

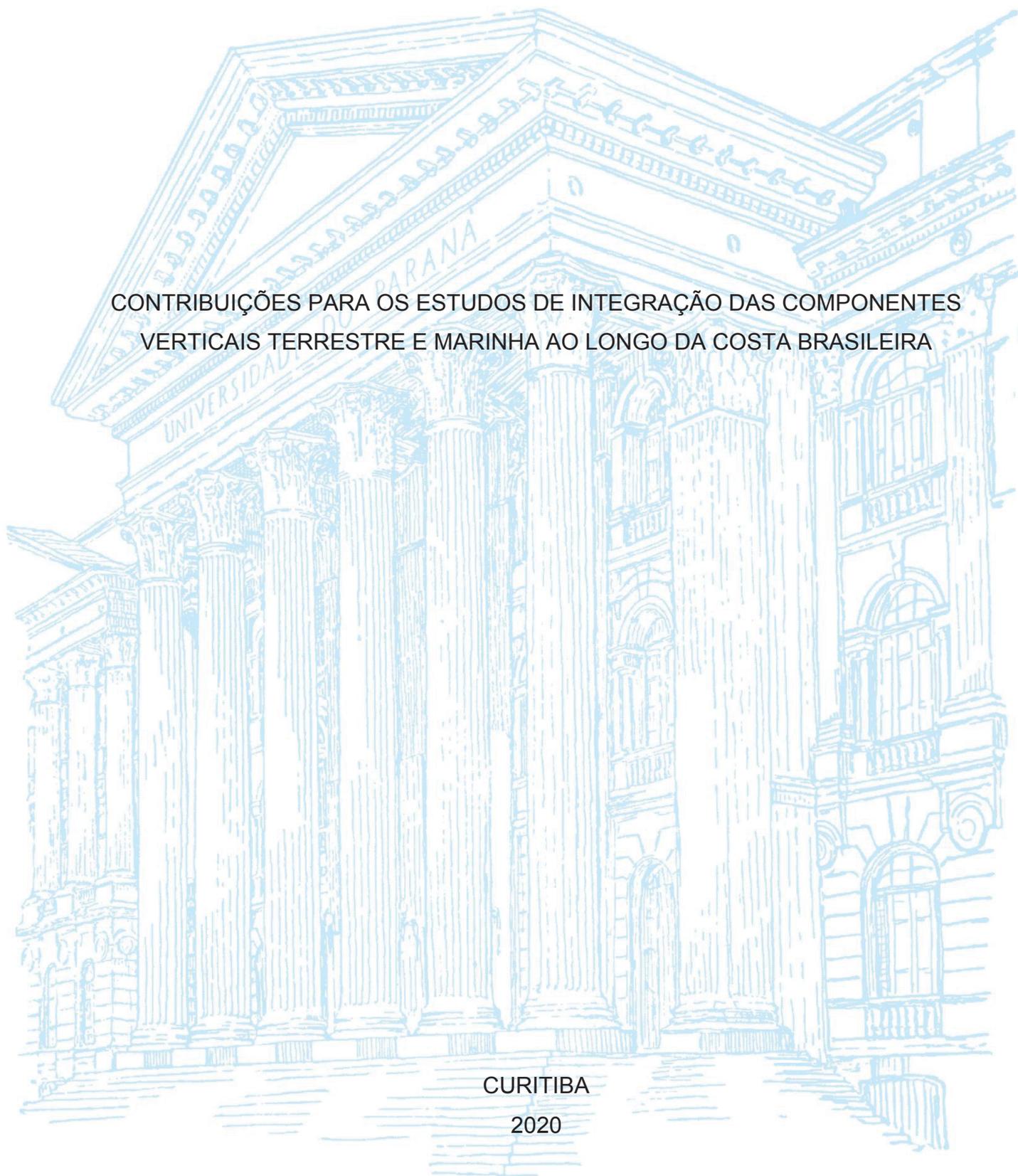
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TULIO ALVES SANTANA

CONTRIBUIÇÕES PARA OS ESTUDOS DE INTEGRAÇÃO DAS COMPONENTES  
VERTICAIS TERRESTRE E MARINHA AO LONGO DA COSTA BRASILEIRA

CURITIBA

2020



TULIO ALVES SANTANA

CONTRIBUIÇÕES PARA OS ESTUDOS DE INTEGRAÇÃO DAS COMPONENTES  
VERTICAIS TERRESTRE E MARINHA AO LONGO DA COSTA BRASILEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Profa. Dra. Regiane Dalazoana

CURITIBA

2020

**Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia**

S232c

Santana, Tulio Alves

Contribuições para os estudos de integração das componentes verticais terrestre e marinha ao longo da costa brasileira [recurso eletrônico] /Tulio Alves Santana. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2020.

Orientadora: Regiane Dalazoana.

1. Hidrografia. 2. Geodésia. 3. Geodesia marinha. 4. Redes (Geodésia).I. Universidade Federal do Paraná. II. Dalazoana, Regiane. III. Título.

CDD: 526.1

**Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928**

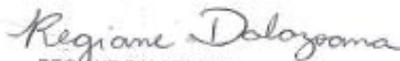


MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS  
GEODÉSICAS - 40001016002P6

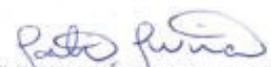
## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **TULIO ALVES SANTANA** intitulada: **CONTRIBUIÇÕES PARA OS ESTUDOS DE INTEGRAÇÃO DAS COMPONENTES VERTICAIS TERRESTRE E MARINHA AO LONGO DA COSTA BRASILEIRA**, sob orientação da Profa. Dra. REGIANE DALAZOANA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 17 de Fevereiro de 2020.

  
REGIANE DALAZOANA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

  
GABRIEL DO NASCIMENTO GUIMARÃES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA)

  
CLAUDIA PEREIRA KRUEGER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico esta dissertação à minha família, especialmente aos meus pais Solange e Waldivino e a minha irmã Tamires.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me fortalecido até aqui e por cada milagre em minha vida.

Aos meus pais, meus irmãos, meu cunhado e minha avó. Por terem sido meus alicerces nesta jornada. Sem eles seria impossível.

À toda minha família, pela torcida, pelas orações, pelas conversas e pelo apoio.

À minha orientadora, professora Regiane Dalazoana, por ter acreditado que eu conseguiria realizar este estudo e por não medir esforços para corrigir e sugerir melhorias.

Aos professores Cláudia Krueger e Gabriel Guimarães pelas contribuições ao estudo durante a banca de qualificação do projeto de pesquisa e a defesa da dissertação.

Aos meus colegas de trabalho da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo por compreender as minhas ausências, pela amizade e pelo companheirismo.

Aos alunos e amigos da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo por sempre me apoiar, ouvir as minhas dificuldades e por ser ótimos amigos em Monte Carmelo-MG.

Aos meus amigos da Biblioteca da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, o Alexandre, a Eliete, a Lú, a Andreia, a Renata e a Michelly por sempre me ouvir nos momentos mais difíceis do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os alunos do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) pela companhia no período que morei em Curitiba-PR e por terem sido suporte depois de minha mudança.

À Mônica, pelo trabalho excelente e pela amizade que construímos neste período de pós-graduação.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas pelos ensinamentos durante o período de disciplinas.

Aos alunos, que se tornaram amigos, da turma de Métodos Geodésicos do curso de graduação de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da UFPR, turma onde realizei minha prática docente.

À minha amiga Niédja por ser minha alma gêmea em Curitiba-PR, ao amigo militar Ruy por ser um irmão que a vida me presenteou, a amiga Laís pelos abraços e companheirismo, ao amigo Léo por todos os ensinamentos e aos amigos Samir e Marciano por serem os melhores anfitriões e companheiros.

Aos queridos amigos do PPGCG: Ilich, Elias, Samoel, Livia, Andreia, Everton, Fabrício, Daniel, Rubens, Idalécio, Sérgio, Jorge, Fabiano, Leandro, William, Kauê, Carla, Mário, Luís Antônio, Edu, Alan, Darlan, Felipe e Carol pelo carinho e atenção de sempre.

Aos servidores e amigos, Day e Edson, que contribuíram comigo sendo companheiros e acolhedores.

Aos meus amigos a distância, Vinícius e Franciny, por sempre serem suporte e auxiliares em momentos cruciais para mim.

À professora Luciene, então coordenadora do PPGCG, pela amizade, pelo serviço prestado, pela cordialidade e atenção ao esclarecer dúvidas. E também a atual coordenadora, a professora Silvana, pelo trabalho desenvolvido.

Ao servidor Everton do IBGE pela atenção, cordialidade e presteza em virtude da solicitação de dados geodésicos realizada para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos da Igreja Batista Filadélfia: Rejane, William, Thuane, Thaíssa, Juan, Léo, Maria, Bia e Beto.

Aos capixabas que tanto amo: Rhay, Marcelli, Elton, Wesley, tio Zé e tia Penha. O carinho de vocês me fortaleceu.

Ao psicólogo Odilon que me atendeu semanalmente durante todo o período de desenvolvimento dessa pesquisa. Nossas sessões fizeram a diferença para conseguir dar andamento ao mestrado.

Aos membros do grupo do Facebook “Bolsistas CAPES” pelas mensagens de apoio, depoimentos que me encorajaram e pela troca de informações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela concessão de bolsa de estudo no período de um ano. Sem a bolsa de estudos a concretização deste trabalho se tornaria impossível.

“Eu sonho com uma sociedade reinventando-se de baixo pra cima, em que as massas populares tenham, na verdade, o direito de ter voz e não o dever apenas de escutar. Esse é um sonho que acho possível, mas que demanda o esforço fantástico de criá-lo. Quer dizer: para isso, é preciso que a gente anteontem já tivesse descruzado os braços para reinventar essa sociedade.”

Paulo Freire.

## RESUMO

No Brasil, os Níveis de Redução (NREDs) das Estações Maregráficas (EMs) são utilizados como os *Data* verticais oceânicos ou *Chart Datum* (CD) que são referências para as cartas náuticas confeccionadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Os níveis são estabelecidos ao longo da costa brasileira e foram, e ainda são, baseados em observações maregráficas. Para cada uma das EMs há um NRED associado que foi determinado em diferentes épocas e a extensão do período de observação também não foi padronizada para a quantificação dos níveis de cada estação. Em contrapartida ao que é adotado no país, a Organização Hidrográfica Internacional recomenda que a superfície usada como referência para obtenção do *Datum* para reduções de sondagens em regiões costeiras seja definida pela superfície LAT (*Lowest Astronomical Tide*) calculada a partir de pelo menos 18,6 anos de observações maregráficas. A unificação do referencial e a integração da componente vertical é algo que se tem almejado para a costa brasileira por meio de parcerias de diversas instituições e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Adotar uma superfície dada pela LAT solucionaria os problemas apresentados pela adoção dos NREDs como CD: o caráter local; o fato de que algumas profundidades podem ser menores do que as constantes na carta; a questão da determinação de cada NREDs em épocas distintas; a falta de padronização da extensão das séries temporais para quantificação dos NREDs e, sobretudo, a impossibilidade de conexão ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS). Compõe este estudo as EMs das regiões de Fortaleza-CE e Imbituba-SC, regiões que possivelmente abrigarão futuras estações da Rede de Referência Altimétrica Internacional. Como uma contribuição, o desenvolvimento deste trabalho contém a realização de inventários de dados geodésicos nas regiões de estudo, a discussão dos impactos acerca da adoção de referencial vertical oceânico unificado, a investigação da adequação de modelos globais oceânicos a observações locais e também atualização e complementação dos Níveis de Referências (NREFs) nas EMs de Fortaleza e Imbituba que são vinculadas a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPPG). Os resultados encontrados com as análises relativas mostraram alta correlação na região de Fortaleza na investigação da adequação de observações locais e observações baseadas em modelos. Os NREFs locais foram conectados ao referencial global por meio da vinculação ao elipsoide GRS80, assim foram feitas análises absolutas nas regiões estudadas. Os diferentes modelos da Superfície Média do Mar apresentaram diferenças entre 16,7 a 13,1 cm com relação ao NMM local definido pela DHN na EM de Fortaleza e 2,3 a 8,3 cm para EM de Imbituba. A partir de cinco diferentes NMM definidos e quatro MGGs foram estimados valores de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) para as duas EMs estudadas. Para a EM de Fortaleza o valor médio encontrado da TNMM foi de 77,2 cm com precisão de 7,3 cm e para a EM de Imbituba, 51,9 cm com precisão de 4,0 cm. O modelo de LAT analisado se encontra 15,6 cm e 6 mm acima dos NREDs em Fortaleza e Imbituba, respectivamente. O que, em princípio, indica possíveis inconsistências no modelo global da LAT, em comparação com observações locais, ocasionadas provavelmente pela dificuldade de modelagem em áreas costeiras.

Palavras-chave: Níveis de Redução. *Chart Datum*. Unificação do referencial vertical oceânico. *Lowest Astronomical Tide*. Rede de Referência Altimétrica Internacional.

## ABSTRACT

In Brazil, the Reduction Levels (RLs) of Tide Gauge (TG) are used as Ocean Vertical Data or Chart Datum (CD) which are references to nautical charts made by the Hydrography and Navigation Board of the Brazilian Navy (DHN- Diretoria de Hidrografia Naval in Portuguese). The levels are established along the Brazilian coast and were, and still are, based on tide gauge observations. For each of the TG there is an associated RL that was determined at different times and the length of the observation period was not standardized to quantify the levels of each station. In contrast to that was adopted in Brazil, the International Hydrographic Organization recommends that the Datum reference surface for survey reductions in coastal regions may be defined by the LAT (Lowest Astronomical Tide) calculated from at least 18.6 years of tide gauge observations. The unification of the datum and the vertical component integration has been aimed for the Brazilian coast through partnerships between several institutions and the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística in Portuguese). Adopting a surface given by the LAT would solve the problems presented by adopting the RLs as CD, such as: the local coverage; the fact that some depths may be smaller than those presented in the chart; the question of determining each RL at different times; the lack of standardization about the time series extension to quantify the RL; and, above all, the impossibility of the connection to the Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas in Portuguese). This study is composed of the TG from Fortaleza-CE and Imbituba-SC, regions that will probably be future stations of the International Height Reference Frame. As a contribution, the development of this work includes the realization of geodetic data inventories in the study regions, the discussion of the impacts with the adoption of a unified oceanic vertical reference, the investigation about the adequacy of oceanic global models to local observations and also the updating and complementation of the reference levels at Fortaleza and Imbituba TGs that are linked to the Permanent Tide Gauge Frame for Geodesy (RMPG – Rede Maregráfica Permanente para Geodésia in Portuguese). The results that were founded shows a high correlation in the Fortaleza region between the local observations and the model-based observations, for a relative analyze. The local reference levels were connected to the global reference by linking to the GRS80 ellipsoid and through an absolute analyze, that were made in the studied regions. The different models of Mean Sea Surface (MSS) presented differences between 16.7 to 13.1 cm when compared to the local Mean Sea Level (MSL) defined by the DHN in Fortaleza TG and 2.3 to 8.3 cm for Imbituba TG. From five different local defined MSL and four Global Geopotential Model, Sea Surface Topography (SST) values were estimated for the two TGs studied. For the TG of Fortaleza, the average value found for SST was 77.2 cm with a precision of 7.3 cm and for Imbituba TG, 51.9 cm with a precision of 4.0 cm. The LAT model analyzed is 15.6 cm and 6 mm above the RLs in Fortaleza and Imbituba. Which, in principle, indicates possible inconsistencies in the global LAT model, compared to local observations, probably caused by the difficulty of modeling in coastal areas.

Keywords: Reduction Levels. Chart Datum. Unification of the oceanic vertical reference. Lowest Astronomical Tide. International Height Reference Frame.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE BAIXA-MARES E PREAMARES.....	32
FIGURA 2 – SUPERFÍCIES DE REFERÊNCIA DE MARÉS .....	34
FIGURA 3 – DISCREPÂNCIAS ENTRE OS <i>DATA</i> VERTICAIS DA AMÉRICA DO SUL E O VALOR CONVENCIONADO DE $W_0$ PELA IAG EM 2015 ..	37
FIGURA 4 – CONCEITO CLÁSSICO (A) E ATUAL (B) PARA DEFINIÇÃO DO DATUM VERTICAL.....	38
FIGURA 5 – DESCRIÇÃO E DIAGRAMA DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE PORTO DO AÇU, SÃO JOSÉ DA BARRA, RIO DE JANEIRO .....	42
FIGURA 6 – REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA .....	46
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO COM OS PRINCIPAIS ELEMENTOS ENVOLVIDOS EM SISTEMAS DE ALTITUDES NAS REGIÕES COSTEIRAS .....	47
FIGURA 8 – MODELO DA SUPERFÍCIE LAT COM RELAÇÃO AO NMM EM METROS.....	48
FIGURA 9 – MODELO DA SUPERFÍCIE LAT REFERIDA AO ELIPSOIDE GRS80 EM METROS .....	51
FIGURA 10 – REFERÊNCIA VERTICAL DCSM.....	52
FIGURA 11 – RECOMENDAÇÕES DE MGGs PARA REGIÕES DO BRASIL .....	58
FIGURA 12 – ALTIMETRIA POR SATÉLITE .....	61
FIGURA 13 – MSS_CNES_CLS15 .....	65
FIGURA 14 – DTU_15_MSS.....	66
FIGURA 15 – RECORTE DO DTU_15_LAT PARA A REGIÃO DA EUROPA .....	67
FIGURA 16 – MAPA DAS ÁREAS DE ESTUDO COM DIMENSÃO DE 5°X5° CONTADOS A PARTIR DAS EMs.....	68
FIGURA 17 – CONJUNTO DE ESTAÇÕES DO CGEM NA REGIÃO DA ÁREA DE ESTUDO 1 .....	74
FIGURA 18 – CONJUNTO DE ESTAÇÕES DO CGEM NA REGIÃO DA ÁREA DE ESTUDO 2 .....	75
FIGURA 19 – <i>GRIDDED DATA EXTRACTION TOOL</i> .....	79

FIGURA 20 – MAPA DA MSS CNES/CLS PARA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA.....	80
FIGURA 21 – MAPA DA MSS CNES/CLS PARA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA .....	80
FIGURA 22 – MAPA DA MSS DTU 15 PARA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA	82
FIGURA 23 – MAPA DA MSS DTU 15 PARA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA ...	82
FIGURA 24 – MAPA DA MSS DTU 18 PARA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA	83
FIGURA 25 – MAPA DA MSS DTU 18 PARA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA ...	83
FIGURA 26 – MAPA DA SUPERFÍCIE LAT (DTU_15_LAT).....	84
FIGURA 27 – SÍNTESE DAS PRINCIPAIS SUPERFÍCIES E NÍVEIS DE REFERÊNCIA .....	86
FIGURA 28 – ESTRATÉGIA DE AÇÃO PARA ANÁLISE RELATIVA.....	90
FIGURA 29 – ESTRATÉGIA DE AÇÃO PARA ANÁLISE ABSOLUTA .....	90
FIGURA 30 – ESQUEMÁTICO DO CGEM NA REGIÃO DA EM DE FORTALEZA ..	91
FIGURA 31 – ESQUEMÁTICO DO CGEM NA REGIÃO DA EM DE IMBITUBA .....	92
FIGURA 32 – VÍNCULOS ENTRE OS NÍVEIS DE REFERÊNCIA GEODÉSICOS IMPLÍCITOS NA INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES E MODELOS GEODÉSICOS .....	94
FIGURA 33 – ESTIMATIVA GEOMÉTRICA DA TNMM NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA.....	95
FIGURA 34 – DADOS DISPONÍVEIS DA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA....	100
FIGURA 35 – DADOS DISPONÍVEIS DA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA.....	101
FIGURA 36 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA ANTECEDENTES ESTABELECIDOS PARA A REGIÃO DE IMBITUBA .....	118
FIGURA 37 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA REFERIDOS AO GRS80/SIRGAS2000 PARA A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA RMPG EM FORTALEZA.	119
FIGURA 38 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA REFERIDOS AO GRS80/SIRGAS2000 PARA A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA RMPG EM IMBITUBA.....	119

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – ÉPOCA DE DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DISPONIBILIZADAS PELO CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA.....	43
GRÁFICO 2 – PERÍODO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DE MARÉS DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DO CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA.....	43
GRÁFICO 3 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU_15_MSS .....	103
GRÁFICO 4 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU_18_MSS .....	103
GRÁFICO 5 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO MSS_CNES_CLS15 .....	104
GRÁFICO 6 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO MSS_CNES_CLS15 SEM A ESTAÇÃO 30112 .....	105
GRÁFICO 7 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 2 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU_15_MSS .....	107
GRÁFICO 8 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 2 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU_18_MSS .....	107

GRÁFICO 9 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 2 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO MSS_CNES_CLS15 .....	108
---	-----

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – APLICAÇÕES DA MODELAGEM DO CAMPO DE GRAVIDADE .....	59
QUADRO 2 – SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MODELOS.	64
QUADRO 3 – SÉRIES DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS DA EM FORTALEZA .....	72
QUADRO 4 – SÉRIES DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS DA EM IMBITUBA	72
QUADRO 5 – RESUMO DOS MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL UTILIZADOS NA PESQUISA.....	78
QUADRO 6 – FONTE DOS DADOS DO BDG DO IBGE E PRINCIPAIS REFERÊNCIAS.....	98
QUADRO 7 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS NA ÁREA DE ESTUDO 1 -FORTALEZA.....	102
QUADRO 8 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS NA ÁREA DE ESTUDO 2 – IMBITUBA .....	106

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MGG COM MELHORES RESULTADOS PARA O BRASIL NA AVALIAÇÃO GNSS/NIVELAMENTO .....	57
TABELA 2 – INVENTÁRIO DOS DADOS GEODÉSICOS NA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA.....	70
TABELA 3 – INVENTÁRIO DOS DADOS GEODÉSICOS NA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA .....	71
TABELA 4 – PARÂMETROS ELIPSOIDAIIS .....	88
TABELA 5 – DESCRIÇÃO DOS DESNÍVEIS, ALTITUDES E DISTÂNCIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DO CGEM COM RELAÇÃO A RN PRIMÁRIA 4336A - FORTALEZA .....	109
TABELA 6 – DESCRIÇÃO DOS DESNÍVEIS, ALTITUDES E DISTÂNCIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DO CGEM COM RELAÇÃO A RN PRIMÁRIA 3012X - IMBITUBA .....	109
TABELA 7 – DIFERENTES SOLUÇÕES PARA O VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL DA RN4336A E A CORRELAÇÃO DOS VALORES COM A ALTITUDE GEOIDAL .....	110
TABELA 8 – DIFERENTES SOLUÇÕES PARA O VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL DA RN3012X E A CORRELAÇÃO DOS VALORES COM A ALTITUDE GEOIDAL .....	110
TABELA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ALTITUDES GEOIDAIIS OBTIDAS POR OBSERVAÇÕES LOCAIS E PROVENIENTES DO MGG XGM2019 PARA A ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA.....	111
TABELA 10 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ALTITUDES GEOIDAIIS OBTIDAS POR OBSERVAÇÕES LOCAIS E PROVENIENTES DO MGG XGM2019 PARA A ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA.....	111
TABELA 11 – CÁLCULO DO VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL PARA RN4336A E A RESPECTIVA PRECISÃO .....	112
TABELA 12 – CÁLCULO DO VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL PARA RN3012X E A RESPECTIVA PRECISÃO .....	112
TABELA 13 – NÍVEIS LOCAIS DA DHN REFERIDOS AO ELIPSOIDE GRS80.....	113
TABELA 14 – NMM DE ESTAÇÕES RMPG REFERIDOS AO ELIPSOIDE GRS80 .....	113

