>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

MARSHALL, A.; DENYS, P. Water level measurement and tidal datum transfer using high rate GPS buoys. In: **FIG (International Federation of Surveyors): Working Week**. Estocolmo, Suécia: [s. n.], 2008. p. 7951-7959. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Water-Level-Measurement-and-Tidal-Datum-Transfer-Marshall-Denys/cb8d3d898d3b660a55d5d7921c141c068b7efd13#citing-papers>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MARTI, F.; CAZENAVE, A.; BIROL, F.; PASSARO, M.; LÉGER, F.; NIÑO, F.; ALMAR, R.; BENVENISTE, J.; LEGEAIS, J. F. Altimetry-based sea level trends along the coasts of Western Africa. **Advances in Space Research**, [s. l.], v. 68, ed. 2, p. 504-522, 2021. DOI 10.1016/j.asr.2019.05.033. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719303606>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. **Modelagem Digital de Terrenos (MDT) de 3ª para a América do Sul**. Relatório de Pós-Doutorado. Período: março de 2007 a fevereiro de 2008. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 38 p.

MEDEIROS, R. A. **Filtro de Kalman Estendido Baseado em Quaternions para Estimção de um Sistema de 6-DOF Embarcado**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/16850>. Acesso em: 24 jan. 2023.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications. **GPS Solutions**, [s. l.], v. 18, p. 309-322, 2014. DOI 10.1007/s10291-013-0331-y. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-013-0331-y>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

ODIJK, D. Positioning Model. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017.

OLIVEIRA JR., A. M.; ARROYO-SUAREZ, E. N.; RAMOS, A. M.; ARENTZ, M. F. R. Seabed Mapping on an Earth Centered Earth Fixed (ECEF) Geocentric Reference Frame: Cooperative Validation with US Navy and Brazilian Navy in Guanabara Bay, Rio de Janeiro. In: 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2010 (ION GNSS 2010), 2010, Portland. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2010. p. 2064-2075. Disponível em: <<https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=9320>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

OPPENHEIMER, M.; GLAVOVIC, B. C.; HINKEL, J.; VAN DE WAL, R.; MAGNAN, A. K.; ABD-ELGAWAD, A.; CAI, R.; CIFUENTES-JARA, M.; DECONTO, R. M.; GHOSH, T.; HAY, J.; ISLA, F.; MARZEION, B.; MEYSSIGNAC, B.; SEBESVARI, Z. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: PORTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E.; MINTENBECK, K.; ALEGRIA, A.; NICOLAI, M.; OKEM, A.; PETZOLD, J.; RAMA, B.; WEYER, N. M. (Eds.). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/08_SROCC_Ch04_FINAL.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2023.

PASCUAL, A.; PUJOL, M.; LARNICOL, G.; TRAON, P. L.; RIO, Marie-hélène. Mesoscale Mapping Capabilities of Multisatellite Altimeter Missions: First results with Real Data in the Mediterranean Sea. **Journal of Marine Systems**, [s. l.], v. 65, p. 190-211, 2007. DOI 10.1016/j.jmarsys.2004.12.004. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924796306002922>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

PINEAU-GUILLOU, L.; DORST, L. Creation of Vertical Reference Surfaces at Sea Using Altimetry and GPS. In: ALTAMINI, Z.; COLLILIEUX, X. (ed.). **Reference Frames for Applications in Geosciences**. 1. ed. Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. p. 229-235. ISBN 978-3-642-32998-2. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-32998-2_33>. Acesso em: 9 jun. 2022.

PLAG, H.-P.; ALTAMIMI, Z.; BETTADPUR, S.; BEUTLER, G.; BEYERLE, G.; CAZENAVE, A.; CROSSLEY, D.; DONNELLAN, A.; FORSBERG, R.; GROSS, R.; HINDERER, J.; KOMJATHY, A.; MANNUCCI, A. J.; MA, C.; NOLL, C.; NOTHNAGEL, A.; PAVLIS, E. C.; PEARLMAN, M.; POLI, P.; SCHREIBER, U.; SENIOR, K.; WOODWORTH, P.; ZUFFADA, C. The goals, achievements, and tools of modern geodesy. In: PLAG, H.-P.; PEARLMAN, M. (Eds.). **The global geodetic observing system: meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020**. Springer, Berlin, 2009. p. 15–88. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-02687-4>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

PUENTE, V.; VALDÉS, M. Sea Level Determination in the Spanish Coast Using GNSS-R. In: II CONGRESS IN GEOMATICS ENGINEERING, 2019, Madrid, Espanha. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2019. DOI 10.3390/proceedings2019019011. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2504-3900/19/1/11>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea Level**. John Wiley & Sons, Chichester, 1996. 472 p.