TABELA 15 – NÍVEIS GLOBAIS BASEADOS EM MODELOS E DIFERENÇAS COM RELAÇÃO AOS NÍVEIS LOCAIS.....	114
TABELA 16 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA COM MGGs COM RELAÇÃO AO GRS80 .....	115
TABELA 17 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE IMBITUBA COM MGGs COM RELAÇÃO AO GRS80 .....	115
TABELA 18 – ALTITUDES GEOIDAIIS CALCULADAS PARA AS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS .....	116
TABELA 19 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA COM MGGs COM RELAÇÃO AO WGS84 .....	116
TABELA 20 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE IMBITUBA COM MGGs COM RELAÇÃO AO WGS84 .....	116

## LISTA DE SIGLAS

BathyElli	- <i>Bathymetry referred to the Ellipsoid</i>
BDG	- Banco de Dados Geodésicos
BGI	- <i>Bureau Gravimetrique International</i>
BLAST	- <i>Bringing Land and Sea Together</i>
BM	- Baixa-Mares
BNDO	- Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CD	- <i>Chart Datum</i>
CENEGEO	- Centro de Estudos de Geodesia
CGEM	- Controle Geodésico de Estações Maregráficas
CHAMP	- <i>Challenging Mini-satellite Payload</i>
CHM	- Centro de Hidrografia da Marinha
CICVTM	- Componentes Verticais Terrestre e Marítima
CLS	- <i>Collecte Localisation Satellites</i>
CNES	- <i>Centre National d'Études Spatiales</i>
CNSS	- <i>Chinese Navigation Satellite Systems</i>
CONCAR	- Comissão Nacional de Cartografia
DCSM	- <i>Dutch Continental Shelf Model</i>
DGFI	- <i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
DHN	- Diretoria de Hidrografia e Navegação
DTU	- <i>Danmarks Tekniske Universitet</i>
DVB-I	- <i>Datum Vertical Brasileiro de Imbituba</i>
EGM2008	- <i>Earth Gravitational Model 2008</i>
EGM96	- <i>Earth Gravitational Model 1996</i>
EMs	- Estações Maregráficas
EOT	- <i>Empirical Ocean Tide Model</i>
EP	- Estação de Poligonação
ERS1	- <i>European Remote Sensing 1</i>
ERS2	- <i>European Remote Sensing 2</i>
ETRF89	- <i>European Terrestrial Reference Frame 1989</i>
GAGRF	- <i>Global Absolute Gravity Reference Frame</i>
GFO	- <i>GEOSAT Follow-On</i>
GGOS	- <i>Global Geodetic Observing System</i>

GGRF	- <i>Global Geodetic Reference Frame</i>
GIA	- <i>Glacial Isostatic Adjustment</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GOCE	- <i>Gravity Field and steady state Ocean Circulation Explorer</i>
GPS	- <i>Global Position System</i>
GRACE	- <i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GRS80	- <i>Geodetic Reference System 1980</i>
HAT	- <i>Highest Astronomical Tide</i>
HMSS	- <i>Hydrographic Mean Sea Surface</i>
IAG	- <i>International Association of Geodesy</i>
ICGEM	- <i>International Center for Global Gravity Field Models</i>
ICRF	- <i>International Celestial Reference Frame</i>
IDEMS	- <i>International Digital Elevation Model Service</i>
iDOT	- <i>Instantaneous Dynamic Ocean Topography Profiles</i>
IGETS	- <i>International Geodynamics and Earth Tide Service</i>
IGFS	- <i>International Gravity Field Service</i>
IHO	- <i>International Hydrographic Organization</i>
IHRF	- <i>International Height Reference Frame</i>
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISG	- <i>International Service for the Geoid</i>
ITRF	- <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LAT	- <i>Lowest Astronomical Tide</i>
MDT	- <i>Mean Dynamic Topography</i>
MGO	- Modelo Global Oceânico
MGG	- Modelo Global do Geopotencial
MHWN	- <i>Mean High Water Neaps</i>
MHWS	- <i>Mean High Water Springs</i>
MLWN	- <i>Mean Low Water Neaps</i>
MLWS	- <i>Mean Low Water Springs</i>
MTL	- <i>Mean Tide Level</i>
MSL	- <i>Mean Sea Level</i>
MSS	- <i>Mean Sea Surface</i>
NMM	- Nível Médio do Mar
NMMG	- Nível Médio do Mar Global

NRED	- Nível de Redução
NREF	- Nível de Referência
NETCDF	- <i>Network Common Data Form</i>
ONU	- Organização das Nações Unidas
OpenADB	- <i>Open Altimeter Database</i>
OTM	- <i>Ocean Tide Model</i>
PM	- Preamares
PSMSL	- <i>Permanent Service for Mean Sea Level</i>
PVCG	- Problema de Valor de Contorno da Geodésia
RBMC	- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RGRC	- Rede Geodésica de Referência Costeira
RMPG	- Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RMS	- <i>Root Mean Square</i>
RN	- Referência de Nível
RVR	- Redes Verticais de Referência
RVRB	- Rede Vertical de Referência do Brasil
SARAL	- <i>Satellite with ARgos and ALtika</i>
SAT	- Estações de Satélite
SGB	- Sistema Geodésico Brasileiro
SHOM	- <i>Service Hydrographique et Océanographique de la Marine</i>
SIGEO	- Laboratório de SIG e Geoprocessamento
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLA	- <i>Sea Level Anomalies</i>
SSH	- <i>Sea Surface Height</i>
SSTop	- <i>Sea Surface Topography</i>
ST	- Sistema Terra
SWHM	- <i>Shallow Water Hydrodynamic Model</i>
TNMM	- Topografia do Nível Médio do Mar
T/P	- Topex/Poseidon
TPS	- <i>Thin-Plate Spline</i>
TUM	- <i>Technische Universität München</i>
UFU	- Universidade Federal de Uberlândia
UHSLC	- <i>University of Hawaii Sea Level Center</i>
UKHO	- <i>United Kingdom Hydrological Office</i>

USCGS - *US Coastal Geodetic Survey*  
VORF - *Vertical Offshore Reference Frame*  
VT - *Vértices de Triangulação*  
VTEC - *Vertical Total Electron Content*  
ZCBE - *Zonas Costeiras de Baixa Elevação*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	25
1.2 TEMA DA PESQUISA .....	26
1.3 PROBLEMA .....	26
1.4 HIPÓTESES.....	27
1.5 OBJETIVOS .....	27
1.6 JUSTIFICATIVA .....	27
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>31</b>
2.1 REFERENCIAIS VERTICAIS TERRESTRE E OCEÂNICO .....	31
2.1.1 Marés: conceito, elementos e superfícies de referência .....	32
2.1.2 Sistema de Maré Permanente.....	34
2.1.3 Conceito de <i>Datum</i> vertical terrestre: clássico (NMM) e moderno ( $W_0$ ) .....	36
2.1.4 Conceito de <i>Datum</i> vertical oceânico: clássico (NRED) e moderno (LAT).....	40
2.2 INTEGRAÇÃO DOS REFERENCIAIS VERTICAIS EM REGIÃO COSTEIRA ....	45
2.2.1 Vertical Offshore Reference Frame (VORF).....	48
2.2.2 Bathymetry referred to the Ellipsoid (BathyElli) .....	49
2.2.3 Bringing Land and Sea Together (BLAST) .....	51
2.3 MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL .....	53
2.3.1 Possibilidade de modelos existentes.....	54
2.3.2 Indicativos de melhores modelos para o Brasil .....	56
2.3.3 Uso e aplicações dos modelos .....	59
2.4 MODELOS GLOBAIS OCEÂNICOS (MGO) .....	60
2.4.1 Altimetria por satélite .....	60
2.4.2 MGOs disponíveis e produtos derivados.....	62
2.4.3 Modelos da MSS e LAT.....	63
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>68</b>
3.1 ÁREAS DE ESTUDO .....	68
3.1.1 Área de estudo 1: Região da Estação Maregráfica de Fortaleza-CE .....	71
3.1.2 Área de estudo 2: Região da Estação Maregráfica de Imbituba-SC .....	72
3.2 MATERIAL .....	73
3.2.1 Estações Geodésicas.....	73
3.2.2 Modelos Globais do Geopotencial.....	76

3.2.3 Modelos da MSS e LAT.....	78
3.3 MÉTODOS .....	85
3.3.1 Métodos de interpolação .....	86
3.3.2 Sistemas de marés permanentes.....	87
3.3.3 Elipsoides de referência .....	88
3.3.4 Análise da abordagem global e local para definição do referencial oceânico ..	89
3.3.5 Estratégias para estimativa da TNMM.....	95
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>97</b>
4.1 INVENTÁRIO DE DADOS GEODÉSICOS.....	97
4.2 ANÁLISE RELATIVA DA ADEQUAÇÃO DOS MODELOS GLOBAIS OCEÂNICOS AS OBSERVAÇÕES LOCAIS.....	102
4.3 ESTABELECIMENTO DA POSIÇÃO GEOCÊNTRICA DOS NREFS .....	109
4.4 ANÁLISE ABSOLUTA DA ADEQUAÇÃO DOS MODELOS GLOBAIS OCEÂNICOS AS OBSERVAÇÕES LOCAIS.....	114
4.5 ESTIMATIVAS DA TNMM .....	114
4.6 ATUALIZAÇÃO, COMPLEMENTAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS NREFS .....	117
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>120</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	123
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>124</b>
<b>ANEXO 1 – FICHA F-41 DA ESTAÇÃO PORTO DE MUCURIBE (30340).....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXO 2 – FICHA F-41 DA ESTAÇÃO PORTO DE IMBITUBA (60250) .....</b>	<b>140</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo a Geodésia deixou de fornecer referenciais apenas para o mapeamento e mensuração da superfície, e passou a ser também uma Ciência que busca fornecer infraestrutura necessária para o monitoramento de variações e mudanças do planeta Terra. Isto ocorreu especialmente com o avanço tanto das técnicas espaciais de observações, quanto no contexto da Ciência da Computação para o processamento de dados (DREWES, 2006).

Em consonância, Plag et al. (2009) destacam que a definição clássica de Geodésia introduzida por Friedrich Robert Helmert (1843 - 1917) pode ser expandida, em especial pelo desenvolvimento tecnológico que vem permitindo a realização de observações em caráter global e com alta acurácia. Na atualidade, a Geodésia pode ser entendida como uma Ciência que investiga e busca a determinação da geometria, do campo de gravidade e da rotação da Terra, bem como suas constantes fundamentais associadas, além das respectivas evoluções temporais.

O principal avanço científico nesta direção foi proporcionado pela Associação Internacional de Geodésia (IAG - *International Association of Geodesy*) com o estabelecimento do projeto Sistema Geodésico Global de Observação (GGOS - *Global Geodetic Observing System*) aceito pelo comitê executivo da IAG em 2003. O projeto visa a compreensão do Sistema Terra (ST) a partir da quantificação de variações no tempo e no espaço, por meio de observações do comportamento dinâmico do planeta e suas variações ao longo do tempo (GGOS, 2016).

Na mesma vertente, em fevereiro de 2015, em uma assembleia geral da Organização das Nações Unidas (ONU), foi aprovada uma resolução para o estabelecimento de uma Rede Geodésica de Referência Global (GGRF - *Global Geodetic Reference Frame*), a primeira resolução que reconhece a importância das determinações geodésicas em caráter global. O GGRF permite a integração de dados espaciais e a interoperabilidade de redes geodésicas, uma possibilidade de grande importância para o desenvolvimento sustentável, principalmente para o planejamento do uso da terra, construção e avaliação de riscos (UN-GGIM, 2016).

Interoperabilidade, em inglês, *interoperability*, é o termo utilizado em Ciência da Computação para descrever a habilidade de sistemas para agir de forma integrada em redes heterogêneas (SAYÃO; MARCONDES, 2008). Da mesma maneira, esse é o caminho almejado para os referenciais geodésicos em caráter global. O GGRF

pretende interoperar redes geodésicas com diferentes características – a Rede de Referência Terrestre Internacional (ITRF - *International Terrestrial Reference Frame*), a Rede de Referência Celeste Internacional (ICRF - *International Celestial Reference Frame*) e as vindouras redes de altitudes e de gravimetria absoluta: a Rede de Referência Altimétrica Internacional (IHRF - *International Height Reference Frame*) e a Rede de Referência de Gravimetria Absoluta Global (GAGRF - *Global Absolute Gravity Reference Frame*).

A necessidade de monitorar e promover o conhecimento de mudanças se dá devido aos processos dinâmicos que acontecem no planeta, tais como, a redistribuição de massas, a tectônica de placas, os efeitos devido a atração gravitacional, as variações na velocidade de rotação terrestre, os efeitos das marés, entre outros. Além destes, podem ser citados demais fenômenos naturais, reconhecidos também como desastres por proporcionarem, sobretudo, risco direto à vida no planeta, como ocorrência de terremotos, erupções vulcânicas, *tsunamis*, inundações, deslizamentos de terra, furacões, secas e tempestades.

Tais variações e mudanças no planeta em grande parte contemplam as propriedades naturais do ST, isto pela própria dinâmica do sistema. Porém, há evidências crescentes de que muitos fenômenos têm sido impulsionados por ações antrópicas durante os últimos 150 anos. Por exemplo, atividades recentes desenvolvidas pelo homem têm aumentado concentrações de gases de efeito estufa na Terra muito mais do que no último 1 milhão de anos (ESA, 2006).

Embora, ainda não seja amplamente compreendida em um âmbito governamental, a Geodésia é fundamental para a prosperidade econômica, a segurança e a gestão ambiental. Ela sustenta a compreensão que se tem sobre a dinâmica do ST, especialmente porque fornece sistemas de referência que são utilizados para coleta, integração e utilização de dados geoespaciais, além de suportar as atividades de posicionamento para que, por exemplo, usuários - a partir do posicionamento pelos Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*) - tenham a oportunidade de se localizar em tempo real (UN-GGIM, 2018).

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

No que se refere ao monitoramento da dinâmica do planeta, tem sido observada a tendência de elevação do nível do mar, principalmente, baseada na análise da evolução do Nível Médio do Mar Global (NMMG). O NMMG pode ser quantificado por meio de observações maregráficas pontuais a partir de Estações Maregráficas (EMs) espalhadas pelo planeta e com dados de satélites altímetros. De posse dos dados fornecidos pelos satélites altímetros, compreendidos entre os anos de 1993 e 2017, grupos de pesquisas estimaram uma taxa de elevação do NMMG entre 3,28 e 3,44 mm/ano (CLS, 2018).

Assim sendo, motivada pela elevação do NMMG, a investigação do comportamento do nível do mar deve ocorrer, em especial, nas Zonas Costeiras de Baixa Elevação (ZCBE): estas regiões são áreas contíguas ao longo da costa que estão a menos de 10 m do Nível Médio do Mar (NMM) (MCGRANAHAN; BALK; ANDERSON, 2007). Estes mesmos autores indicam que, em extensão, as ZCBE estão em sua grande parte compreendidas até 100 km da costa, com ressalva para regiões com grandes desembocaduras, como é o caso do Rio Amazonas; abrangem 2% da área terrestre do mundo, em contraponto, contém 10% da população mundial e 13% da população urbana mundial.

De acordo com Neumann et al. (2015), 625 milhões de pessoas vivem em áreas costeiras e um crescimento populacional é esperado para os próximos anos. Destarte, observa-se que as variações ao longo do tempo e os eventos extremos podem ocasionar grandes impactos aos sistemas ecológicos e humanos nas regiões costeiras, em essencial, observando a tendência de elevação do nível do mar.

As inundações nas regiões costeiras representam um perigo que ameaça a vida, a dinâmica natural do ecossistema costeiro e as propriedades privadas. Rasmussen et al. (2017), fundamentados em projeções probabilísticas realizadas a partir de observações de 194 EMs, estimaram que áreas onde vivem 60 milhões de pessoas correm o risco de ficar permanentemente submersas até o ano de 2150, isto em um cenário com um aumento de 2°C na temperatura - tendo o período pré-industrial como referência.

Considerando os impactos que poderão ser sentidos pelas comunidades costeiras, que dependem de recursos vindos do mar para alimentação, subsistência e um lugar seguro para viver, é importante traçar estratégias para o monitoramento

nestas regiões. Mormente, porque os objetivos da Geodésia expandiram para uma ciência que busca fornecer referenciais consistentes e com acurácia compatível para a detecção das mudanças do planeta. Levantamentos, inventários e integração de observações geodésicas, tanto da parte terrestre quanto da parte oceânica, funcionam como ferramenta para alcançar os objetivos.

Como uma contribuição, este estudo visa trabalhar com inventários, análises e avaliações de observações geodésicas, Modelos Globais do Geopotencial (MGG) e Modelos Globais Oceânicos (MGO) mais recentes. O estudo compreende as regiões das EMs de Imbituba-SC e Fortaleza-CE, Brasil. Estas são as únicas regiões, das que foram selecionadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para abrigarem estações IHRF, que contemplam área costeira (LUZ et al., 2017). No mais, foram estabelecidos os relacionamentos das diferentes superfícies e planos de referência a um nível local e global entre os elementos geodésicos envolvidos em ambiente costeiro.

## 1.2 TEMA DA PESQUISA

Compatibilização e integração de referenciais verticais em áreas costeiras.

## 1.3 PROBLEMA

A existência de distintas bases de dados, diversas fontes, resoluções espaciais e referenciais não compatíveis, é um problema para o estabelecimento dos Níveis de Referência (NREFs) ao nível local e global (DA SILVA, 2017). Este é um dos principais desafios para que a Geodésia cumpra seus objetivos. Sendo assim, tem se almejado a compatibilização dos referenciais de forma a possibilitar o uso integrado dos dados.

Isto posto, levante-se a dificuldade de estabelecer e/ou atualizar os NREFs para comparação e integração de observações locais e globais nas regiões das EMs de Imbituba-SC e Fortaleza-CE utilizando distintas estratégias a partir de MGGs e MGOs, principalmente levando em consideração as possibilidades de modelos com metodologias de processamento mais atuais como, por exemplo, alguns MGGs com ponderação de dados e com modelagem da topografia residual do terreno, além de MGOs com resolução temporal maior que 18,6 anos.

## 1.4 HIPÓTESES

**Se** for possível a aplicação dos MGGs e MGOs disponibilizados por diferentes instituições, com diferentes estratégias e combinações para obter os NREFs em região costeira, **Então** as discrepâncias entre as superfícies de referência seriam estabelecidas de forma mais precisa, tendo em vista que ao longo do tempo houve melhorias na computação, na disponibilidade de dados e nas estratégias de cálculo dos modelos.

## 1.5 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi contribuir para os estudos de integração das componentes verticais terrestre e marinha ao longo da costa brasileira, com áreas de estudo compreendidas nas regiões das EMs de Imbituba-SC e Fortaleza-CE. São propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar inventário de dados nas regiões costeiras sob estudo.
- b) Discutir e dimensionar os impactos acerca da adoção de referencial vertical oceânico unificado.
- c) Investigar a adequação dos mais recentes MGO às observações locais em regiões costeiras do Brasil.
- d) Estimar a Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) baseada em NREFs locais, MGG e em MGO.
- e) Atualizar, complementar e adequar os NREFs na região das EMs baseado em MGG e MGO.

## 1.6 JUSTIFICATIVA

Estudos em regiões costeiras e com os objetivos de investigar e monitorar comportamentos nestas regiões vão de encontro com os objetivos da Geodésia e com as temáticas do GGOS. Este, atualmente, concentra-se em quatro áreas de atuação: Unificação do sistema de altitudes (Tema 1); Monitoramento de riscos geológicos

(Tema 2); Mudanças do nível do mar, variabilidade espacial e previsão climática (Tema 3); e Pesquisa geodésica sobre o clima espacial (Tema 4) (GGOS, 2016).

Destaque deve ser dado para a busca pela unificação dos referenciais verticais para observações geodésicas, sendo que neste estudo se enfatiza a integração de referenciais verticais na região costeira. Além disso, o estudo do comportamento dinâmico dos oceanos, com o principal objetivo de monitorar variações, análises de riscos e talvez, proporcionar conhecimento necessário para implantação de políticas de preservação em áreas costeiras. Por certo, o estudo realizado compreende duas das quatro temáticas do GGOS.

Em um contexto nacional, o estudo aqui proposto conforma-se com a iniciativa da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) através do Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima (CICVTM) que almeja a sistematização de uma metodologia para integração de referenciais verticais em região costeira objetivando uma correta avaliação de riscos de inundação em decorrência de mudanças climáticas (CONCAR, 2018). O que corrobora com a recomendação da Organização Hidrográfica Internacional (IHO - *International Hydrographic Organization*) que recomenda que o referencial vertical oceânico deva ser sempre conectado ao *Datum* de referência para obtenções de altitudes na parte terrestre (IHO, 2008).

De maneira prática, as componentes verticais terrestre e marinha são utilizadas amplamente como insumos para levantamentos geodésicos ou hidrográficos realizados pela comunidade usuária de dados espaciais. A primeira delas, faz parte do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) de responsabilidade do IBGE e é suporte para levantamentos altimétricos em projetos de redes geodésicas cadastrais municipais, projetos de obras civis, rodoviárias e hidráulicas, além de outros. Por outro lado, a componente vertical marinha, de responsabilidade da Marinha do Brasil, é utilizada como referência em levantamentos batimétricos ou sondagens a fim de confeccionar cartas náuticas que permitem o monitoramento do fundo oceânico em regiões com tráfego marítimo (principalmente região portuária). A integração das duas componentes possibilita um melhor gerenciamento costeiro e a comunicação entre as cartas topográficas e náuticas.

Neste caminho, um projeto piloto tem sido desenvolvido no litoral do Rio de Janeiro, entre os municípios de Macaé e Mangaratiba. Conduzido pelo IBGE, o projeto busca estabelecer uma Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) que tem sido

constituída com a elaboração e construção de marcos geodésicos robustos, realização de nivelamento geométrico em circuitos da rede, implantação de uma malha gravimétrica densa, instalações de estações GNSS ativas e de EMs na região. O monitoramento contínuo da crosta e do nível do mar são alguns dos objetivos almejados com o estabelecimento desta infraestrutura geodésica, além da integração dos referenciais em regiões de costa (SOARES; SANTOS; LUZ, 2018).

Bosch (2016a), apresenta indicativos para que o Brasil siga as mesmas diretrizes do projeto *Bringing Land and Sea Together* (BLAST), que tinha como objetivo a unificação dos referenciais verticais das cartas náuticas e a conexão com o sistema de altitudes na região do Mar do Norte na Europa. Isso implica em trabalhar na determinação robusta de modelos hidrodinâmicos e de modelos geoidais de alta acurácia. O que neste momento já é visto com uma dificuldade pelo custo para levantamentos de dados oceânicos e cálculo de modelos hidrodinâmicos, além da escassez de dados gravimétricos na costa brasileira. Não obstante, ainda é importante destacar que a dimensão continental do país configura uma complexidade para que os objetivos de um projeto como este sejam alcançados.

Isto posto, a manipulação de MGGs e a análise dos MGOs é de fundamental valia para as etapas do projeto de integração da componente vertical na costa brasileira. Além disso, na região costeira há muitos elementos envolvidos, ou seja, superfícies de referência distintas. Estabelecer as discrepâncias entre as superfícies de referência e a sua relação com uma superfície equipotencial global também se apresenta como uma contribuição para o projeto. Além de que havia uma pretensão de que os resultados deste estudo proporcionassem uma estimativa do impacto da adoção de um referencial unificado e global para cartas náuticas baseado nas análises de um modelo global de Menor Maré Astronômica (LAT - *Lowest Astronomical Tide*).

Ao se tratar deste assunto, é importante recordar que na região do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba (DVB-I) um estudo precursor foi desenvolvido por Cordini (1998), o autor, baseado em seis meses de observações de marés gravimétricas e observações contínuas do Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*) avaliou a interação de efeitos físicos e geodinâmicos sobre o DVB-I, além de alguns pontos da rede de altitudes. Na época, com base na análise dos dados foi proposta uma metodologia para o reestabelecimento do *Datum* vertical.

Na sequência, Dalazoana (2006) mediante uma extensa análise, recuperação de dados históricos de observações maregráficas e observações de nivelamento de

diferentes anos conseguiu viabilizar a integração de diferentes sensores de observações do nível do mar no DVB-I. Assim, foi possível a determinação dos NREFs zero das réguas. Fora isso, a autora estabeleceu as discrepâncias destas referências com relação à estação IMBI da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e com relação a uma referência global equipotencial dada pelo *Earth Gravitational Model* 1996 (EGM96).

Não obstante, Ferreira (2008) realizou uma estimativa da TNMM no DVB-I, a partir da diferença entre geoide e o NMM na região. O estudo se deu com base no ajuste da superfície média do sistema Lagunar de Imuraí-SC ao modelo EGM96. Dando continuidade, Palmeiro (2011) também estimou a TNMM e atualizou os NREFs para a região do *Datum* Vertical Brasileiro em níveis local e global, para o caso global foi feita a relação ao *Earth Gravitational Model* 2008 (EGM2008). Todos estes estudos foram de fundamental importância para a Análise da Evolução Temporal do DVB-I realizada por Da Silva (2017).

Destarte, os avanços em termos de metodologias para o cálculo de MGGs e MGOs, a possibilidade de mais informações terrestres e maiores séries temporais para a composição dos MGO levam a acreditar que novas estimativas da TNMM poderiam ser obtidas com melhor qualidade, e agora não apenas para a região do DVB-I, mas também para a região da EM de Fortaleza-CE. A aquisição de NREFs mais precisos e as análises dos modelos disponíveis são sem dúvidas contribuições importantes para o projeto de integração das componentes verticais na costa brasileira.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

É bem sabido que nos últimos anos se expandiram as possibilidades de técnicas de observações para mensuração, isto devido a evolução tecnológica, a alternativa apresentada pelas missões espaciais e o uso de ondas eletromagnéticas como uma possibilidade para instrumentos de medidas. Este conjunto trouxe às observações maior confiabilidade e muitas vezes uma possibilidade de observações não apenas locais, mas também em caráter global.

Na mesma direção, observações contínuas ao longo do tempo é um novo conceito acrescentado às observações geodésicas, principalmente devido aos novos rumos tomados pela ciência. Esse tipo de observação possibilita a detecção de fenômenos dinâmicos do planeta, tais como: movimentos verticais de subsidência e soerguimento (GUIMARÃES et al., 2012), movimentos horizontais devido a cinemática da superfície terrestre (DREWES; SANCHÉZ, 2017), variações na velocidade de rotação da Terra (IERS, 2019), mudanças no NMM (MONTECINO et al., 2017) e a modelagem do campo de gravidade (ICGEM, 2019a).

A partir da junção de técnicas de observações sobre a superfície terrestre e externas a ela, ou seja, técnicas terrestres e as baseadas em satélites artificiais, torna-se possível o estabelecimento de referenciais geodésicos que condicionam o monitoramento contínuo de todo ST (ALTAMIMI et al., 2016, GONTIER et al., 2002, SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017). Em suma, se propõe a este capítulo de revisão da literatura abordar os eixos principais desta pesquisa, fundamentando os aspectos clássicos e atuais e explanando as principais referências norteadoras para o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 REFERENCIAIS VERTICAIS TERRESTRE E OCEÂNICO

Em linhas gerais, tanto na parte terrestre quanto na parte oceânica, o conhecimento do comportamento dinâmico do nível do mar é essencial para a materialização do referencial vertical. Diante disso, é importante a caracterização dos conceitos envolvidos em cada ramo de estudo, além de apresentar as especificações clássicas e as mais aceitas na atualidade. Antes disso, tendo em vista a importância

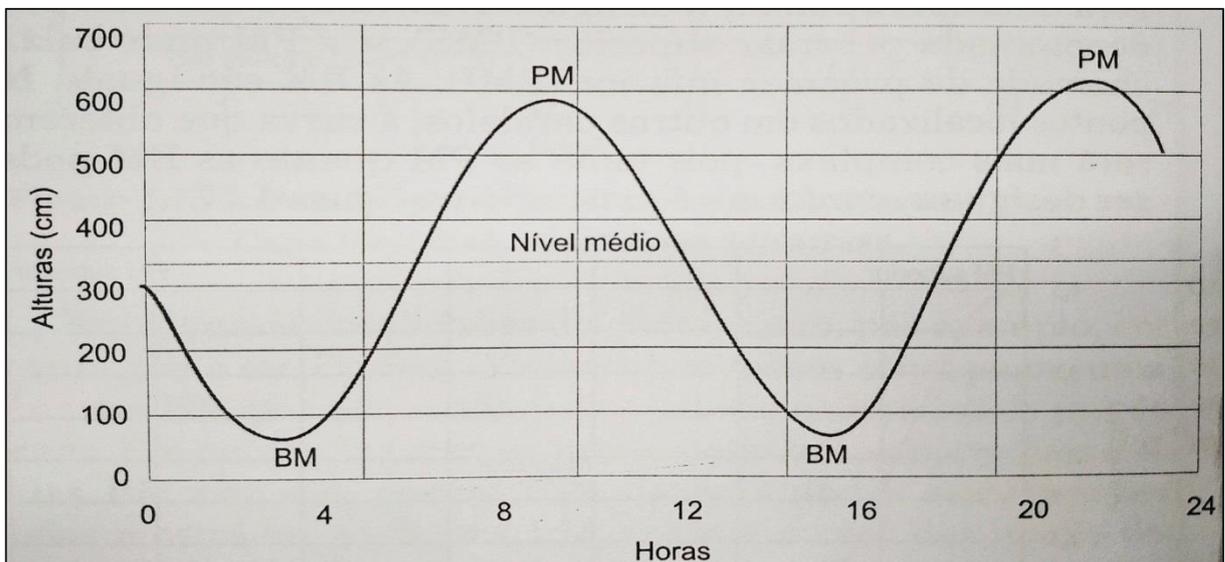
do comportamento dinâmico, uma breve explanação sobre marés também é apresentada nesta seção.

### 2.1.1 Marés: conceito, elementos e superfícies de referência

A superfície física da Terra não se apresenta de maneira estacionária, e isso ocorre porque a interação gravitacional entre a Terra, Lua e Sol resulta em esforços diferenciais significativos que produzem deformações em cada uma das partes do corpo planetário (DE FREITAS, 1993). Este efeito provoca o fenômeno de marés, que no caso oceânico induz uma oscilação vertical na superfície do mar ou em qualquer outra grande massa d'água na superfície da Terra (NOAA, 2017). No caso da Terra sólida, o fenômeno das marés acarreta em deformações da superfície, alterações no módulo e direção do vetor gravidade e alterações no geopotencial.

Considerando o fenômeno das marés oceânicas, para seu estudo e modelagem é importante caracterizar alguns elementos de seu comportamento. Desta forma, sendo a maré definida como a variação periódica do nível do mar sob a influência de forças astronômicas, uma vez observados e expressos em um gráfico, valores do nível do mar, será notado que a cada 24h ocorrem dois máximos e dois mínimos que são as chamadas marés semidiurnas (FIGURA 1). Os máximos são denominados Preamares (PM) e os mínimos Baixa-Mares (BM). Também há caso em que as marés possuem apenas um máximo e um mínimo a cada 24h, estas são as ditas marés diurnas (FRANCO, 2009).

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE BAIXA-MARES E PREAMARES



FONTE: FRANCO (2009).

A curva traçada a partir de observações do nível do mar é chamada de maregrama, ela apresenta máximos, aproximadamente a cada 12h25min, este período corresponde à metade de um dia médio lunar. Os mínimos por sua vez sucedem os máximos com intervalo de 6h12min (FRANCO, 2009). Ainda observando a FIGURA 1, denominando de  $h$  a altura da maré, e dado os conceitos apresentados acima, é possível definir alguns destes elementos (MIGUENS, 1996):

- Preamar (PM): Maior altura que alcançam as águas em uma oscilação.
- Baixa-Mar (BM): Menor altura que alcançam as águas em uma oscilação.
- Amplitude da Maré: Distância vertical entre uma PM e uma BM consecutivas, formulando a amplitude seria dada por  $h_{PM} - h_{BM}$ .
- Nível Médio de Maré (NM) ou *Mean Tide Level* (MTL): Média da oscilação da maré. Para um determinado instante pode ser formulado como  $h_{NM} = (h_{PM} + h_{BM})/2$ .

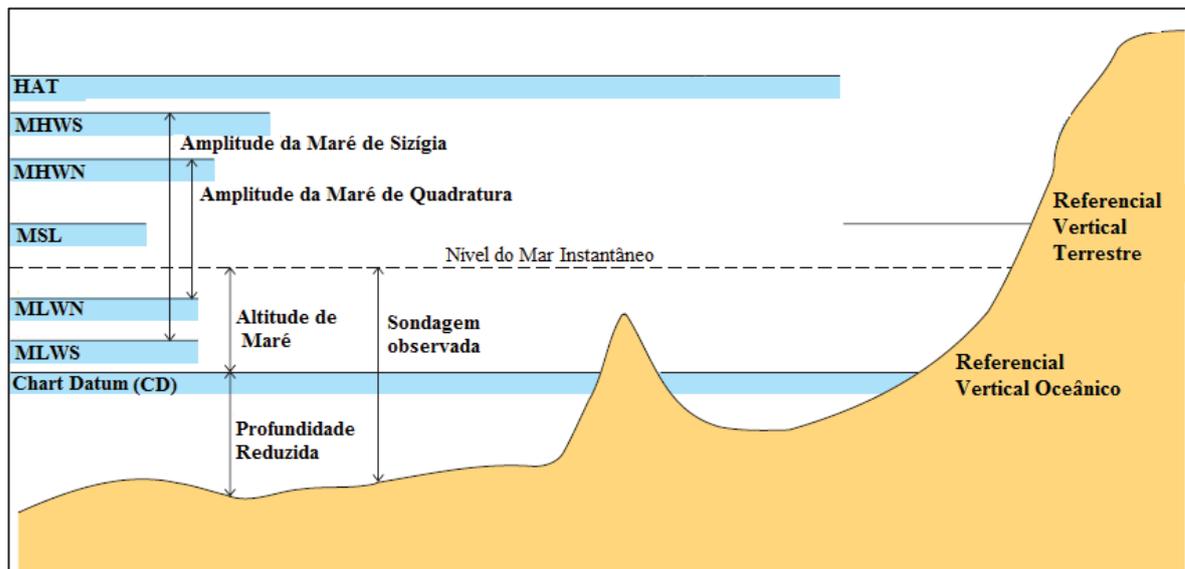
Outros conceitos importantes são os intervalos de lunação, as marés de sizígia e de quadratura. Os intervalos de lunação representam o tempo entre duas conjunções ou oposições da Lua (29,530588 dias) (MIGUENS, 1996). Em sequência, as marés semidiurnas de maior amplitude em uma semilunação (aproximadamente 15 dias) são definidas como marés de sizígia (ou marés de águas vivas), e aquelas de menor amplitude denominam-se marés de quadratura (ou marés de águas mortas) (FRANCO, 2009).

Objetivando a análise do comportamento das marés para estabelecimento de referenciais, é necessário o entendimento dos planos ou superfícies de referência de marés associados às definições de referenciais (FIGURA 2). Estes no geral são deduzidos de longas séries de observações maregráficas, tem-se então:

- HAT (*Highest Astronomical Tide*): Maior Maré Astronômica ou cota máxima.
- MHWS (*Mean High Water Springs*): Média das PM das marés de sizígia.
- MHWN (*Mean High Water Neaps*): Média das PM das marés de quadratura.

- MSL (*Mean Sea Level*) ou NMM (Nível Médio do Mar): Média do nível do mar ou média das PM e BM de sizígia e quadratura.
- MLWN (*Mean Low Water Neaps*): Média das BM de quadratura.
- MLWS (*Mean Low Water Springs*): Média das BM de sizígia, adotado no Brasil como Nível de Redução (NRED) ao qual estão referenciadas as profundidades obtidas pelas sondagens batimétricas e presentes nas cartas náuticas brasileiras.
- CD (*Chart Datum*): Referencial Vertical Oceânico.

FIGURA 2 – SUPERFÍCIES DE REFERÊNCIA DE MARÉS



FONTE: Adaptada de IHO (2016).

### 2.1.2 Sistema de Maré Permanente

Uma parte considerável dos efeitos de marés não apresenta comportamento periódico, mas sim, permanente, designando a maré permanente. A maré permanente (maré de longo período) teve, pela primeira vez, sua importância discutida para observações geodésicas em Jensen (1949)<sup>1</sup> e Honkasalo (1964)<sup>2</sup> (EKMAN, 1989). Para o tratamento das deformações causadas pelos efeitos de maré permanente,

<sup>1</sup>JENSEN, H. Formulas for the Astronomical Correction to the Precise Levelling. **Danish Geodetic Institute**. Meddeleise, 1949.

<sup>2</sup>HONKASALO, T. On the Tidal Gravity Correction. **Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata**, VI/21, 1964.

adotam-se três Sistemas de Maré Permanente distintos (IHDE; MÄKINEN; SACHER, 2019):

- Sistema de maré livre (*tide-free*): no qual é eliminada a deformação permanente da figura da Terra. O potencial de marés e o potencial produto da deformação da Terra (efeito indireto) são eliminados das quantidades relacionadas ao potencial, como por exemplo, a gravidade e o geoide. Isso corresponde a remover fisicamente o Sol e Lua para o infinito.
- Sistema de maré médio (*mean tide*): os efeitos permanentes não são removidos da figura da Terra. O qual corresponde assim a média das forças de maré de longo período.
- Sistema de maré zero (*zero tide*): é mantido o potencial da deformação permanente do planeta ou efeito indireto. O efeito direto ou potencial de maré é eliminado.

Faz-se necessário destacar que as transformações entre sistemas de marés permanentes para altitudes e medidas de gravidade são indicadas para os seguintes casos: comparação entre distintos sistemas de altitudes ou sistemas gravimétricos; cálculo de altitudes a partir de diferentes nivelamentos dentro de um país; estudo do nível médio do mar; comparação de altitudes elipsoidais e altitudes niveladas; e cálculo de altitudes geoidais com a fórmula de Stokes (EKMAN, 1989).

As conversões das altitudes ( $H$ ) entre os sistemas de marés permanentes são definidas pelas equações (1, 2 e 3) (TENZER et al., 2011):

$$H_{mean-tide} = H_{tide-free} - (1 + k - h) \left[ -0,198 \left( \frac{3}{2} \text{sen}^2 \Psi - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (1)$$

$$H_{zero-tide} = H_{tide-free} - (k - h) \left[ -0,198 \left( \frac{3}{2} \text{sen}^2 \Psi - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2)$$

$$H_{mean-tide} = H_{zero-tide} - \left[ -0,198 \left( \frac{3}{2} \text{sen}^2 \Psi - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (3)$$

Nas equações,  $k$  e  $h$  correspondem aos convencionados números de Love e  $\Psi$  é a latitude geocêntrica. A não compatibilização dos sistemas de marés pode ocasionar análises equivocadas, porque globalmente as diferenças entre os sistemas podem alcançar 20 cm para altitudes definidas em sistemas de maré média e maré

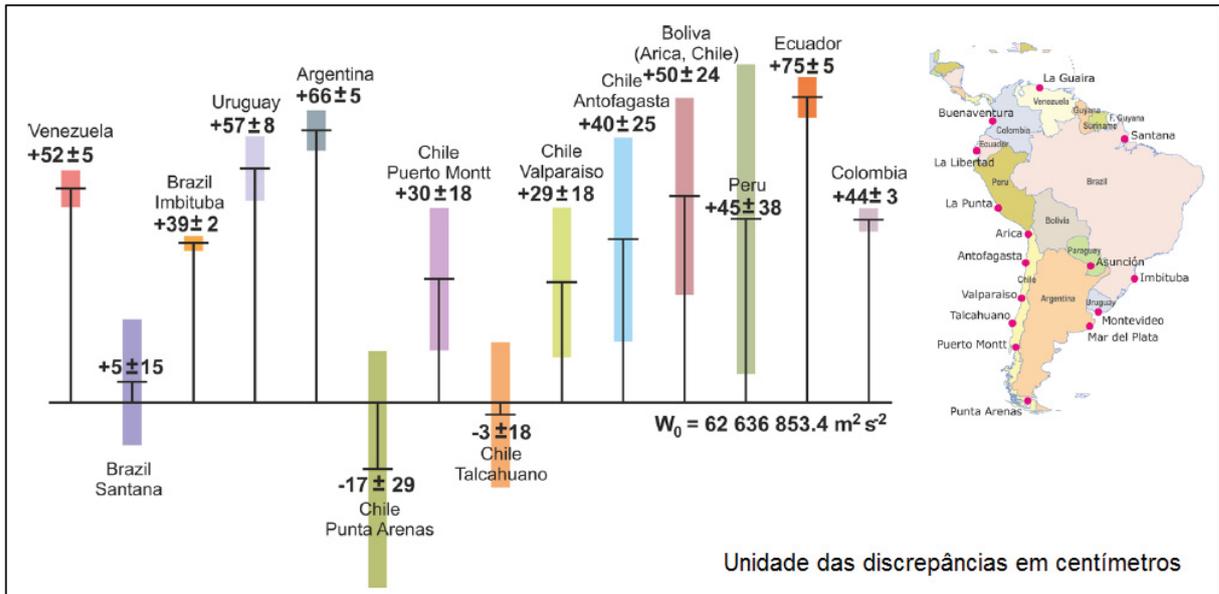
zero, 14 cm para aquelas altitudes definidas entre os sistemas de maré média e livre de maré e por fim 6 cm para os sistemas de maré zero e livre de maré (TENZER et al., 2011).

### 2.1.3 Conceito de *Datum* vertical terrestre: clássico (NMM) e moderno ( $W_0$ )

Em uma definição clássica o entendimento era que as médias de observações contínuas de EMs, de um dado período de tempo, materializavam o geóide e assim eram adotados os referenciais verticais das regiões ou países, ou seja, os *Data* verticais. Para o caso do Brasil, períodos de observações maregráficas de Imbituba-SC (1949-1957) e Santana-AP (1957–1958) materializaram os dois *Data* verticais oficiais do país (LUZ, 2016).

Ao longo dos anos, a realização de conexão entre diferentes marégrafos, entre redes verticais de diferentes países por meio de nivelamento geométrico e a melhoria de precisão das observações geodésicas levou a percepção de que a materialização do *Datum* vertical a partir de observações pontuais do NMM materializava geóides distintos, hoje, cada uma destas materializações são conhecidas como geóides locais ( $W_{0i}$ ). As estimativas mostram uma discrepância entre os *Data* brasileiros de 1,30 a 1,43 m (NICACIO; DALAZOANA, 2018b). Não somente para o Brasil, mas também para os *Data* da América do Sul discrepâncias são vistas (FIGURA 3).

FIGURA 3 – DISCREPÂNCIAS ENTRE OS DATA VERTICAIS DA AMÉRICA DO SUL E O VALOR CONVENCIONADO DE  $W_0$  PELA IAG EM 2015



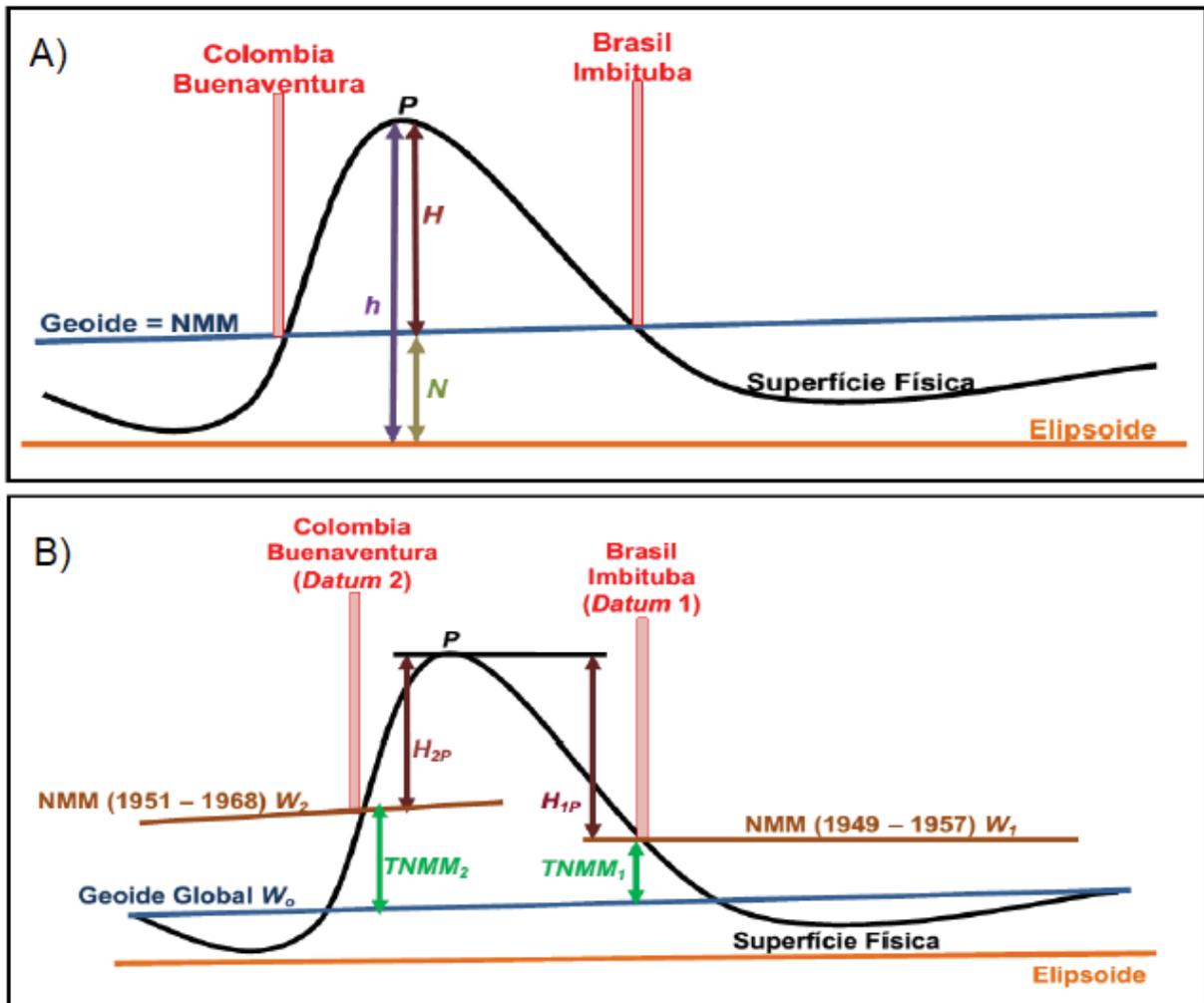
FONTE: SÁNCHEZ E SIDERIS (2017).