RAPP, R. H. (1998). Past and Future Developments in Geopotential Modeling. In: FORSBERG, R., FEISSEL, M., DIETRICH, R. (eds) **Geodesy on the Move**. International Association of Geodesy Symposia, vol 119. Springer, Berlin, Heidelberg. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5_9>. Acesso em: 12 dez. 2023.

REALINI, E. **GoGPS: Free and Constrained Relative Kinematic Positioning with Low Cost Receivers**. 2009. Tese (PhD em Geodésia e Geomática) - Politécnica de Milão, Milão, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237520116_goGPS_free_and_constrained_relative_kinematic_positioning_with_low_cost_receivers>. Acesso em: 9 jun. 2022.

REIMANN, L.; VAFEIDIS, A. T.; HONSEL, L. E. Population development as a driver of coastal risk: current trends and future pathways. **Cambridge Prisms: Coastal Futures**, v. 1, p. e14, 2023.

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**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 3-22, 1 jan. 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v6n1.5518>. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/5518>. Acesso em: 21 fev. 2023.

REVNIVYKH, S.; BOLKUNOV, A.; SERDYUKOV, A.; MONTENBRUCK, O. GLONASS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; MONTENBRUCK, O. (eds) **Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems**. Springer, Berlin, 2017.

RIO, M.-H. Use of Altimeter and Wind Data to Detect the Anomalous Loss of SVP-Type Drifter's Drogue. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 29, n. 11, 1 novembro 2012, p. 1663-1674. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00008.1>>. Acesso em: 24 dez. 2023.

RUSSIAN SPACE WEB. **GLONASS-K2 satellite series**. Disponível em <<https://www.russianspaceweb.com/glonass-k2.html>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

SANSÒ, F.; SIDERIS, M. G. **Geoid Determination: Theory and Methods**. Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer, Berlin, 2013.

SANTANA, T. A. **Contribuições para os estudos de integração das componentes verticais terrestre e marinha ao longo da costa brasileira**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2020. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/xmlui/handle/1884/66382>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

SANTOS, M. S. T. ; AMARO, V. E. ; FERREIRA, A. T. S.; SANTOS, A. L. S. Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão, Nordeste do Brasil. **Revista de Geologia** (Fortaleza), v. 25, p. 7-7, 2012. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/geologia/article/view/1357>. Acesso em: 12 dez. 2023.

SCHUMAKER, L. L. **Spline Functions: Basic Theory**. 3. ed. Cambridge University Press, 2007.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SHI, L.; XU, X.; XU, K.; XU, Y. Coastal Altimetry: A Promising Technology for the Coastal Oceanography Community. In: PAN, J.; DEVLIN, A. (ed.). **Estuaries and Coastal Zones: Dynamics and Response to Environmental Changes**. [S. l.]: IntechOpen, 2019. cap. 4. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C7RA00172J%0Ahttps://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

SILVEIRA, L. N.; SOUZA, S. F.; NIEVINSKI, F. G. Análise Preliminar da Altimetria Orbital por Radar para a Integração de Referenciais Altimétricos no Complexo Lagoa dos Patos/Lago Guaíba. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2023, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos, INPE, 2023. Disponível

em: <https://proceedings.science/sbsr-2023/trabalhos/analise-preliminar-da-altimetria-orbital-por-radar-para-a-integracao-de-referenc?lang=pt-br>. Acesso em: 24 dez. 2023.

SOARES, S.; SANTOS, E.G.; LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como Insumo para Integração de Altitudes e Profundidades: Resultados Preliminares. **VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, p. 742-751, 2018.

SUN, W.; ZHOU, X.; FU, Y.; WANG, Z.; ZHOU, D. Monitoring Tides with GNSS Buoys in Open Sea Areas. In: International Workshop on Environment and Geoscience (IWEG 2018), 2018, Hangzhou, China. **Proceedings** [...]. [S. l.]: Scitepress, 2018. p. 105-109. Disponível em: <<https://www.scitepress.org/Papers/2018/74265/74265.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

THE OPEN UNIVERSITY. Chapter 2 - Tides. In: THE OPEN UNIVERSITY (Ed.). **Waves, Tides and Shallow-Water Processes**. Butterworth-Heinemann, 1999. p. 50-86. ISBN 9780080363721. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080363721500039>>. Acesso em: 23 dez. 2023.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. ed. rev. e aum. Berlim: Walter de Gruyter, 2001. 432 p. ISBN 3-11-017072-8.

UNITED NATIONS - GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT (UN-GGIM). Global Geodetic Reference Frame Working Group. **Newsletter 5**. 2015. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1NWVJKtcLpGhn9bLN88oCB-0IcxTjHuX-/view>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2015.