O que a definição clássica não leva em consideração é o desvio (ou diferença) existente entre o NMM local e o geoide global, denominada de TNMM (Topografia do Nível Médio do Mar). Além da TNMM, de acordo com Dalazoana (2006), há outros fatores que contribuem para as diferenças observadas entre os Data verticais, são exemplos, a evolução temporal e espacial do nível de referência em cada *Datum* e os procedimentos metodológicos inerentes de nivelamento adotados nas diferentes redes verticais.

A FIGURA 4 ilustra o conceito clássico e moderno de *Datum* altimétrico. No entendimento clássico (FIGURA 4A) supunha-se que duas definições de NMM materializariam o mesmo geoide (tendo que  $H$  é a altitude ortométrica,  $h$  a altitude elipsoidal e  $N$  a altitude geoidal). Porém, o NMM local como realização do *Datum* vertical não é representativo para outros períodos de tempo, nem locais, além da TNMM associada a cada definição (DALAZOANA, 2006). A condição evidenciada impossibilita trabalhos de cooperação entre países vizinhos, que necessitem de informação georreferenciada de diferentes fontes e não leva a uma associação a um nível global de maneira direta. Assim, as definições distintas de NMM condicionam as discrepâncias existentes em cada definição de *Datum* vertical baseado na teoria clássica.

Em uma definição moderna (FIGURA 4B), o geóide é visto como uma superfície equipotencial global, com valor de geopotencial igual a  $W_0$ , e é tido como o *Datum* vertical global. Neste caso, os referenciais locais podem se relacionar ao referencial global por meio da TNMM.

FIGURA 4 – CONCEITO CLÁSSICO (A) E MODERNO (B) PARA DEFINIÇÃO DO DATUM VERTICAL



FONTE: DA SILVA (2017).

A TNMM é definida como o afastamento entre o NMM e o geóide global, e pode variar globalmente em até  $\pm 2$  m (HECK; RUMMEL, 1990; FENOGLIO, 1996; SEEBER, 2003). A TNMM é causada pela ação de uma série de fenômenos físicos, como influências não periódicas de efeitos oceanográficos e meteorológicos, sendo também variável no tempo e por isto, é muitas vezes denominada de Topografia Dinâmica Média (MDT – *Mean Dynamic Topography*) ou Topografia da Superfície do

Mar (SSTop - *Sea Surface Topography*) (DA SILVA, 2017). Importante ressaltar os esforços internacionais para a definição do Sistema de Referência Altimétrica Internacional (IHRF - *International Height Reference System*) e da materialização do IHRF. A rede internacional possibilitará o conhecimento da TNMM ou *offset* entre as redes locais (definidas por NMMs) e o geoide global (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017).

A modelagem precisa do campo de gravidade terrestre a partir das missões espaciais, as observações do nível do mar em caráter global com os satélites altímetros e os avanços em tecnologias de processamento, levaram a padronização do valor de  $W_0$  pela IAG no ano de 2015. Dentre as infinitas superfícies equipotenciais com potencial  $W_i$ , para se convencionar um valor para  $W_0$ , o geoide, é necessário levar em consideração a definição clássica de Gauss-Listing, isso para assegurar a quantificação correta da componente. Retomando a definição apresentada por Gauss (1876) e Listing (1873): “o Geoide é uma superfície equipotencial que melhor se ajusta (no sentido dos mínimos quadrados) ao NMM não perturbado em um dado instante”. De acordo com Sánchez et al. (2016), a definição dos autores pode ser atualizada para: o geoide global é dado por  $W_0$  que é o valor do geopotencial em uma superfície de nível que melhor se aproxima (no sentido dos mínimos quadrados) a superfície do nível médio do mar global, quando totalmente calmo. O valor de  $W_0$  convencionado para a época 2010,0 e adotado em resolução pela IAG é de  $62.636.853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , com erro formal de  $\pm 0,02 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  (IAG, 2015; SÁNCHEZ et al. 2016).

O avanço no entendimento e a convenção do  $W_0$  causam impactos nas redes verticais estabelecidas de forma clássica. Além da definição do *Datum*, outra questão é que muitas delas partiram do princípio de que somente a execução de nivelamento geométrico de “alta precisão” era suficiente para uma rede consistente e estável. Assim, a concepção clássica das redes verticais gera altitudes sem caráter físico, ou seja, não vinculadas ao campo de gravidade terrestre. E isto é uma dificuldade porque o transporte de água, por conseguinte de massas no planeta, é norteado pela ação da gravidade, desta maneira, principalmente para grandes projetos de engenharia, o campo da gravidade não pode ser negligenciado.

Atrelado aos novos conceitos de *Data* verticais e as considerações relativas à importância do valor de gravidade associado, uma rede vertical moderna deve ter associação a modelagem do campo de gravidade e deve ser referida ao geoide global ( $W_0$ ). Além disso, o valor unívoco a ser utilizado para quantificação das altitudes seria

o número geopotencial. Não obstante, para a rede vertical brasileira, o Reajustamento da Rede Altimétrica com base em Números Geopotenciais de 2018 trouxe tratativas para que o conceito moderno seja seguido, apesar do vínculo ao geóide global ( $W_0$ ) ainda não ter sido alcançado (IBGE, 2018).

No contexto do SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), o grupo de trabalho que se destina a componente vertical (SIRGAS GT\_III) recomenda que os países membros busquem estratégias para a realização das Redes Verticais de Referência (RVR) baseadas em números geopotenciais. O que viabilizaria a conexão das redes nacionais e um futuro ajustamento de uma RVR SIRGAS. Brasil, Argentina e Uruguai já cumpriram a tarefa e possuem as redes nacionais com ajustamento baseado em números geopotenciais (DE FREITAS et al., 2018).

#### 2.1.4 Conceito de *Datum* vertical oceânico: clássico (NRED) e moderno (LAT)

Quanto ao mapeamento oceânico, especificamente, as cartas náuticas são obtidas a partir de levantamentos hidrográficos visando a coleta dos dados batimétricos nas regiões de interesse. De acordo com a Marinha do Brasil (2019), o método tradicional de sondagem batimétrica se apresenta bastante laborioso, no qual um navio ou embarcação sonda uma determinada área ao longo de linhas contínuas, muitas vezes uniformemente espaçadas e, ao final, o resultado é a quantificação das profundidades para a representação do relevo do fundo oceânico, de reservatórios e rios, em cartas.

As profundidades que caracterizam o relevo oceânico são obtidas a partir dos levantamentos já citados e precisam estar relacionadas com os efeitos de maré local para permitir uma navegação segura (MATOS, 2005). Assim, surge a necessidade de um nível de referência que seja vinculado ao fenômeno de marés, por conseguinte, que leve em consideração a dinâmica do nível do mar. Apesar dessa consideração, para a confecção de cartas náuticas não é utilizado o mesmo nível de referência adotado para as cartas terrestres.

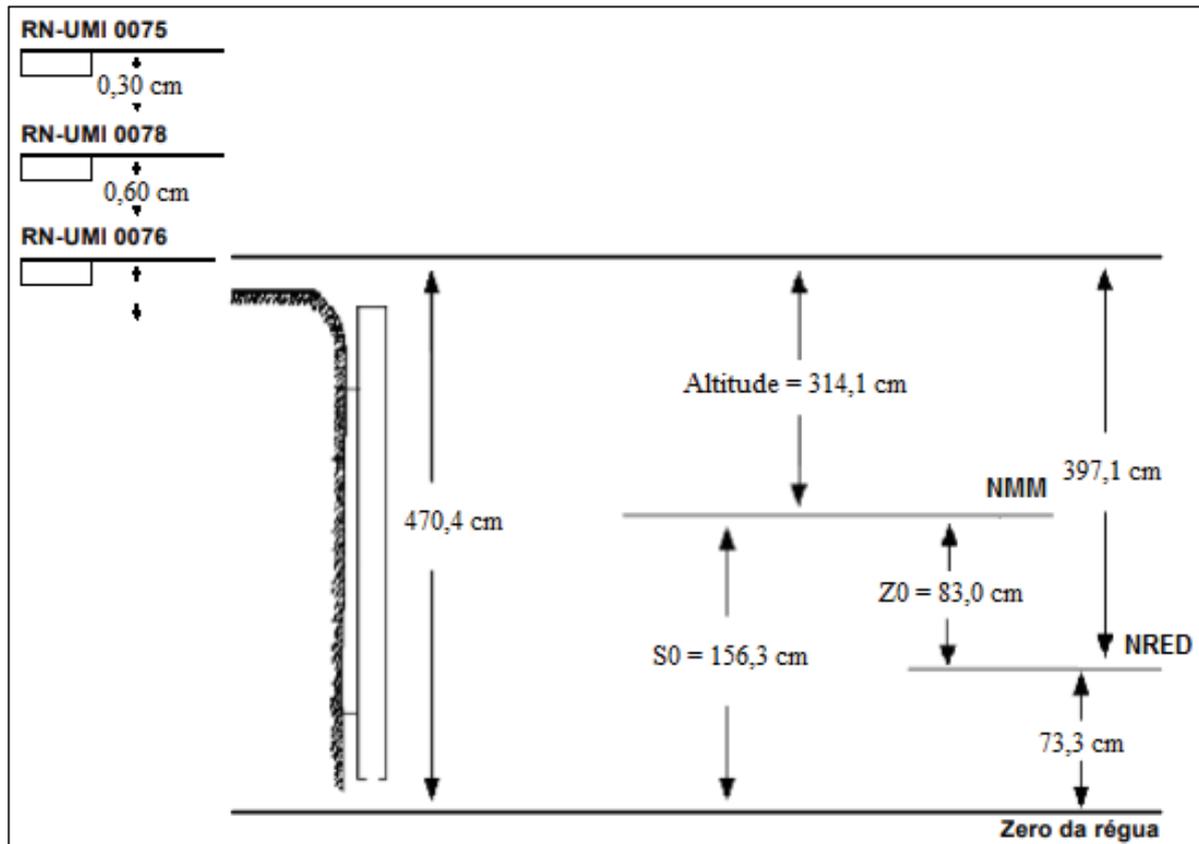
Assim sendo, as altitudes de marés e as profundidades provenientes da sondagem batimétrica são reduzidas a um nível de referência, o *Chart Datum* (CD). Em outras palavras, o CD é o zero do eixo vertical das cartas náuticas, este nível corresponde no Brasil ao plano de referência dado pela MLWS e é conhecido como

NR (doravante denominado como NRED para não gerar confusão com o nível de referência). Neste sentido, a principal ideia é tentar garantir ao navegante que este não encontre nenhuma profundidade menor do que as representadas na carta náutica visando uma navegação segura (MATOS, 2005; MARINHA DO BRASIL, 2019). Porém, de acordo com Miguens (1996), o fato da determinação do NRED ser dada a partir da MLWS, por ocasião das médias das BM de sizígia, indica que podem ser encontradas profundidades menores que as constantes na carta.

Em termos práticos, ao se ter a necessidade de confeccionar uma carta, escolhe-se um local de natureza permanente para instalar uma Referência de Nível (RN). A sua altitude é determinada por nivelamento geométrico em relação ao zero hidrográfico, em grande parte dos casos o zero hidrográfico coincide com o zero da régua maregráfica, e essa informação subsidia a determinação dos níveis de referência no local em conjunto com as análises das observações maregráficas (MATOS, 2005).

O Centro de Hidrografia da Marinha disponibiliza as descrições e diagrama de níveis de referência de cada EM ao longo da costa brasileira, todos os níveis são dados em relação a(s) RN(s) próxima(s), como por exemplo a descrição e diagrama pertencente a EM de Porto do Açu, em São José da Barra, Rio de Janeiro (FIGURA 5). São representados: o NMM, o NRED, o zero da régua maregráfica, a RN de referência, além das diferenças entre cada nível de referência representado no diagrama. Todas estas informações estão disponíveis nas fichas das estações maregráficas, intituladas F-41, disponíveis em CHM (2020).

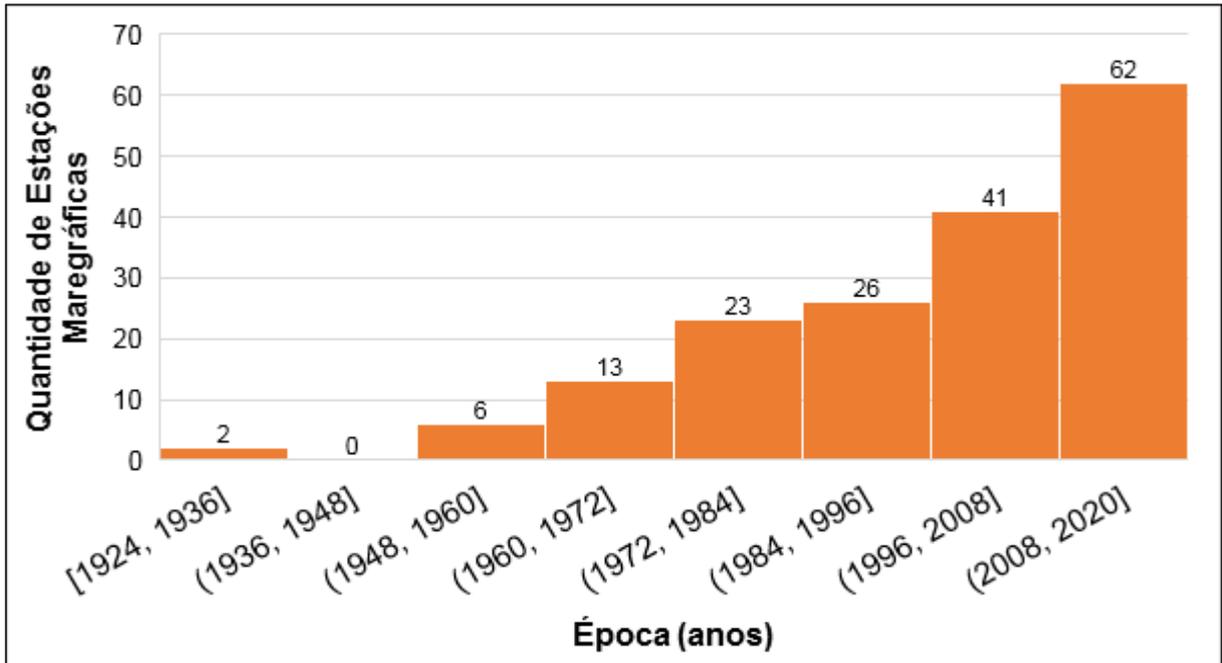
FIGURA 5 – DESCRIÇÃO E DIAGRAMA DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE PORTO DO AÇU, SÃO JOSÉ DA BARRA, RIO DE JANEIRO



FONTE: Adaptada de CHM (2019).

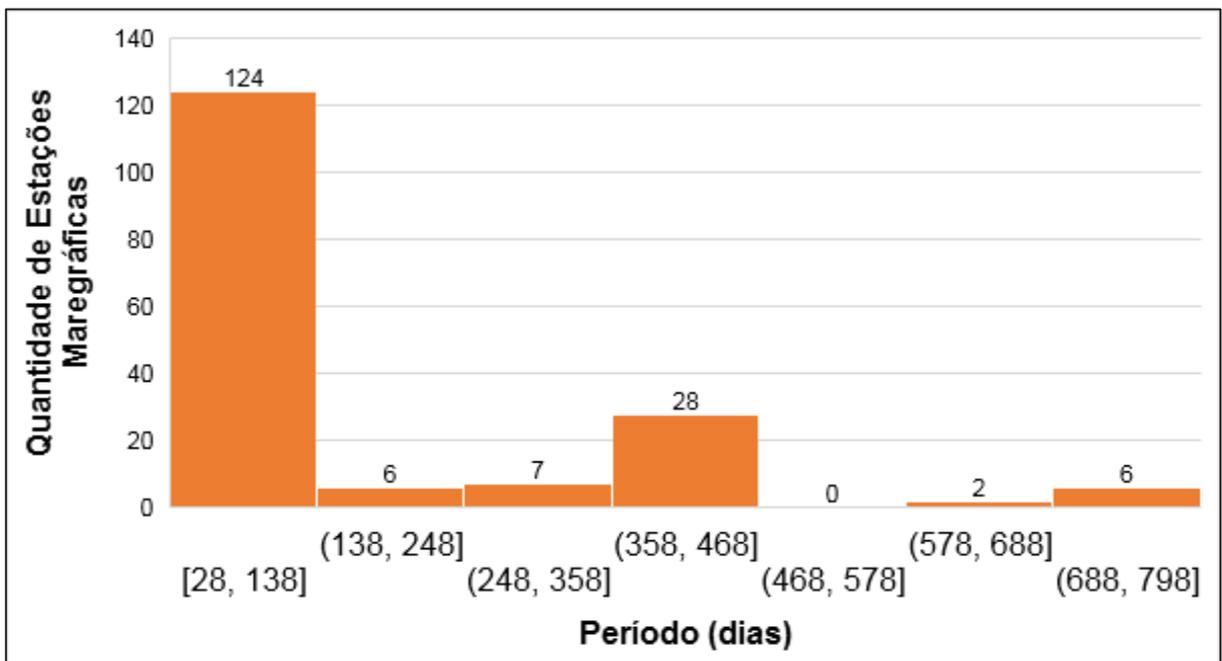
Como já mencionado, no Brasil, os NREDs das EMs disponibilizadas pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) são utilizados como *Data* verticais oceânicos ou CD, que são referências para as cartas náuticas confeccionadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Os níveis são estabelecidos ao longo da costa brasileira e foram baseados em um período de observações maregráficas. Para cada uma das EMs há um NRED associado e que foram determinados em diferentes épocas (GRÁFICO 1). A extensão do período de observação também não foi padronizada para a quantificação dos níveis ao longo da costa (GRÁFICO 2). A determinação de NREDs foi crescendo exponencialmente a partir de 1948 e a grande maioria deles foi determinada com até 138 dias de observações do nível do mar.

GRÁFICO 1 – ÉPOCA DE DETERMINAÇÃO DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DISPONIBILIZADAS PELO CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA



FONTE: O autor (2019).

GRÁFICO 2 – PERÍODO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONSTITUINTES DE MARÉ DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS DO CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA



FONTE: O autor (2019).

Em contrapartida ao que é adotado no Brasil e também em outros países, como os Estados Unidos, a IHO recomenda que a superfície usada como referência para obtenção do *Datum* para reduções de sondagens em regiões costeiras seja definida pela LAT com o intuito de buscar uma padronização mundial (IHO, 2017). De acordo com Soares (2017), a determinação da LAT é algo que se tem almejado para a costa brasileira por meio de parcerias de diversas instituições e gerida pelo IBGE.

Adotar uma superfície de referência dada pela LAT solucionaria os problemas apresentados pela adoção dos NREDs como CD: o caráter local, o fato de que algumas profundidades podem ser menores do que as constantes na carta, a questão da determinação de cada NRED em épocas distintas, a falta de padronização da extensão das séries temporais para realização da análise harmônica visando a quantificação dos NREDs e, sobretudo, a impossibilidade de conexão ao referencial terrestre SIRGAS. Ademais, a determinação da LAT trará novas abordagens porque não mais a referência vertical para profundidades será dada pontualmente, mas sim por uma superfície que traz valores mínimos de marés ao longo de sua definição.

A LAT é definida como o menor nível de maré alcançado em condições meteorológicas médias (normal) e sobre diferentes combinações de condições astronômicas, a recomendação é que a determinação seja feita a partir de pelo menos 18,6 anos de observação da dinâmica do nível do mar, o que traria resultados confiáveis para a determinação da superfície de referência, tendo em vista que este período mínimo compreenderia um ciclo nodal completo (BOSCH, 2016a; BOSCH, 2016c; TURNER et al., 2010, SLOBBE; KLEES, 2012).

É importante que a LAT seja referida a um elipsoide de referência para que haja uma facilidade na integração da sondagem batimétrica com a superfície de referência vertical, especialmente porque é visto o uso cada vez mais comum de posicionamento por GNSS nos levantamentos batimétricos que propicia profundidades com vínculo ao modelo elipsoidal. Para o cálculo da LAT com este requisito, é essencial a modelagem do nível do mar a partir de séries de observações que podem ser obtidas por meio de EMs, Receptores GNSS, Boias GNSS e Satélites Altimetros. Das opções citadas, somente os satélites altímetros fornecem informações com boa resolução temporal e espacial, porém uma desvantagem é que a técnica perde resolução na proximidade da costa devido a interação oceano/continente (SLOBBE; KLEES, 2012).

No contexto do CICVTM, os desafios principais que podem ser apontados perpassam em como determinar uma superfície de referência LAT a fim de realizar a unificação dos NREDs na região costeira brasileira, ademais, a infraestrutura geodésica para a determinação também é uma dificuldade dada as dimensões continentais do Brasil e devido a temporalidade das observações maregráficas. Posteriormente, tem-se questionado quais seriam as possibilidades para o estabelecimento da conexão entre a superfície de referência para determinação de profundidades oceânicas e a superfície de referência para determinação altimétrica ao longo da superfície terrestre.

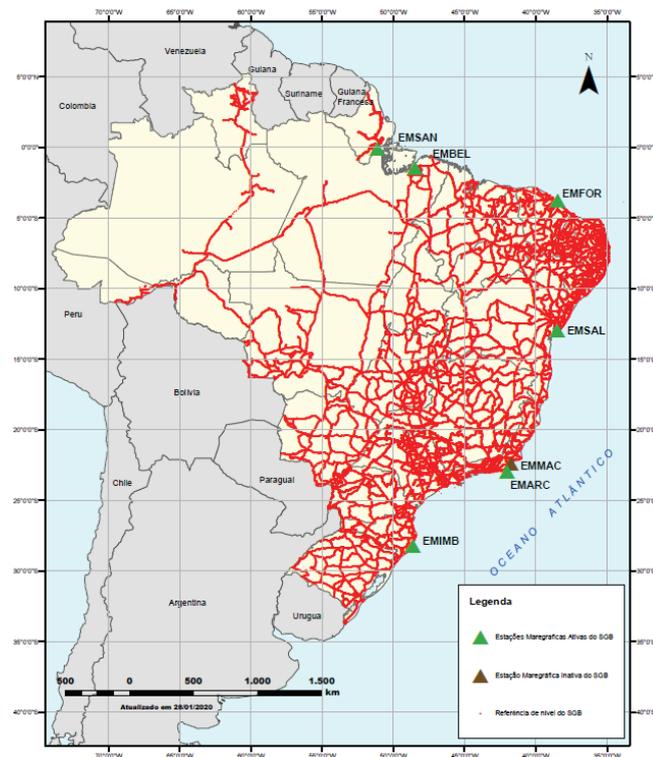
## 2.2 INTEGRAÇÃO DOS REFERENCIAIS VERTICAIS EM REGIÃO COSTEIRA

O problema para integração de referenciais verticais em regiões costeiras é devido aos distintos elementos envolvidos, em particular o NMM, o geoide, a TNMM, as EMs, a altimetria por satélite, entre outros (BOSCH, 2016b). Adicionalmente, pode-se pensar nos distintos levantamentos para determinação de cotas, altitudes e profundidades: no oceano a sondagem batimétrica e na parte terrestre o nivelamento.

Em uma primeira etapa no processo de busca pela integração da componente vertical em ambiente costeiro é necessário pensar na unificação do CD a partir da obtenção da LAT. Porém, a LAT não é uma superfície obtida com observações diretas, superfícies intermediárias como o NMM e o geoide precisam ser investigadas antes: o NMM é fundamental para a obtenção da LAT e o geoide é uma superfície que faz a conexão entre a LAT e o referencial terrestre para altitudes (SLOBBE; KLEES, 2012).

Quanto a obtenção do NMM, destaca-se que as EMs e a técnica de altimetria por satélites, promovem observações essenciais. Na costa, de acordo com Bosch (2016b), as EMs representam uma indispensável interface entre a parte terrestre e a parte oceânica, pois são fixas na crosta e observam o nível do mar. Ressalta-se neste ponto, a importância da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), concebida em 1996 pelo IBGE, que hoje é composta por sete estações maregráficas que registram observações contínuas ao longo da costa: Imbituba-SC, Belém-PA, Arraial do Cabo-RJ, Macaé-RJ, Salvador-BA, Fortaleza-CE e Santana-AP. Uma informação complementar é que a estação de Macaé se encontra inativa desde junho de 2015 (FIGURA 6) (IBGE, 2019a).

FIGURA 6 – REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA



FONTES: IBGE (2020).

No âmbito oceânico, ou seja, em mar aberto, os satélites altímetros a partir da década de noventa possibilitaram informações da superfície dinâmica dos oceanos com boa distribuição espacial e temporal. As missões de maior destaque são: Topex-Poseidon (T/P), Jason-1, Jason-2 e Jason-3. A técnica produz um conhecimento dos oceanos e sustenta muitos estudos sobre evolução do NMMG ao longo das últimas décadas.

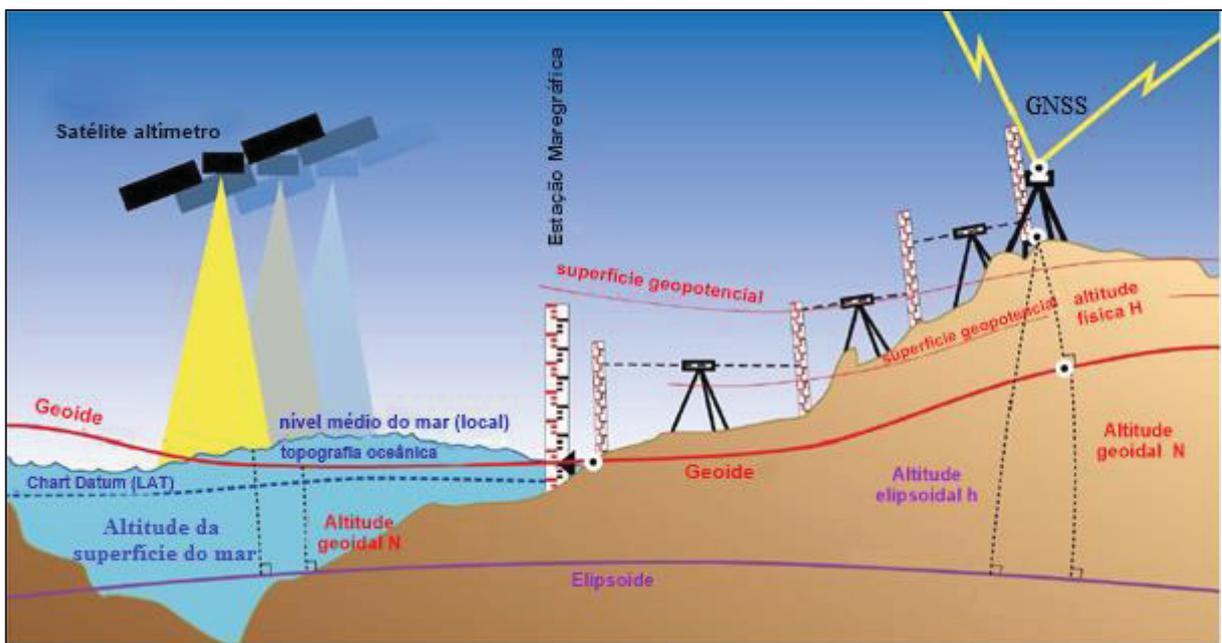
Uma dificuldade, é a perda de precisão da altimetria por satélites em regiões próximas à costa. A questão configura uma das grandes dificuldades para a combinação das observações geodésicas com o objetivo de integrar os referenciais. De acordo com Slobbe e Klees (2012), a perda de acurácia da técnica ocorre a uma distância de 5 a 25 km da costa, contudo, para os dados que passaram pelo procedimento de “*re-tracked*” a faixa é em torno de 5 a 10 km. Uma solução é a realização de levantamentos com GNSS embarcado em boias ou barcos para modelagem do nível do mar nestas regiões (PINEAU-GUILLOU; DORST, 2012).

A altimetria por satélite observa o nível oceânico e fornece a Altitude da Superfície do Mar (SSH - *Sea Surface Height*) referida ao elipsoide. Da mesma

maneira, as EMs também observam o nível do mar, porém em caráter local e muitas vezes contaminadas por movimentos da crosta. Para compatibilização das observações maregráficas, além da quantificação e correção dos movimentos da crosta e do posicionamento geocêntrico das EMs, ainda devem ser acrescidos o impacto do efeito dinâmico da interação atmosfera/oceano, o Ajustamento Glacial Isostático (GIA - *Glacial Isostatic Adjustment*) e questões climáticas devido a temperatura (SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2017).

A FIGURA 7 apresenta um esquema conceitual dos elementos envolvidos nos sistemas de altitudes e profundidades, evidencia a complexidade para a integração e interoperabilidade das observações geodésicas em regiões costeiras. Além de sintetizar as técnicas, superfícies e dificuldades dado os diferentes níveis envolvidos. Pormenores sobre estes elementos podem ser encontrados em Bosch (2016c).

FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO COM OS PRINCIPAIS ELEMENTOS ENVOLVIDOS EM SISTEMAS DE ALTITUDES NAS REGIÕES COSTEIRAS



FONTE: Adaptada de BOSCH (2016c).

Para resolver as dificuldades envolvidas, estudos com o objetivo de integrar e compatibilizar referenciais foram conduzidos na Europa e podem servir como referência para condução de projetos com o mesmo objetivo. Pode-se destacar os seguintes projetos: VORF (*Vertical Offshore Reference Frame*), BathyElli (*Bathymetry*

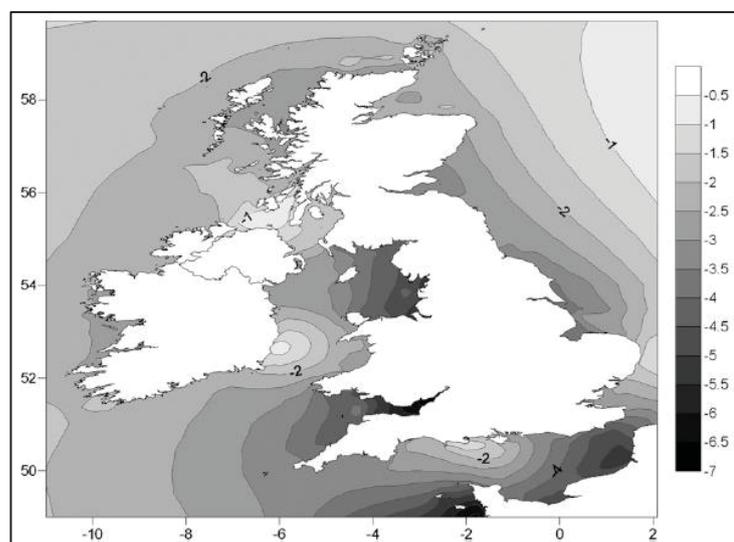
referred to the Ellipsoid) e BLAST (*Bringing Land and Sea Together*) (BOSCH, 2016a). Estes serão abordados nas sub-seções subsequentes desta pesquisa.

### 2.2.1 Vertical Offshore Reference Frame (VORF)

A Rede de Referência Vertical Costeira (VORF - *Vertical Offshore Reference Frame*) é um projeto do Escritório Hidrográfico do Reino Unido (UKHO - *United Kingdom Hydrological Office*) que durou de 2005 a 2008, e tal como o BathyElli, objetivava a determinação da superfície LAT com relação ao NMM. O modelo LAT foi referido ao elipsoide da Rede de Referência Terrestre Europeia de 1989 (ETRF89 - *European Terrestrial Reference Frame 1989*) para possibilitar a integração entre o referencial vertical marinho, terrestre e global. No mais, a partir de análises harmônicas foram modeladas as superfícies MLWS, MHWS e a HAT, dando maior funcionalidade à rede (TURNER et al., 2010).

Como insumo de informações da dinâmica do nível do mar para o cálculo do modelo da superfície de LAT e das demais superfícies foram utilizados dados de 700 EMs na costa e 180 EMs que foram instaladas fora da costa, modelo hidrodinâmico de 3,5 km de resolução e modelos de marés derivados de altimetria por satélite. A junção dos dados para modelagem foi feita utilizando *Thin-Plate Spline* (TPS) e ao final o projeto teve como resultado principal o modelo da superfície LAT com relação ao NMM para a região do Reino Unido (FIGURA 8).

FIGURA 8 – MODELO DA SUPERFÍCIE LAT COM RELAÇÃO AO NMM EM METROS



FONTE: TURNER et al. (2010).

A desvantagem da metodologia empregada é que modelos globais de marés apresentam erros significativos em regiões costeiras ou em regiões de águas rasas. Assim, o uso de modelos globais de marés para geração de modelos hidrodinâmicos e conseqüentemente para geração de modelos da superfície LAT pode levar a uma estimativa incorreta (BOSCH, 2016b). Mais detalhes sobre o projeto podem ser encontrados em Iliffe, Ziebart e Turner (2007), Turner et al., (2010) e Turner et al., (2013).

### 2.2.2 Bathymetry referred to the Ellipsoid (BathyElli)

O projeto BathyElli foi conduzido pelo Serviço Hidrográfico e Oceanográfico da Marinha francesa (SHOM - *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*) entre os anos de 2010 e 2012. No contexto deste projeto, foram envolvidas as seguintes superfícies verticais de referência: o NMM, a LAT, o CD (conceito clássico), o elipsoide, o *Datum* de referência terrestre (IGN69 na França) e o geoide. Especificamente, foram calculadas neste projeto as superfícies NMM, LAT e CD (conceito clássico) referidas ao Sistema Geodésico de Referência de 1980 (GRS80 - *Geodetic Reference System 1980*).

A metodologia aplicada no projeto obtém a superfície do NMM a partir da interpolação de séries temporais do nível do mar e os resultados foram mesclados utilizando o método dos mínimos quadrados com análise da função covariância. Os dados são provenientes de altimetria por satélite, EMs e dados GPS (PINEAU-GUILLOU; DORST, 2012):

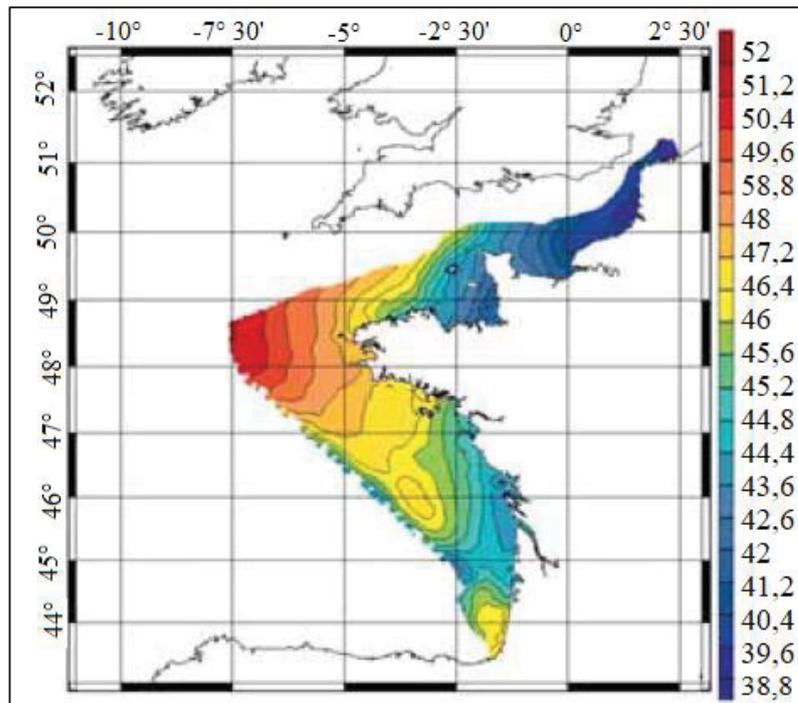
- a) Altimetria por Satélite: obtenção do nível do mar a partir de observações fora da costa (*offshore*) entre 1992 e 2005 dos altímetros: T/P, *European Remote Sensing 1* (ERS1), *European Remote Sensing 2* (ERS2) e *GEOSAT Follow-On* (GFO). Próximo à costa não foi utilizada devido às limitações da técnica, não sendo usada em um limite de 10 milhas (aproximadamente 16,1 km).
- b) Estações Maregráficas: obtenção do nível do mar a partir de observações em locais na costa (*at the shore*) utilizando observações de 30 EMs permanentes da Rede de Observação do Nível do Mar Francesa.

- c) Dados GPS: para preencher o vazio de dados (ou *gap*, como conhecido na literatura internacional) entre a altimetria por satélite e as EMs, a SHOM realizou campanhas com o GPS em modo cinemático para a mensuração do NMM em região próximo à costa (*near shore*).

A partir das observações do nível do mar, neste projeto, foi obtida a Superfície Média do Mar Hidrográfico (HMSS - *Hydrographic Mean Sea Surface*) ao invés dos modelos da Superfície Média do Mar (MSS – *Mean Sea Surface*), isso porque ela é calculada por um modelo global de maré com baixa precisão e nela é corrigido o efeito do barômetro invertido, pontos não interessantes para a hidrografia. O modelo de marés oceânicas (OTM - *Ocean Tide Model*) utilizado para a HMSS foi calculado pela SHOM e apresenta melhores resultados por ser uma solução local. Outra questão importante de ser destacada é que o NMM varia mais de 1 m entre a costa e uma distância de até 15 milhas (aproximadamente 24,140 km) por isso a necessidade de preencher o vazio de dados na proximidade da costa (PINEAU-GUILLOU; DORST, 2012).

Em Bosch (2016b) pode ser encontrado um esquema com as etapas, tipos de observações geodésicas, os referenciais envolvidos, as considerações feitas, locais onde foram aplicados a metodologia e as estratégias adotadas no projeto BathyElli. Maiores informações sobre o projeto poderão ser encontradas em Pineau-Guillou e Dorst (2012). O principal resultado apresentado no BathyElli é a LAT referida ao elipsoide GRS80 (FIGURA 9).

FIGURA 9 – MODELO DA SUPERFÍCIE LAT REFERIDA AO ELIPSOIDE GRS80 EM METROS



FONTE: PINEAU-GUILLOU E DORST (2012).

### 2.2.3 Bringing Land and Sea Together (BLAST)

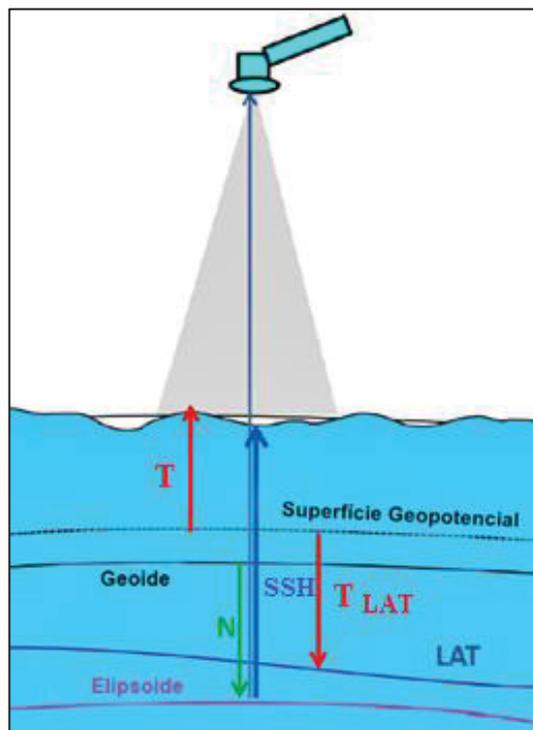
O projeto BLAST contou com a participação de 15 países europeus, foi desenvolvido entre os anos de 2009 a 2012 e liderado pelo Serviço Hidrográfico Norueguês. O projeto tinha como objetivo o desenvolvimento e aplicação de uma metodologia para a unificação dos CD na região do Mar do Norte (*North Sea*) na Europa e a conexão entre sistemas de altitudes em região costeira com resolução espacial e precisão que atenda às necessidades da sociedade, essencialmente para o monitoramento das mudanças no planeta e gestão de riscos naturais, com precisão sub-decimétrica (BOSCH, 2016a; BOSCH, 2016b; SLOBBE; KLEES, 2012).

Diferente dos demais projetos, o produto gerado foi uma superfície LAT referida ao geoide ou quase-geoide, configurando uma vantagem em relação as estratégias tradicionais de referir-se ao NMM. Isso porque o geoide ou quase-geoide é uma superfície mais adequada por ser possível o cálculo tanto na parte terrestre, quanto na oceânica (BOSCH, 2016a). O estabelecimento da separação da superfície LAT em relação ao geoide possibilita ainda a facilidade ao vínculo com o sistema de altitudes terrestre.

No contexto da metodologia executada, foi visto a necessidade de computação e modelagem do geóide com alta resolução e do Modelo Hidrodinâmico para Águas Rasas (SWHM - *Shallow Water Hydrodynamic Model*). O SWHM utilizado neste projeto específico é o *Dutch Continental Shelf Model* (DCSM). O modelo é necessário para que se possa reduzir os valores de SSHs para o geóide e para que seja feita a modelagem da superfície LAT, além disso a abordagem possibilita que o inconveniente de perda de precisão da altimetria por satélite próximo à costa seja resolvido. O DCSM é referido a uma superfície equipotencial particular do campo de gravidade terrestre, podendo ser dita geópe (SLOBBE; KLEES, 2012). Mais detalhes sobre o modelo DCSM podem ser encontrados em Slobbe et al. (2013).

Em linhas gerais foi realizado o cálculo do modelo geoidal, depois foram obtidos o nível do mar instantâneo ( $T$ ) e a LAT ( $T_{LAT}$ ) com relação ao geópe do DCSM (FIGURA 10). De início, subtraindo dos valores de SSHs, calculados pela altimetria por satélite, a altitude geoidal ( $N$ ), proveniente do modelo geoidal, são obtidos os níveis do mar instantâneos com relação ao geóide. De posse do valor de nível do mar instantâneo proveniente do DCSM ( $t$ ) o valor de discrepância entre o geóide e o geópe de referência do DCSM pode ser quantificado (BOSCH, 2016b).

FIGURA 10 – REFERÊNCIA VERTICAL DCSM



FONTE: Adaptada de BOSCH (2016b).

Os dados utilizados em costa foram os registros do nível do mar absoluto obtidos a partir de EMs conectadas em estações GNSS ou com conexão em referências de nível (RNs). Fora da costa, o modelo DCSM e as observações de satélites altímetros foram essenciais e condicionaram a realização da superfície de referência LAT.

### 2.3 MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL

O conhecimento preciso e a modelagem do campo de gravidade terrestre são importantes para diferentes áreas. Em Geodésia, é essencial para descrever a superfície topográfica continental e oceânica, isso porque as observações geodésicas em grande parte são regidas pelo campo de gravidade (desde observações com satélites a observações que materializam a vertical do local) e ainda este conhecimento é usado para a determinação do geóide usado como referencial para os sistemas de altitudes terrestres (TORGE, 2012; BIDEL et al., 2018).

A modelagem do campo de gravidade leva há uma investigação que é baseada em levantamentos *in situ* com gravímetros supercondutores, relativos e/ou absolutos. São feitas ainda observações com sensores embarcados em aeronaves, navios e barcos (PLAG et al., 2009). Nessa esfera, destaca-se principalmente a contribuição das missões *Challenging Mini-satellite Payload* (CHAMP), *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e *Gravity Field and steady state Ocean Circulation Explorer* (GOCE) que são hoje fundamentais para o estabelecimento do monitoramento do ST, porque contribuem com informações do campo de gravidade com acurácia e resolução temporal e espacial sem precedentes (FLECHTNER; SCHUH; SNEEUW, 2014).

Vale ressaltar, que o início dos estudos referentes a modelagem do campo da gravidade terrestre foi marcado por pesquisadores como: Clairaut, de Sitter, Helmert, Pizzetti, Somigliana, Lambert, entre outros (RAPP, 1998). Estes foram importantes para a consolidação do modelo de Terra “normal” dado pelo elipsoide de revolução que é aceito na atualidade como a melhor aproximação geométrica do planeta. Ao longo dos anos, com as missões para modelagem do campo da gravidade, a maior disponibilidade de observações geodésicas terrestres e o desenvolvimento da computação possibilitou o cálculo de mais de centenas de modelos de Terra, ditos, Modelos Globais do Geopotencial (MGGs).

Um MGG é uma aproximação matemática ao potencial gravitacional externo de um corpo atraente, e neste caso, a Terra é o corpo que provoca a atração. O modelo constitui em um conjunto de valores numéricos, os coeficientes, para certos parâmetros, com incertezas associadas, os erros de propagação. Na concepção de um MGG são calculadas quantidades derivadas do potencial gravitacional, conhecidas também como funcionais do campo de gravidade (SANSÒ; SIDERIS, 2013). São funcionais: os distúrbios de gravidade, as anomalias de gravidade, as anomalias de altitude, as altitudes geoidais, os valores de gravidade sobre a superfície terrestre e sobre o elipsoide, entre algumas outras (BARTHELMES; INCE; REIBLAND, 2017).

Os MGGs expressam o geopotencial discretizado e expandido em termos de esféricos harmônicos (equação 4) (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006). Na equação,  $C_{nm}$  e  $S_{nm}$  caracterizam a singularidade do desenvolvimento dos modelos e são denominados coeficientes de Stokes. A singularidade é vista porque definido o elipsoide de referência e o ponto de cálculo, estes coeficientes são únicos para cada MGG (NICACIO; DALAZOANA, 2018a). Os demais termos correspondem:  $r$  é a distância do ponto de cálculo ao geocentro do modelo adotado,  $\varphi$  a latitude geodésica,  $\lambda$  a longitude geodésica,  $GM$  é a constante gravitacional geocêntrica,  $a$  é o semieixo maior do elipsoide de revolução associado ao modelo,  $\omega$  a velocidade angular terrestre e  $P_{nm}$  representam as funções de Legendre relacionadas ao grau  $n$  e ordem  $m$ .

$$W(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right] \quad (4)$$

$$+ \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin \varphi)]$$

### 2.3.1 Possibilidade de modelos existentes

Desde 2003, o Centro Internacional para Modelos Globais Terrestres (ICGEM - *International Centre for Global Earth Models*) é responsável pela gestão e divulgação dos MGGs para a comunidade usuária. O ICGEM é um dos cinco serviços coordenados pelo Serviço Internacional do Campo da Gravidade (IGFS - *International Gravity Field Service*) da IAG. Os demais serviços são o Escritório Internacional de

Gravimetria (BGI - *Bureau Gravimetrique International*), o Serviço Internacional para o Geoide (ISG - *International Service for the Geoid*), o Serviço Internacional de Geodinâmica e Marés Terrestres (IGETS - *International Geodynamics and Earth Tide Service*) e o Serviço Internacional de Modelos Digitais de Elevação (IDEMS - *International Digital Elevation Model Service*) (INCE et al., 2019).

Até 1997, mais de 60 modelos haviam sido calculados e disponibilizados (SEEBER, 2003). Em uma consulta ao ICGEM em dezembro de 2019, 176 modelos estáticos estavam disponíveis, sem considerar os modelos dinâmicos ou temporais que foram possíveis, principalmente desde a missão GRACE. Os modelos são disponibilizados na página do ICGEM, deles são apresentadas informações como número, nome do modelo, ano de cálculo, grau e ordem de desenvolvimento, conjunto de dados utilizado para o cálculo, bem como a publicação ou referência de cada um (ICGEM, 2019a).

Os MGGs são associados as letras S, A e/ou G: S - quando foram calculados com dados de satélites, A – quando foram utilizados dados de altimetria e G para observações de gravidade sobre a superfície terrestre (a partir de levantamentos terrestres ou com equipamentos embarcados em aeronaves ou navios) (ICGEM, 2019a). Quanto ao conjunto de dados utilizados para o cálculo dos modelos eles podem ser classificados em: modelos somente satélites (*satellite-only*), modelos combinados (*combined*) e modelos adaptados (*tailored*) (AMOS; FEATHERSTONE, 2002, FEATHERSTONE, 2002):

- a) Modelos somente satélites: modelos com fonte de dados somente de satélites, tais como, GRACE, GOCE, CHAMP e LAGEOS. Alcançam graus de desenvolvimento mais baixos. São exemplos destes modelos: GO\_CONS\_GCF\_2\_DIR\_R6 (BRUINSMA et al., 2014), GOCO06s (KVAS et al., 2019) e ITSG-Grace2018s (MAYER-GÜRR et al., 2018).
- b) Modelos combinados: modelos derivados da combinação de distintas fontes de dados, tais como, modelos somente satélites, gravimetria terrestre, dados de gravimetria marinha derivada de satélites altímetros e gravimetria aérea. São exemplos destes modelos: SGG-UGM-1 (LIANG et al., 2018), XGM2016 (PAIL et al., 2017) e GECO (GILARDONI; REGUZZONI; SAMPIETRO, 2016).

- c) Modelos adaptados: modelos derivados de refinamentos regionais de modelos já existentes, podendo ser de modelos combinados ou de satélite somente, utilizando necessariamente dados de gravidade com alta resolução. É exemplo de modelo adaptado: MAPGEO2015 (BLITZKOW et al., 2016). Observação: Se faz necessário ressaltar, que o MAPGEO2015 é apenas um modelo geoidal, dele não é possível o cálculo das demais funcionais da gravidade como ocorre com os MGGs.

### 2.3.2 Indicativos de melhores modelos para o Brasil

Uma quantidade relevante de autores realizou pesquisas a fim de avaliar o comportamento dos MGGs em regiões brasileiras ou no país como um todo. Todas as pesquisas foram baseadas na avaliação relativa ou absoluta de estações geodésicas que possuíam altitudes referidas ao elipsoide e (quase) geóide simultaneamente, ou seja, avaliação GNSS(GPS)/ Nivelamento. Os resultados destas pesquisas podem, em alguma medida, direcionar indicativos de modelos com melhor adequação ao Brasil.

Em regiões brasileiras, pode-se citar alguns destes estudos: Santos, Cerqueira e Jamur (2010) analisaram os modelos EGM2008 e MAPGEO2004 no município de Maceió-AL com 116 estações geodésicas; Calado e Garnés (2017) avaliaram a acurácia do EGM2008 e MAPGEO2015 para o município de Recife-PE por meio de 7 estações geodésicas; Guimarães, Matos e Blitzkow (2012) avaliaram os modelos mais recentes (à época da pesquisa) derivados da missão GOCE, foram utilizadas 176 estações geodésicas contidas no estado de São Paulo; Melo e De Freitas (2012) estudaram a adequação de modelos somente satélites, GRACE e GOCE, e os combinados, EIGEN-05C e EGM2008, para os estados do Maranhão e Piauí a partir de 47 estações geodésicas.

Para todo o território brasileiro, é possível acessar junto ao ICGEM os resultados de avaliações de MGGs, também com avaliação GNSS(GPS)/Nivelamento. Em uma consulta filtrada à página do ICGEM, considerando grau máximo de desenvolvimento maior que 300 e RMS (*Root Mean Square*) menor que 50 cm, 13 MGGs combinados figuram com a melhor adequação ao território brasileiro. O RMS é calculado pela avaliação GNSS/ Nivelamento e para

o Brasil os dados que possibilitaram o cálculo do RMS foram cedidos pelo Centro de Estudos de Geodesia (CENEGEO) (ICGEM, 2019a) (TABELA 1).

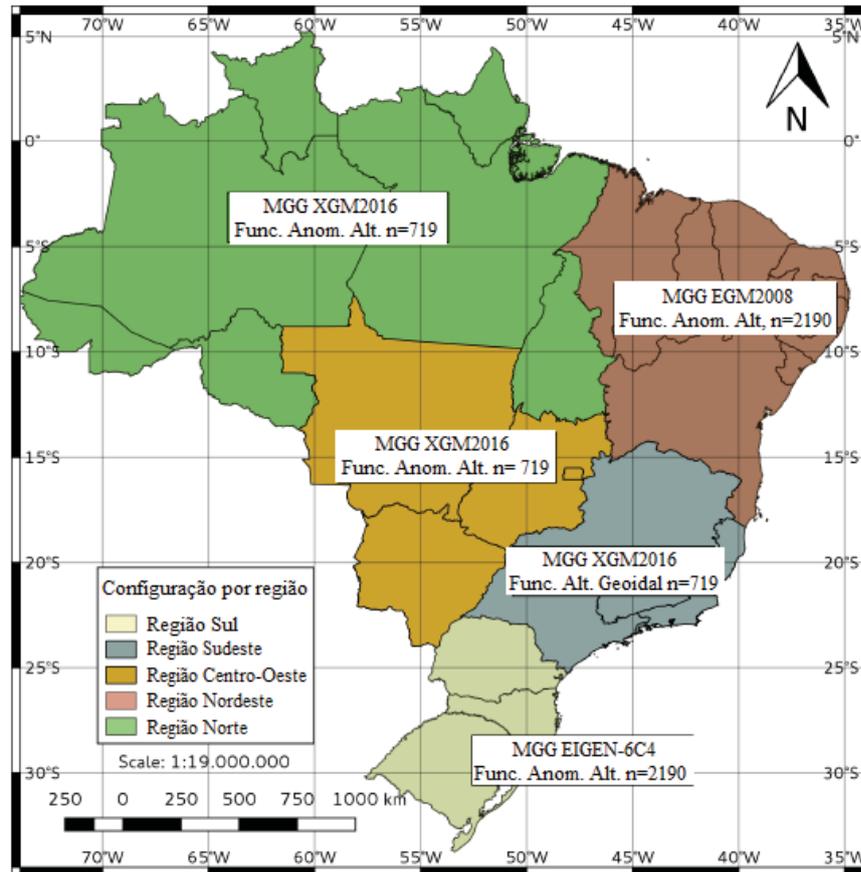
TABELA 1 – MGG COM MELHORES RESULTADOS PARA O BRASIL NA AVALIAÇÃO GNSS/NIVELAMENTO

Nr.	Modelo	Fonte	Grau máximo	RMS Brasil (m)	RMS Mundo (m)
176	XGM2019e_2159	A, G, S (GOCO06s), T	2190	0,438	0,236
161	XGM2016	A, G, S (GOCO05s)	720	0,440	0,249
131	EIGEN-6C2	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	1949	0,445	0,237
154	GOCO05c	A,G,S	720	0,445	0,254
167	SGG-UGM-1	EGM2008, S (Goce)	2159	0,446	0,235
148	EIGEN-6C4	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	2190	0,446	0,236
139	EIGEN-6C3stat	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	1949	0,447	0,237
125	EIGEN-6C	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	1420	0,448	0,238
152	GECO	EGM2008, S (Goce)	2190	0,451	0,237
104	EGM2008	A, G, S(Grace)	2190	0,460	0,240
153	GGM05C	A, G, S (Goce, Grace)	360	0,461	0,305
126	GIF48	A, G, S(Grace)	360	0,474	0,306
114	EIGEN-51C	A, G, S (Champ, Grace)	359	0,476	0,322

FONTE: ICGEM (2019a).

Nicacio, Dalazoana e De Freitas (2018), indicam que os modelos GOCO05c e XGM2016 apresentam uma melhor adequação ao Brasil, em uma análise relativa até o grau de desenvolvimento 720, dentre os modelos globais mais recentes avaliados. Adicionalmente, os autores apresentam um estudo precursor ao avaliar a configuração, o modelo e a funcional do geopotencial com melhores resultados para cada região brasileira (FIGURA 11). Foram investigadas as funcionais, anomalia de altitude e altitude geoidal, com testes com os graus de desenvolvimento, 360, 720 e 2190 dos modelos: XGM2016, GOCO05C, EIGEN-6C4 e EGM2008.

FIGURA 11 – RECOMENDAÇÕES DE MGGs PARA REGIÕES DO BRASIL



FONTE: Adaptado de NICACIO; DALAZOANA; DE FREITAS (2018).

É relevante destacar que o estudo dos autores supracitados foi realizado antes da modernização da componente vertical brasileira, à época da pesquisa a Rede Vertical de Referência do Brasil (RVRB) era composta por altitudes normais-ortométricas que em sua concepção consideravam o nivelamento geométrico combinado com a modelagem do campo de gravidade a partir da correção teórica do não paralelismo das superfícies equipotenciais (IBGE, 2011). Por isso a necessidade de discutir sobre a melhor funcional para a modelagem, anomalia de altitude ou altitude geoidal, tendo em vista a definição do sistema altimétrico nacional (FERREIRA; ZHANG; DE FREITAS, 2013).

Em agosto de 2018 o IBGE disponibilizou para a comunidade usuária de dados geodésicos, os resultados e a primeira edição do relatório do “Ajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais (REALT)”. A instituição divulgou os novos valores de altitudes da RVRB que conta agora com altitudes normais derivadas de números geopotenciais. A oficialização do sistema altimétrico com altitudes

normais deixou para trás o impasse apresentado acima, dessa forma, a separação da superfície de referência das altitudes normais (o quase-geoide) ao elipsoide é dada pela anomalia de altitude.

### 2.3.3 Uso e aplicações dos modelos

O cálculo de funcionais do campo de gravidade não é relevante somente para a área de Geodésia, mas também para demais áreas de geociências. Tais como, geofísica, glaciologia, hidrologia, oceanografia e climatologia. Ince et al. (2019) destacam alguns exemplos de aplicação destas funcionais para: o estabelecimento de *Data* verticais globais; o monitoramento de distribuição de massas que são indicadores de mudanças relacionadas ao clima; a simulação de forças perturbadoras em veículos espaciais e predição de órbitas; a exploração da estrutura interna e geológica do planeta Terra; exploração mineral; dentre outros apresentados no QUADRO 1.

QUADRO 1 – APLICAÇÕES DA MODELAGEM DO CAMPO DE GRAVIDADE

<b>Modelos estáticos do campo de gravidade</b>	<b>Modelos temporais/ dinâmicos do campo de gravidade</b>
<b>Geodésia:</b> - Modelagem de geoides regionais - Definição para unificação de <i>Data</i> verticais	<b>Geodésia:</b> - Monitoramento de alterações nos modelos estáticos do campo de gravidade - Monitoramento de alterações nos modelos geoidais regionais
<b>Oceanografia:</b> - Monitoramento de variações do nível do mar - Referência para topografia da superfície do mar - Estimativa de correntes geostróficas nos oceanos	<b>Hidrologia:</b> - Monitoramento interanual, sazonal e sub-sazonal da distribuição de massa d'água - Monitoramento do derretimento de geleiras - Monitoramento de variações de águas subterrâneas
<b>Geofísica:</b> - Monitoramento da distribuição de densidade de massas - Monitoramento de processos no manto e isostasia	<b>Atmosfera:</b> - Monitoramento de variações interanuais e sazonais
	<b>Geofísica:</b> - Monitoramento do Ajustamento isostático glacial - Detecção antes e após redistribuição de massas sísmicas

FONTE: Adaptado de INCE et al. (2019).

## 2.4 MODELOS GLOBAIS OCEÂNICOS (MGO)

Os Modelos Globais derivados de observações da Dinâmica do Nível do Mar, aqui neste trabalho designados como MGOs e demais produtos com o objetivo de construir o conhecimento sobre a dinâmica oceânica são calculados a partir de observações de satélites altímetros. Nesta seção serão apresentados: uma breve explanação sobre a técnica de altimetria por satélites, alguns modelos MGOs, produtos derivados da técnica e as especificações dos modelos de MSS e LAT.

### 2.4.1 Altimetria por satélite

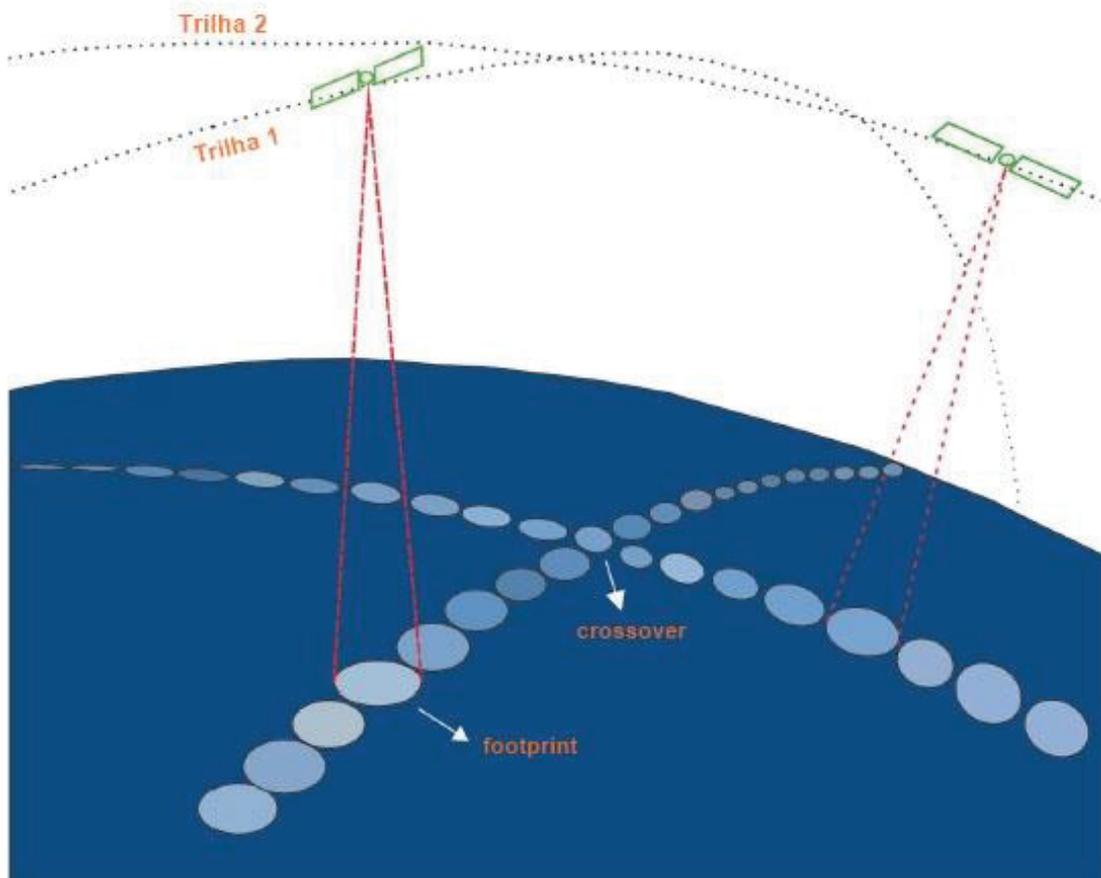
As medidas fornecidas pelos satélites altímetros são provenientes das distâncias calculadas a partir do conhecimento do tempo de partida e retorno do pulso emitido pelo radar até a superfície dinâmica do mar, em inglês, o *range* (AVISO, 2019a). O *range* ( $R$ ) é calculado segundo a equação (5) em função do tempo de percurso do sinal ( $\Delta t$ ) e da velocidade de propagação ( $c$ ) (SEEBER, 2003).

$$R = c \frac{\Delta t}{2} \quad (5)$$

A onda eletromagnética emitida pelo altímetro sofre algumas interações que levam a necessidade de correções aos valores de  $R$  medidos, tais como, correções pelos desvios do pulso na ionosfera e na troposfera, correções da superfície oceânica pela polarização magnética da onda, correções geofísicas relativas as marés e as correções atmosféricas devido a resposta dos oceanos a atmosfera, que são elas: correção do barômetro inverso (baixa frequência) e correção dinâmica da atmosfera (alta frequência) (ABLAIN et al., 2016).

A radiação do sinal do altímetro atinge uma região da superfície do oceano com um raio de alguns quilômetros, este raio é conhecido como *footprint* (pegada). A trajetória percorrida pelo satélite também é chamada de trilha e o encontro destas trilhas são os *crossovers* (FIGURA 12). Eles permitem um processo de ajustamento de dados em pontos nos quais uma trilha ascendente do altímetro intercepta a outra trilha descendente ou sobre a intersecção de trilhas de duas ou mais missões distintas, este ajustamento permite uma estimativa do erro de medição (CARRIÓN, 2017).

FIGURA 12 – ALTIMETRIA POR SATÉLITE



FONTE: Adaptado de CARRIÓN (2017).

A quantidade de interesse em oceanografia e nas demais ciências que utilizam as observações provenientes da altimetria por satélite é a altitude da superfície instantânea do mar com relação a uma superfície fixa, comumente convencionada pelo elipsoide de referência. Esta quantidade é chamada de *Sea Surface Height* (SSH), e de maneira simplificada é composta pela diferença entre a altitude elipsoidal ( $h^{sat}$ ) do satélite e o R, então:  $SSH = h^{sat} - R$ . A altitude elipsoidal do satélite altímetro é obtida a partir do conhecimento de sua órbita precisa em uma combinação de modelagem acurada da dinâmica do movimento de satélites e também pelo georreferenciamento a partir das técnicas espaciais como GNSS, DORIS (*Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite*) ou SLR (*Satellite Laser Ranging*) (ABLAIN et al., 2016).

#### 2.4.2 MGOs disponíveis e produtos derivados

Os MGOs e demais produtos derivados são disponibilizados por diferentes instituições e alcançam uma longa variação temporal, já que as observações da técnica de altimetria por satélite estão disponíveis desde meados da década de 90. Cita-se três diferentes instituições com seus respectivos modelos derivados da altimetria por satélite, cada um dos produtos apresentam um tipo de aplicação, uma estratégia de processamento distinta e uma época estabelecida:

- a) OpenADB (*Open Altimeter Database*): Mantida pelo Instituto Alemão de Pesquisa Geodésica (DGFI - *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*) da Universidade Técnica de Munique (TUM - *Technische Universität München*). O OpenADB atende usuários com pouca experiência em altimetria por satélite e usuários especialistas que avaliam os dados, geram novos produtos, modelos e algoritmos. Os produtos disponíveis nesta base de dados são: perfis de SSH, Anomalias do Nível do Mar (SLA – *Sea Level Anomalies*), Perfis da Topografia Dinâmica Instantânea do Oceano (iDOT – *Instantaneous Dynamic Ocean Topography Profiles*), Modelo empírico da maré oceânica (EOT – *Empirical Ocean Tide Model*) e Conteúdo Total Vertical de Elétrons (VTEC – *Vertical Total Electron Content*) (DGFI, 2019).
  
- b) DTU Space: É um instituto dinamarquês de pesquisas que engloba disciplinas da Engenharia e das Ciências Naturais, este instituto é vinculado a Universidade Técnica da Dinamarca (DTU – *Danmarks Tekniske Universitet*). Em serviço FTP disponibiliza vários produtos provenientes de pesquisas desenvolvidas pela instituição. São produtos disponibilizados: Dados do Nível do Mar no Ártico, Estimativas da alteração do Nível do Mar, Modelos Globais de Batimetria (*DTU Bathymetry*), Modelos Globais do Campo de Gravidade (*DTU Ocean wide gravity Field Mapped*), Modelos Globais de Marés Oceânicas (*DTU Global Ocean Tide Model*), Modelos da Topografia Dinâmica do Mar (*DTU Mean Dynamic Topography*), Modelos Globais da Superfície Média do Mar (*DTU Ocean wide Mean Sea Surface*) e Modelo da superfície LAT (DTU, 2019a).

c) Aviso+: É um portal de distribuição de dados produzidos pelo CLS (*Collecte Localisation Satellites*) com suporte pelo CNES (*Centre National d'Études Spatiales*). Neste portal estão disponíveis algumas opções para a obtenção dos produtos, são eles: o *Gridded Data Extraction Tool*, o acesso ao FTP ou pelo OpenDAP. Os principais produtos de acesso no portal são SSH de distintas missões de satélites altímetros, indicadores oceânicos, produtos auxiliares, entre outros. Dentre os produtos auxiliares que são de importância no contexto deste estudo, pode-se destacar os Modelos de Marés, Modelos de MSS, Modelos de TNMM e Modelos de Correções da Dinâmica Atmosférica (MERTZ et al., 2019).

#### 2.4.3 Modelos da MSS e LAT

Dentre os MGOs, os principais para esta pesquisa são os modelos de MSS e LAT. Uma vantagem, dos modelos de MSS e LAT mais recentes, é que eles alcançaram nos últimos anos uma série temporal compatível com a estabelecida para definição dos referenciais verticais oceânico e terrestre, porque foram gerados a partir de uma série temporal de dados maior que 18,6 anos, o que garante um ciclo de nutação completo. Isso porque na parte oceânica, as definições modernas e o objetivo de unificação do referencial pela modelagem da superfície LAT com pelo menos 18,6 anos de observações do nível do mar é um requisito (IHO, 2008). Da mesma forma, no referencial terrestre, o procedimento mais aceito na teoria clássica para definição do referencial vertical perpassava pela exigência dos mesmos 18,6 anos de observações do nível do mar (LUZ; GUIMARÃES, 2003).

Com essas características, existem os modelos com resolução de até 1'x1': MSS\_CNES\_CLS15, DTU\_15\_MSS, DTU\_18\_MSS e o DTU\_15\_LAT. Eles se destacam em comparação com os seus respectivos modelos precedentes. Uma vantagem dos modelos da MSS, por exemplo, é a disponibilização da estimativa do erro, já uma desvantagem é o elipsoide de referência do modelo que é o elipsoide T/P. Uma síntese das características dos modelos é apresentada no QUADRO 2.

QUADRO 2 – SÍNTESE DAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS MODELOS

Modelo	MSS_CNES_CLS15	DTU_15_MSS	DTU_18_MSS	DTU_15_LAT
Período de referência	20 anos (1993-2012)	20 anos (não identificado)	20 anos (não identificado)	19 anos (2000-2019)
Fonte de dados	Perfis médios: T/P, ERS-2, GFO, Jason-1, Jason-2 e Envisat. Fases geodésicas: ERS-1, Jason-1 e Cryosat-2 <sup>3</sup>	Perfis médios: T/P, Jason 1, Jason 2, ERS1, ERS2 e SARAL <sup>4</sup> . Fases geodésicas: Cryosat-2, Jason 1 e SARAL.	Perfis médios: T/P, Jason 1, Jason 2, ERS1, ERS2, SARAL e Sentinel 3A. Fases geodésicas: Cryosat-2, Jason 1 e SARAL.	DTU_10_GOT: missões T/P, Jason 1, Jason 2, GFO e Envisat.
Elipsoide de Referência	Elipsoide T/P	Elipsoide T/P	Elipsoide T/P	WGS84
Sistema de maré permanente	Não identificado	<i>Mean tide</i>	<i>Mean tide</i>	<i>Tide free</i>
Resoluções disponíveis	1'x1'	1'x1', 2'x2' e 5'x5'	1'x1' e 2'x2'	1'x1'
Cobertura Geográfica	80°S e 84°N	88°S e 88°N	Não identificado	Não identificado
Acesso aos modelos	Aviso +	DTU Space	DTU Space	DTU Space

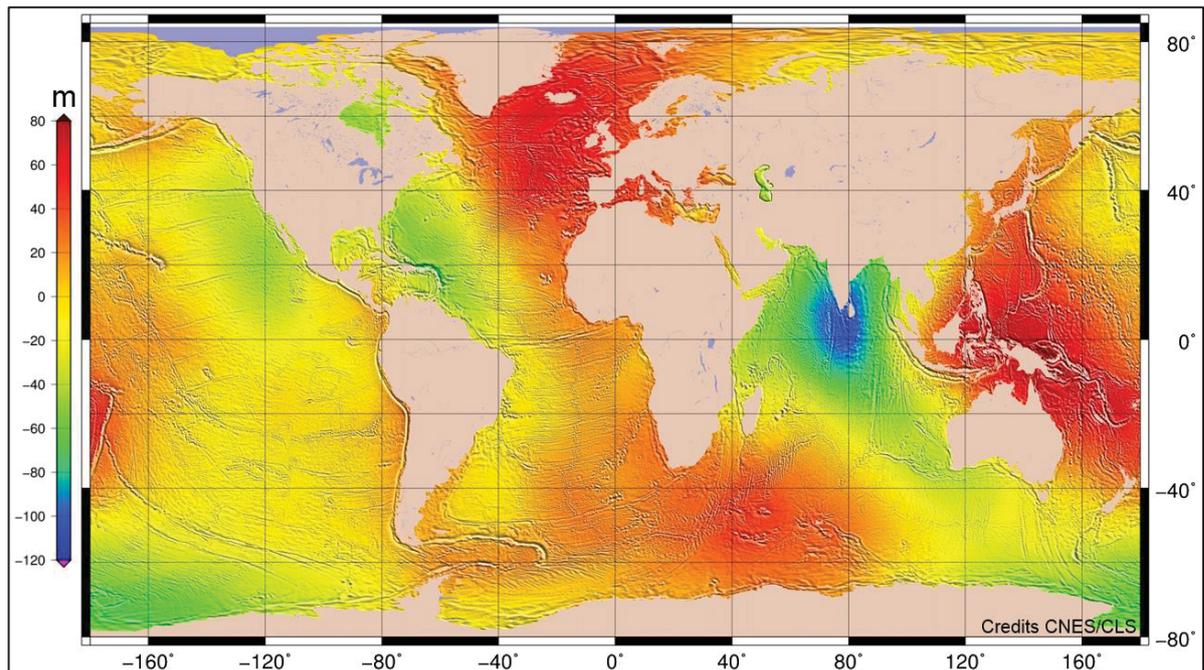
FONTE: CHENG E ANDERSEN (2011), ANDERSEN et al. (2016), ANDERSEN et al. (2018) e AVISO (2019b).

Para o modelo MSS\_CNES\_CLS15, a estimativa dos erros somente foi possível por meio da calibração dos resultados a partir da análise dos pontos de *crossovers*. Por fim, é importante destacar que os resultados dos modelos levam em consideração o ruído do altímetro, o ruído de variabilidade oceânica e os desvios ao longo do caminho percorrido pelo pulso laser emitido. Além disso, com o objetivo de manter uma precisão melhor em regiões de costa um processamento específico dos dados foi realizado (AVISO, 2019b). Uma representação do modelo pode ser visualizada na FIGURA 13.

<sup>3</sup> Cryosat-2 - *Earth Explorer Opportunity Mission-2*

<sup>4</sup> SARAL - *Satellite with ARGos and ALtika*

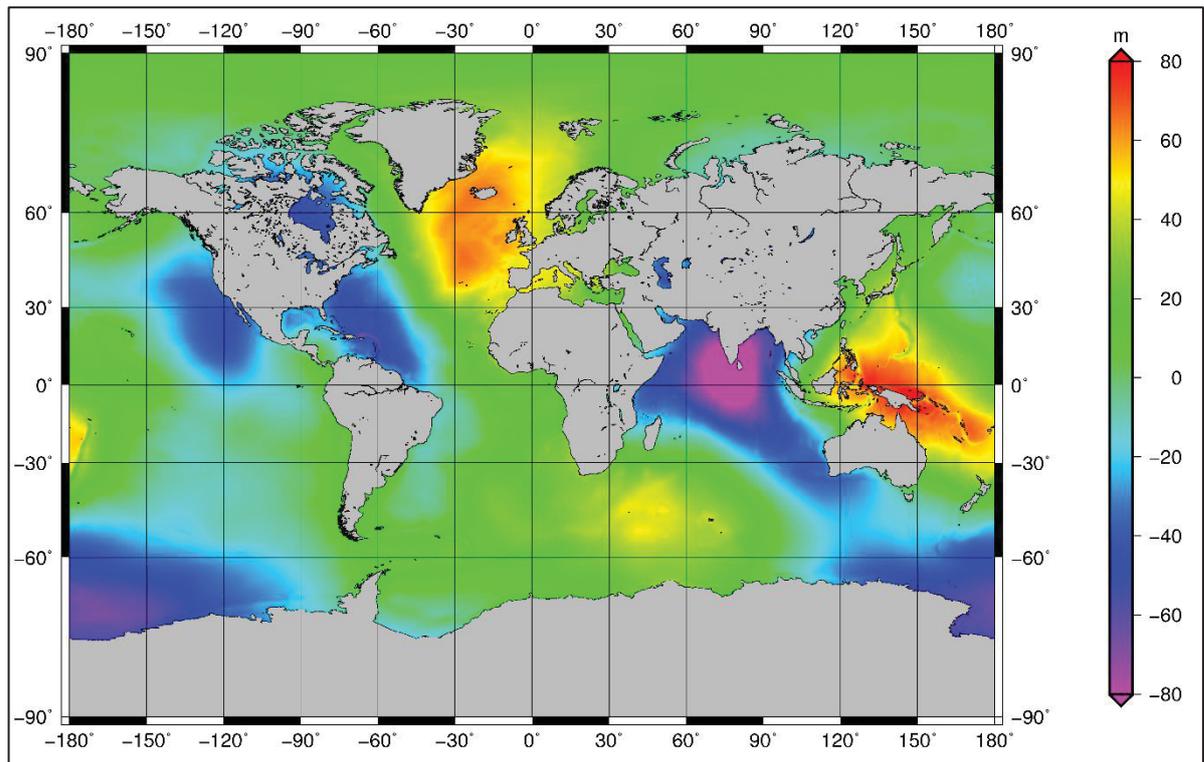
FIGURA 13 – MSS\_CNES\_CLS15



FONTE: AVISO (2019b).

Dentre os modelos produzidos pelo DTU Space da Universidade Técnica da Dinamarca, o DTU\_15\_MSS configura-se como uma melhoria em comparação ao antecedente (DTU\_13\_MSS) com a adição de registros de dados de 4 anos da missão Cryosat-2 (FIGURA 14). No DTU\_18\_MSS foram adicionados mais 4 anos da mesma missão, totalizando 8 anos de dados que foram reprocessados; os perfis médios das missões T/P, Jason 1 e Jason 2 tiveram os longos comprimentos de ondas corrigidos; houve uma atualização dos valores em regiões costeiras com o uso de perfis médios de 2 anos do Sentinel 3A, T/P, Jason 1, Jason 2; e a variabilidade dos oceanos foi removida das missões geodésicas (ANDERSEN et al., 2016; ANDERSEN et al., 2018).

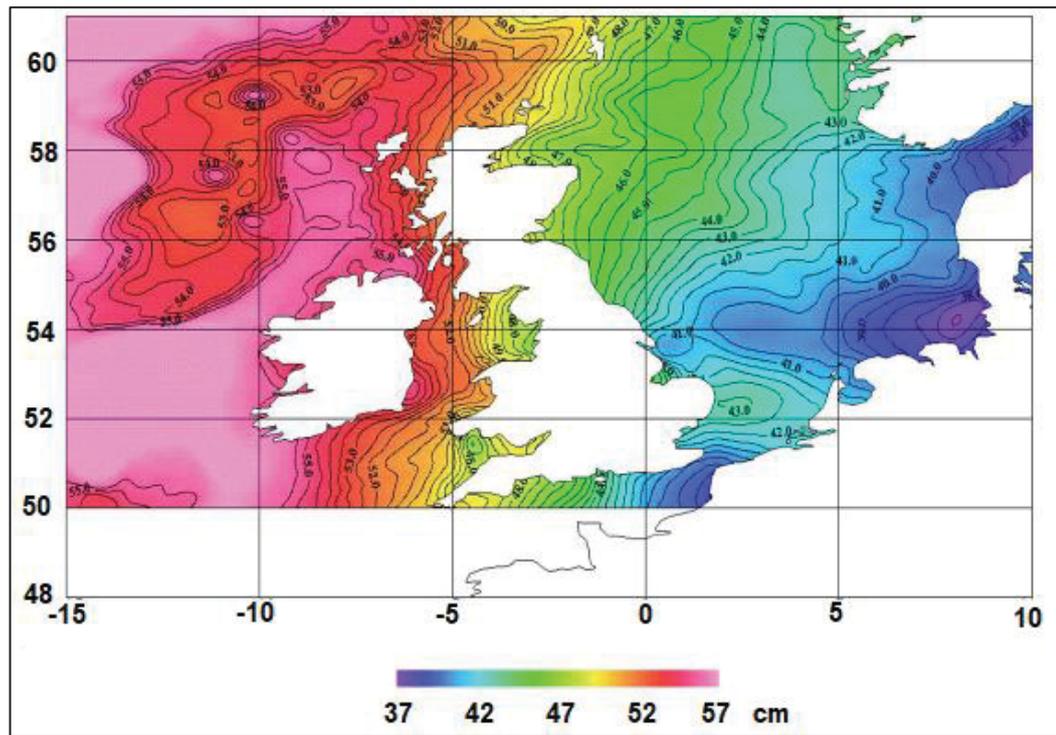
FIGURA 14 – DTU\_15\_MSS



FONTE: DTU (2019b).

Já o DTU\_15\_LAT é uma nova superfície de referência vertical para a parte oceânica derivada do DTU\_15\_MSS e do DTU10/Modelo Global de Maré Oceânica (DTU\_10\_GOT). O DTU\_10\_GOT foi compilado a partir de um período de 19 anos (2000 a 2019) e a profundidade mínima foi encontrada (ANDERSEN et al., 2016) (FIGURA 15). O DTU\_10\_GOT é derivado de multimissões da altimetria por satélite, para o cálculo foram utilizadas as missões T/P, Jason 1, Jason 2, GFO e Envisat que combina os dados de 1993 a 2010, este modelo é uma extensão do FES2004 (*Finite Element Solutions 2004*) e seus resultados compreendem a cobertura geográfica de 82°S a 82°N (CHENG; ANDERSEN, 2011).

FIGURA 15 – RECORTE DO DTU\_15\_LAT PARA A REGIÃO DA EUROPA



FONTE: ANDERSEN et al. (2016).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentadas algumas discussões com relação a extensão e a escolha das áreas de estudo propostas para a realização desta pesquisa, os principais materiais são descritos, e por último, os métodos que foram aplicados são expostos e esquematizados.

#### 3.1 ÁREAS DE ESTUDO

Tendo em vista que na integração dos referenciais um ponto importante são as observações maregráficas, e levando em conta os novos entendimentos no conceito de *Data* verticais e a vindoura Rede Internacional de Altitudes, o IHRF, a escolha das áreas de estudo ponderou pelas duas EMs que abrigarão no futuro estações IHRF: as EMs situadas em Fortaleza-CE e Imbituba-SC (FIGURA 16).

FIGURA 16 – MAPA DAS ÁREAS DE ESTUDO COM DIMENSÃO DE 5°X5° CONTADOS A PARTIR DAS EMs



FONTE: O autor (2020).

Com relação a dimensão da área de estudo, entende-se que ela pode ser condicionada pela disponibilidade de dados e a aplicação da pesquisa em desenvolvimento, dessa maneira, uma alternativa seria ponderar a escolha do dimensionamento baseado nas especificações requeridas para o estudo. Para esta pesquisa que tem como objetivo contribuir com a integração de referenciais verticais terrestre e oceânicos, o que induz a futura necessidade de modelagem geoidal, seguiu-se o mesmo entendimento encontrado em Palmeiro (2011) que optou por uma área de  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  pela maior quantidade de dados geodésicos disponível. A escolha foi ponderada principalmente pela quantidade de gravimetria oceânica, que apesar de não ser fonte de dados direta para o desenvolvimento deste estudo, certamente será importante para futura integração das componentes verticais em região costeira.

A escolha da dimensão das áreas estudadas perpassou pelas possibilidades de retângulos envolventes de  $1^{\circ}$ ,  $2^{\circ}$ ,  $3^{\circ}$ ,  $4^{\circ}$  ou  $5^{\circ}$  contados a partir das EMs. Para a aplicação de MGGs com grau e ordem de desenvolvimento maior do que 360, áreas de estudo de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  (aproximadamente  $110 \times 110$  km no equador), apresentaria boa adequação devido a resolução melhor que 55 km (FERREIRA, 2008). Assim sendo, como neste estudo os modelos utilizados possuem grau e ordem superior a 360, esta dimensão para as áreas de estudo seria suficiente.

Em consonância, no estudo elaborado por Jamur (2012) foram desenvolvidas estratégias para quantificação dos efeitos de massas anômalas na região do DVB-I, nele foi adotado uma área de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  que se apresentou satisfatória para evitar inconvenientes como os efeitos de borda nos produtos gerados pela autora. Equitativamente, observando apenas a necessidade do monitoramento das regiões costeiras, principalmente aquelas apresentadas como as ZCBE, que segundo Mcgranahan, Balk e Anderson (2007) se estendem até aproximadamente 100 km da costa, o tamanho da área de estudo referente a  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  também seria viável.

Em contrapartida, quando se trata da modelagem do geopotencial baseada na solução do Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG), áreas de estudos pequenas limitam os resultados da modelagem. Isso acontece porque muitas vezes as bases de dados não são homogêneas e não apresentam boa distribuição espacial. Por este motivo, como comentado anteriormente, Palmeiro (2011) expandiu sua área de estudo de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  para  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ , em um estudo também na região do DVB-I. A autora destaca que o principal problema foi a escassez de dados gravimétricos na parte oceânica, logo, trabalhar com uma área maior possibilitou uma quantidade maior de

observações de gravidade, por conseguinte, uma melhoria na resolução espectral do modelo utilizado.

Ainda com relação à modelagem do geopotencial, porém para a região do *Datum* vertical do Equador, Carrión (2017) testou dimensões de áreas de estudo distintas: 2°x2°, 3°x3° e 4°x4°. O autor destaca que a solução 4°x4° apresentou melhor desempenho porque foi com este limiar que se obtiveram dados gravimétricos terrestres, aéreos e oceânicos mais homogêneos. Uma outra diretriz é vista para as futuras estações do IHRF, para elas é recomendado um raio de 210 km em torno do ponto de cálculo (SANCHÉZ et al., 2016). A dificuldade é que a proposição da autora é baseada em estações que tenham configurações ótimas de distribuição de dados gravimétricos, uma realidade não encontrada em regiões do Brasil e nem em diversas partes do mundo.

Como o dimensionamento da área é importante principalmente para a realização do inventário de observações geodésicas, a escolha pela maior dimensão contempla os demais dimensionamentos apresentados pelos autores citados e promove a compreensão das informações geodésicas disponíveis em região costeira. Para as duas áreas de estudo se nota um crescimento expoente da quantidade de estações geodésicas à medida que se aumenta a extensão da área estudada (TABELAS 2 e 3).

TABELA 2 – INVENTÁRIO DOS DADOS GEODÉSICOS NA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA

EM de Fortaleza-CE	1°X1°	2°X2°	3°X3°	4°X4°	5°X5°
Estações Gravimétricas Oceânicas (BGI)	652	2021	3684	5369	6949
Estações Gravimétricas Terrestres (BGI)	33	73	108	135	172
Estações Gravimétricas Terrestres (IBGE)	361	710	948	1361	1799
Referências de Nível	612	1170	1761	2770	3963
Estações Maregráficas (BNDO)	2	3	4	6	8
Estações Maregráficas (RMPG)	1	1	1	1	1
Vértices de Triangulação	7	23	44	86	119
Estações GNSS	41	76	96	126	151
Estações de Poligonação	10	19	41	63	97
Estações Doppler	3	3	3	6	6
Total de Estações	1722	4099	6690	9923	13265

FONTE: O autor (2020).

TABELA 3 – INVENTÁRIO DOS DADOS GEODÉSICOS NA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA

EM de Imbituba-SC	1°X1°	2°X2°	3°X3°	4°X4°	5°X5°
Estações Gravimétricas Oceânicas (BGI)	17	220	779	1452	2107
Estações Gravimétricas Terrestres (BGI)	37	152	214	378	642
Estações Gravimétricas Terrestres (IBGE)	398	1118	1572	1844	1977
Referências de Nível	223	549	1069	1551	2159
Estações Maregráficas (BNDO)	3	6	11	16	18
Estações Maregráficas (RMPG)	1	1	1	1	1
Vértices de Triangulação	8	41	72	100	161
Estações GNSS	14	34	67	86	127
Estações de Poligonação	9	12	15	23	27
Estações Doppler	0	2	3	5	10
Total de Estações	710	2135	3803	5456	7229

FONTE: O autor (2020).

### 3.1.1 Área de estudo 1: Região da Estação Maregráfica de Fortaleza-CE

A área de estudo 1 é delimitada no entorno da EM de Fortaleza-CE. Dentre as estações da RMPG é a que apresenta menor variabilidade sazonal das observações do nível do mar e é a implantada mais recentemente. Possui uma estação de controle geodésico a 600 m de distância, o que permitiu o estabelecimento da posição geocêntrica da EM e ainda possibilita aplicação de correções devido a movimentação da crosta terrestre (IBGE, 2013).

A EM de Fortaleza-CE contou com o início das operações junto a RMPG em setembro de 2007 e abril de 2008 com a instalação de sensores convencional e eletrônico, respectivamente (IBGE, 2013). Além do conjunto de observações no âmbito da RMPG, nesta região existem informações do nível do mar disponibilizado pelo Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Hawaii (UHSLC – *University of Hawaii Sea Level Center*). No banco de dados do UHSLC estão disponíveis três séries de dados, tendo como fonte o *US Coastal Geodetic Survey* (USCGS), Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), DHN e o IBGE. As séries temporais de dados disponíveis apresentam períodos de observações e taxas de coleta distintos (QUADRO 3).

QUADRO 3 – SÉRIES DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS DA EM FORTALEZA

EM	Fonte dos dados	Dados original	Taxa de coleta de dados	Período
Fortaleza (283a)	USCGS	Analógico	Hora em hora	1955-1968
Fortaleza (283b)	INPE	Digital	Hora em hora	1995-1998
Fortaleza (283c)	UHSLC/DHN/IBGE	Digital	2 minutos	2008-2015
Fortaleza	RMPG/IBGE	Analógico e Digital	5 minutos	2008-atual

FONTE: CALADO, GARNÉS e JAMUR (2018).

No relatório da “Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia” a EM de Fortaleza-CE retrata uma variação do NMM de 2,1 mm/ano (2008 - 2015) com variação altimétrica na região de -0,8 mm/ano (período não identificado). Em análise conjunta com o arcabouço de observações maregráficas apresentadas no QUADRO 3 foi apontada uma elevação de 0,6 mm/ano (2008-2018) e no mesmo estudo o movimento da crosta apresentou soerguimento de 0,8 mm/ano (2011-2018) ao invés de subsidência (IBGE, 2015; CALADO; GARNÉS; JAMUR, 2018).

### 3.1.2 Área de estudo 2: Região da Estação Maregráfica de Imbituba-SC

A área de estudo 2 é delimitada no entorno da EM de Imbituba-SC. Nesta estação a integração de dados maregráficos oriundos do USCGS, UHSLC e RMPG/IBGE indicou elevação de cerca de 3,10 mm/ano para o período de 1948 a 1968 e de 2001 a 2016 (QUADRO 4). É observada uma lacuna de dados de 1968 a julho de 2001, o que dificulta uma análise da evolução temporal do nível do mar na região (DA SILVA; DE FREITAS, 2019). No relatório da “Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia” a EM de Imbituba indica elevação do nível do mar de 6,6 mm/ano (2001-2015) com variação altimétrica na região de -2,6 mm/ano (período não identificado).

QUADRO 4 – SÉRIES DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS DA EM IMBITUBA

EM	Originador dos dados	Taxa de coleta de dados	Período
Imbituba	USCGS	Mensais e anuais	1948-1968
	UHSLC	Horários e diários	2001-2007
	RMPG/IBGE	5 minutos	2006-atual

FONTE: DA SILVA (2017).

A estação possui os NREFs conectados a um referencial global, desde 2006, a partir de campanhas GNSS na estação SAT IMBI (DALAZOANA, 2006). E mais recentemente, a estação SAT IMBT da rede SIRGAS-CON foi conectada a partir de campanhas de posicionamento GNSS. As duas estações (IMBI e IMBT) foram conectadas por 17 dias de observações GNSS, adicionalmente valeu-se de métodos topográficos e de nivelamento de travessia (DA SILVA; DE FREITAS, 2019).

## 3.2 MATERIAL

Os dados geodésicos organizados neste estudo foram buscados em distintos bancos de dados: nacionais e internacionais. Todos eles foram espacializados no software de código aberto QGIS em sua versão 3.6 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019). Este tipo de software é fundamental para que sejam feitas operações de recorte, organização dos metadados e condiciona uma análise mais facilitada já que nele é possível a confecção dos mapas.

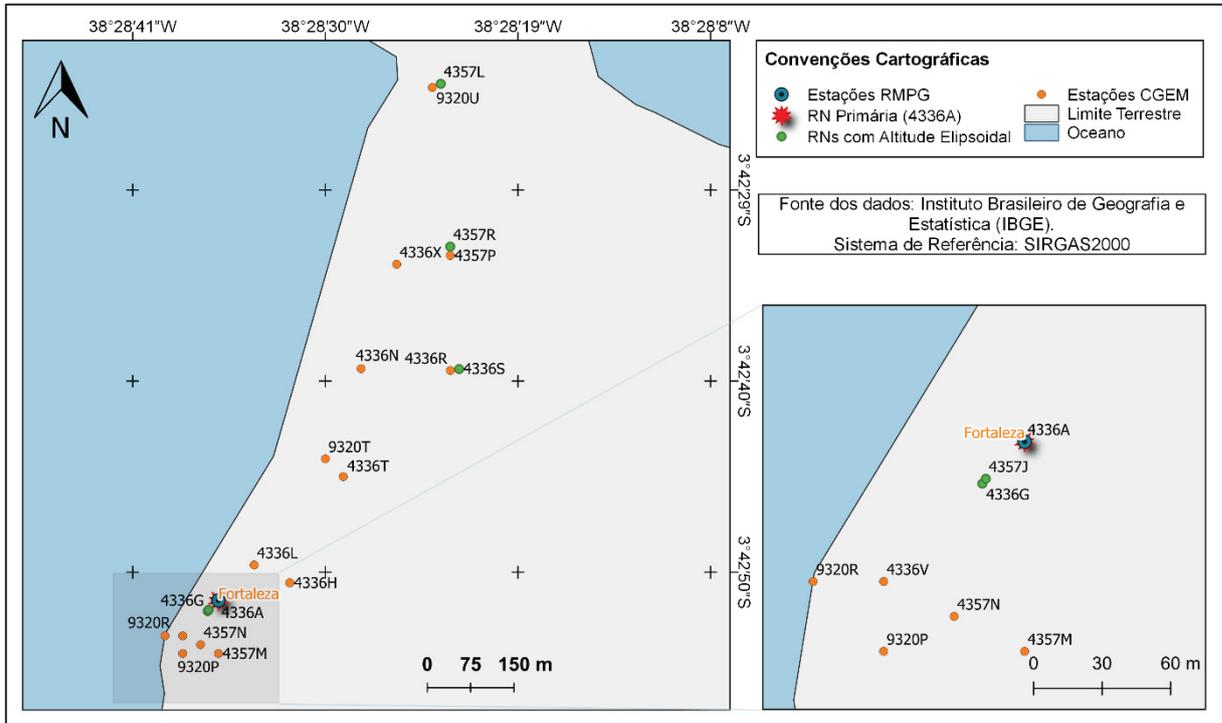
### 3.2.1 Estações Geodésicas

Dois conjuntos de estações do Controle Geodésico de Estações Maregráficas (CGEM) mantido pelo IBGE compõem o quantitativo de observações geodésicas para a realização deste estudo. O CGEM possui os objetivos de detectar e quantificar os movimentos verticais de origem não oceânica na região das EMs, além do suporte a determinação das coordenadas elipsoidais dos marcos geodésicos, a vantagem é que com o valor da altitude elipsoidal as observações maregráficas podem ser transformadas para o mesmo sistema de referência da altimetria por satélite, o que possibilita comparação e integração de observações geodésicas (IBGE, 2010).

Cada conjunto de estações forma uma rede de circuitos que são levantados periodicamente para o controle. O circuito referente a EM de Fortaleza possui 23 RNs e o de Imituba 24 RNs que compõem a rede de controle. Os circuitos são compostos pelas RNs primárias que estão conectadas aos NREFs locais e somente algumas das RNs possuem valores de altitude elipsoidais disponíveis. As FIGURAS 17 e 18 mostram uma representação espacial da localização das RNs no entorno das EMs de Fortaleza e Imituba, respectivamente. As coordenadas geodésicas, os desníveis

brutos, os desníveis ajustados e as altitudes normais-ortométricas<sup>5</sup> foram repassados por IBGE (2019c)<sup>6</sup> para o desenvolvimento do estudo.

FIGURA 17 – CONJUNTO DE ESTAÇÕES DO CGEM NA REGIÃO DA ÁREA DE ESTUDO 1

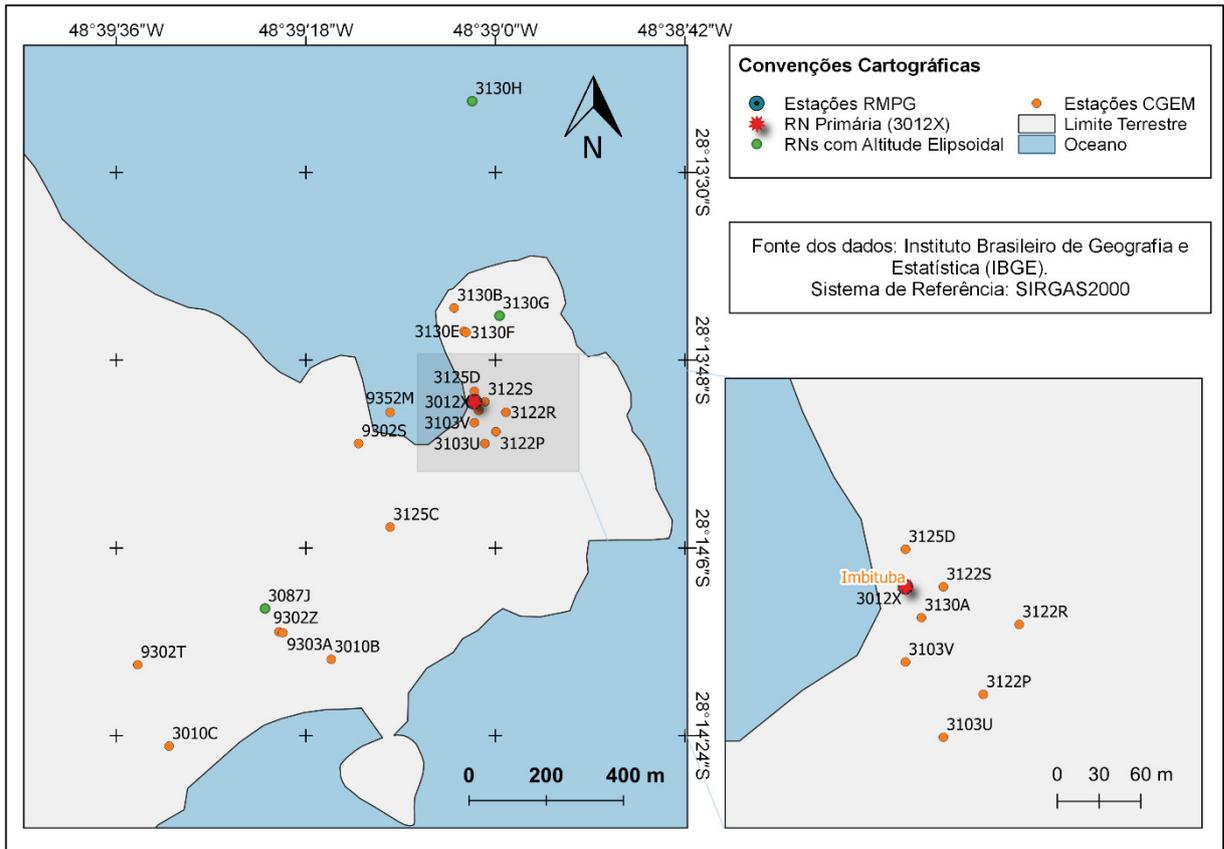


FONTE: O autor (2020).

<sup>5</sup> Até a data da consulta (20/08/2019) o IBGE ainda não havia disponibilizado valores de Altitudes Normais para o conjunto de estações CGEM.

<sup>6</sup> INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Solicitação de dados para desenvolvimento de atividades de pesquisa.** [Contato por e-mail]. Mensagem recebida por: <gustavo.h.siqueira@ibge.gov.br>. 20 ago. 2019c.

FIGURA 18 – CONJUNTO DE ESTAÇÕES DO CGEM NA REGIÃO DA ÁREA DE ESTUDO 2



FONTE: O autor (2020).

EMs operadas e geridas pela Marinha do Brasil também compõe informações importantes, elas foram obtidas a partir do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), em março de 2019, 173 EMs estavam disponíveis para acesso. Nas fichas de cada estação são apresentados: o respectivo diagrama, as coordenadas geográficas, os níveis de referência associados, o período de observações maregráficas utilizado para determinação das constituintes de maré, a descrição das RNs de referência, um croqui que apresenta a localização da estação e a descrição da régua de marés (CHM, 2019).

Na época da consulta, no BNDO havia disponível uma única informação em formato vetorial, um arquivo com a extensão “.kmz”. O arquivo apresentava 249 estações maregráficas com os respectivos nomes e códigos de identificação, porém no catálogo de diagramas de estações maregráficas havia apenas 173 EMs. De

acordo com Costa (2019)<sup>7</sup> a diferença é porque no catálogo de diagramas somente há EMs ativas, de outra parte, no arquivo “.kmz” aparecem também aquelas desativadas. Os níveis de referências dos 173 diagramas disponíveis foram digitados em uma planilha do Excel do *Microsoft Office* e posteriormente foi criado um arquivo “*shapefile*” a partir das coordenadas geográficas disponíveis. Esta ação possibilitou a espacialização dos dados e a consulta dos níveis de referência de maneira simplificada para uma futura análise espacial.

Como informações essenciais, dos diagramas foram extraídas as coordenadas geográficas, o código e nome da estação, se há ou não existência de RN do IBGE na proximidade e as diferenças de nível entre: o NMM e o NR, o zero da régua maregráfica e o NMM, o NMM e a RN e o zero da régua e a RN (em milímetros).

### 3.2.2 Modelos Globais do Geopotencial

Quanto aos MGGs, foram selecionados para compor esta pesquisa os modelos XGM2016 e XGM2019 por se tratarem de modelos precursores ao futuro EGM2020. E eles se apresentam como modelos inovadores por serem baseados em ponderação de dados, e além disso, apresentam os melhores resultados para regiões brasileiras (PAIL et al., 2017; ICGEM, 2019a). Os modelos EGM2008 e EIGEN-6C4 também fazem parte desta pesquisa, por serem os modelos indicados como aqueles que mais se adequam para as áreas de estudo, que estão nas regiões nordeste e sul do Brasil, conforme Nicacio, Dalazoana e De Freitas (2018).

O MGG EGM2008, a época de seu desenvolvimento e divulgação trouxe muita inovação científica pelo grau e ordem até 2190, antes não visto, configurando um marco histórico (NICACIO; DALAZOANA, 2017). O modelo apresentou melhorias com relação ao seu antecessor, o EGM96, de seis vezes em resolução e de três a seis vezes em acurácia. O modelo combinou dados do modelo ITG-GRACE03S, informações gravitacionais extraídas de um modelo de 5' de resolução espacial de anomalias de gravidade. Também compõe o conjunto de dados do modelo os dados terrestres, aerotransportados e as observações geodésicas provenientes de satélites altímetros (PAVLIS et al., 2012).

---

<sup>7</sup> COSTA, T. L. F. **Consulta – BNDO**. [Contato por e-mail]. Mensagem recebida por: <chm.bndo@marinha.mil.br>. 4 jul. 2019.

Semelhante ao modelo EGM2008, o modelo EIGEN-6C4 possui grau e ordem de desenvolvimento máximo de 2190. O modelo é o de maior resolução dos vinte e cinco modelos da família “EIGEN” que estão disponíveis no site do ICGEM. EIGEN é sigla para “*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*” ou em tradução livre “Modelo Europeu de Gravidade Terrestre Melhorado por Novas Técnicas”. O modelo é composto por dados SLR, GRACE, GOCE, além de dados terrestres utilizados a partir de uma grade regular de anomalias de gravidade de 2’ de resolução (FÖRSTE et al., 2014 apud NICACIO; DALAZOANA, 2017).

Em sequência a descrição sucinta dos MGGs, o modelo XGM2016 possui metodologia de cálculo apresentada em Pail et al. (2017). É um modelo parametrizado em harmônicos esféricos com grau e ordem 719 e o seguinte conjunto de dados: para a componente de gravimetria por satélite foi utilizado o modelo GOCO05s que possui mais de 10 anos de dados GRACE, o período completo da missão GOCE, órbitas cinemáticas de nove satélites em órbita baixa e seis satélites com alcance SLR, além de dados de satélites altímetros. Um avanço com relação aos demais MGGs foi a inserção de um conjunto de dados terrestre de anomalias de gravidade com resolução espacial de 15’. Em comparação com outros MGGs combinados, o XGM2016 apresentou melhorias quanto à adequação em regiões como América do Sul, África, Antártida e partes da Ásia.

Já o modelo XGM2019 possui dados de satélite preenchidos pelo modelo somente satélite GOCO6S (KVAS et al., 2019), dados oceânicos do DTU13 (DTU, 2019a), dados terrestres de altitudes obtidos a partir do modelo NGA16 com 15’ de resolução espacial, dados gravimétricos terrestres e aerotransportados. O XGM2019 é o primeiro MGG a superar o grau de desenvolvimento 2190, o modelo é desenvolvido até o grau e ordem 5540, desenvolvimento sem precedentes. De maneira geral, o desempenho do modelo diminui em regiões continentais a partir do grau e ordem 719 devido a modelagem em alguns locais ser apenas a partir de informações da topografia do terreno pela escassez de dados gravimétricos (GRUBER et al., 2019).

O QUADRO 5 apresenta um resumo dos MGGs utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. No quadro, a coluna grau/ordem descreve o grau e ordem escolhido para a aplicação, no caso do modelo XGM2019 o grau e ordem de desenvolvimento utilizado foi 2190 porque não foi possível o uso do grau e ordem máximos visto que não estava disponível na ferramenta de cálculo do ICGEM. Os

demais modelos foram utilizados em grau e ordem de desenvolvimento máximo. Além destas informações, as fontes de dados para os cálculos, os anos de publicação dos modelos e a principal referência disponível são apresentados no quadro.

QUADRO 5 – RESUMO DOS MODELOS GLOBAIS DO GEOPOTENCIAL UTILIZADOS NA PESQUISA

Modelo	Ano	Grau/Ordem	Fonte de dados	Referências
EGM2008	2008	2190	A, G, S(Grace)	Pavlis et al. (2012)
EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	Förste et al. (2014)
XGM2016	2017	719	A, G, S(GOCO05s)	Pail et al. (2017)
XGM2019_e	2019	2190*	A, G, S(GOCO06s), T	Gruber et al. (2019)

FONTE: ICGEM (2019a).

NOTA: \*O MGG XGM2019\_e possui grau e ordem máximos de desenvolvimento até 5540, porém foi utilizado na pesquisa até o grau e ordem 2190.

### 3.2.3 Modelos da MSS e LAT

A aquisição dos dados de modelos globais da MSS consiste em uma etapa que requer um esforço para a manipulação de arquivos em formato binário ou em outras extensões, tais como o *Network Common Data Form* (NETCDF). O que também configura um desafio é que a depender do tamanho da área de estudo o volume de linhas se torna grande. Por exemplo, uma área com dimensão de 5°x5° espaçada de 1' em 1' resulta numa matriz de dados de 301x301 células que em um arquivo texto geraria 90601 linhas.

Para esta pesquisa, alguns modelos de MSS foram utilizados, o primeiro deles, o modelo da MSS desenvolvido por CNES/CLS e o respectivo modelo contendo os erros estimados foram extraídos, para as áreas de estudo 1 e 2, utilizando o *Gridded Data Extraction Tool* (FIGURA 19). Nesta aplicação, o arquivo de saída selecionado foi o NETCDF, a seleção da região de interesse foi baseada na inserção de coordenadas geográficas do retângulo envolvente, os valores de MSS são definidos em metros e os erros estimados em centímetros. A manipulação dos arquivos para a migração de um arquivo NETCDF para arquivo de texto convencional na extensão “.txt” foi realizada no software MATLAB (versão R2013B), com licença do Laboratório de SIG e Geoprocessamento (SIGEO) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

FIGURA 19 – GRIDDED DATA EXTRACTION TOOL

Inventory > Download

**DATASET-MSS-CNES-CLS15-GLOBAL**

**SELECTION**

Select output: NetCDF

Select region: Product Region

Select time range: 2015-01-01 to 2015-01-01

83.99999999  
0 -79.5 -0.01666666

**VARIABLE**

DOWNLOAD	NAME	DESCRIPTION	STANDARD NAME	UNIT	DIMENSIONS
<input type="checkbox"/>	mss	Mean sea surface CNES CLS 2015	sea_surface_height_above_reference_ellipsoid	m	(time, NbLongitudes, NbLatitudes)
<input type="checkbox"/>	mss_err	Error of the Mean sea surface CNES CLS 2015	-	cm	(time, NbLongitudes, NbLatitudes)

Download Script

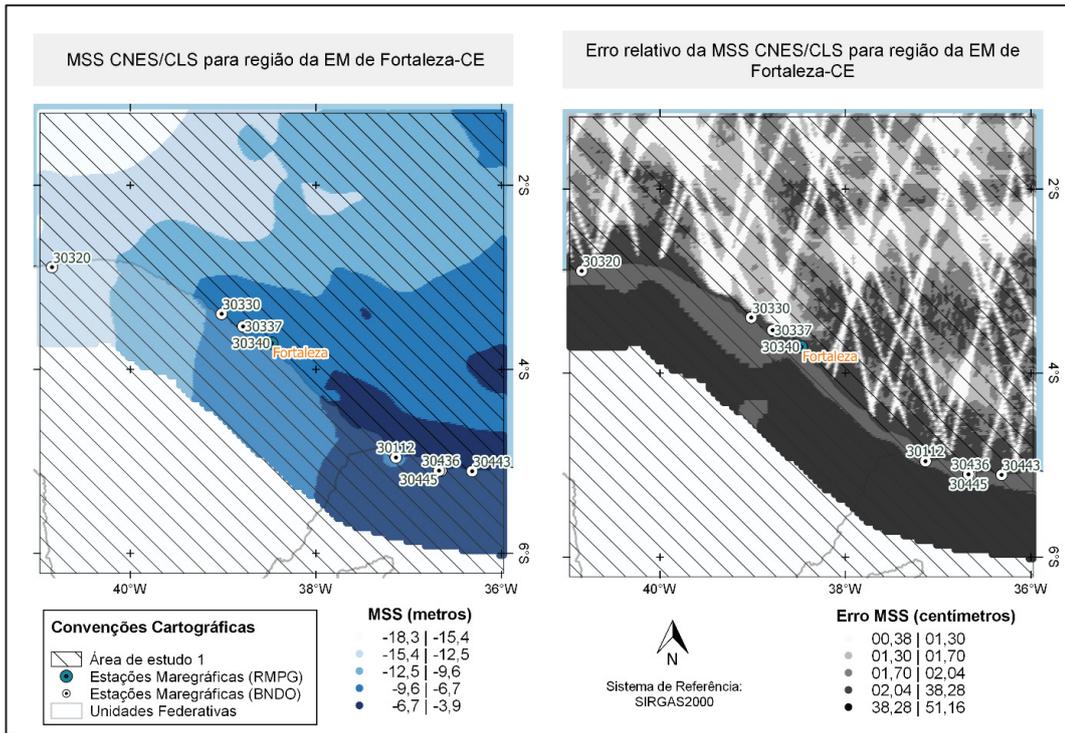
FONTE: O autor (2020).

Com os arquivos de texto contendo os modelos foi procedida a importação dos dados para o QGIS e os modelos são visualizados nas FIGURAS 20 e 21. Para a área de estudo 1 as altitudes da MSS variam de -18,30 a -3,85 m, com erros estimados entre 0,38 a 51,16 cm. Em contrapartida, para a área de estudo 2 as altitudes da MSS variam de -5,34 a 7,57 m, com erros estimados entre 0,37 a 32,90 cm. Vale ressaltar que são valores de altitudes referidos ao elipsoide T/P e o sistema de maré permanente não foi identificado.

Faz-se necessário destacar que os modelos da MSS possuem valores de altitudes em regiões terrestres. Isso ocorre porque a computação de um modelo global é demasiadamente morosa, e para que isso não ocorresse seria necessário que todas as linhas de costa estivessem bem definidas e isso ainda é uma dificuldade, por isso os modelos são extrapolados para regiões não oceânicas (ANDERSEN, 2019<sup>8</sup>). Um aspecto positivo é que a extrapolação permite que se interpole valores dos modelos para as EMs, principalmente tendo em vista que as estações são fixadas em locais de interação oceano/continente (DTU, 2010).

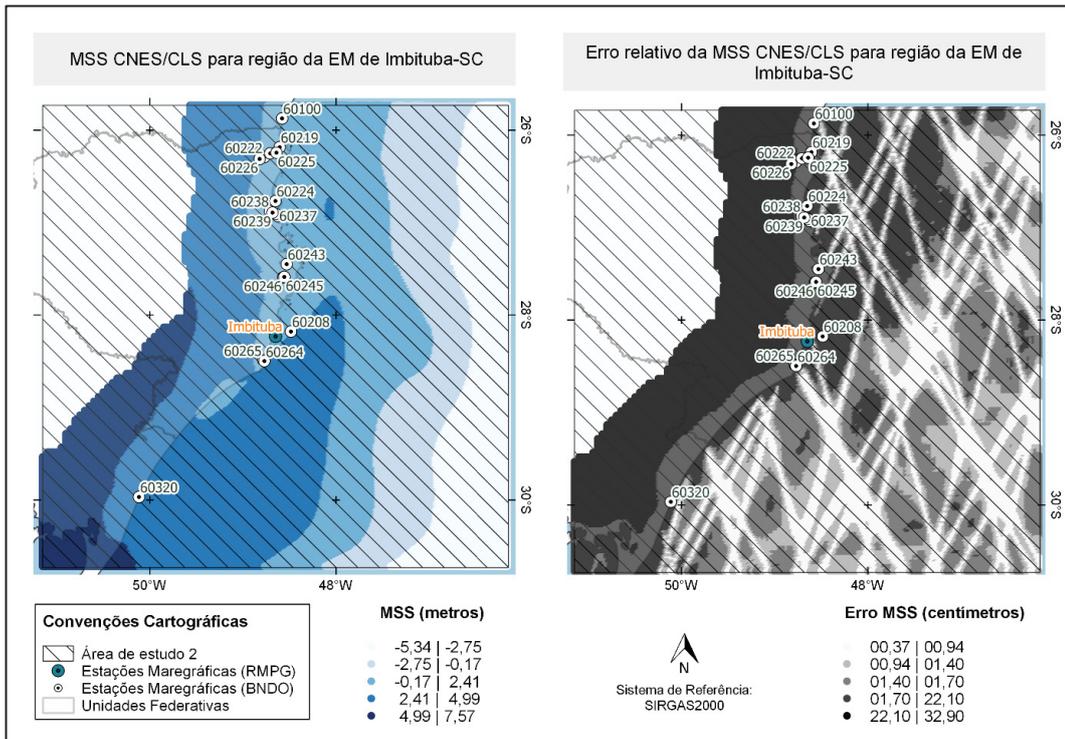
<sup>8</sup> ANDERSEN, O. B. **Clarification of doubts (DTU models)**. [Contato por e-mail]. Mensagem recebida por: <oa@space.dtu.dk>. 13 ago. 2019.

FIGURA 20 – MAPA DA MSS CNES/CLS PARA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 21 – MAPA DA MSS CNES/CLS PARA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA



FONTE: O autor (2020).

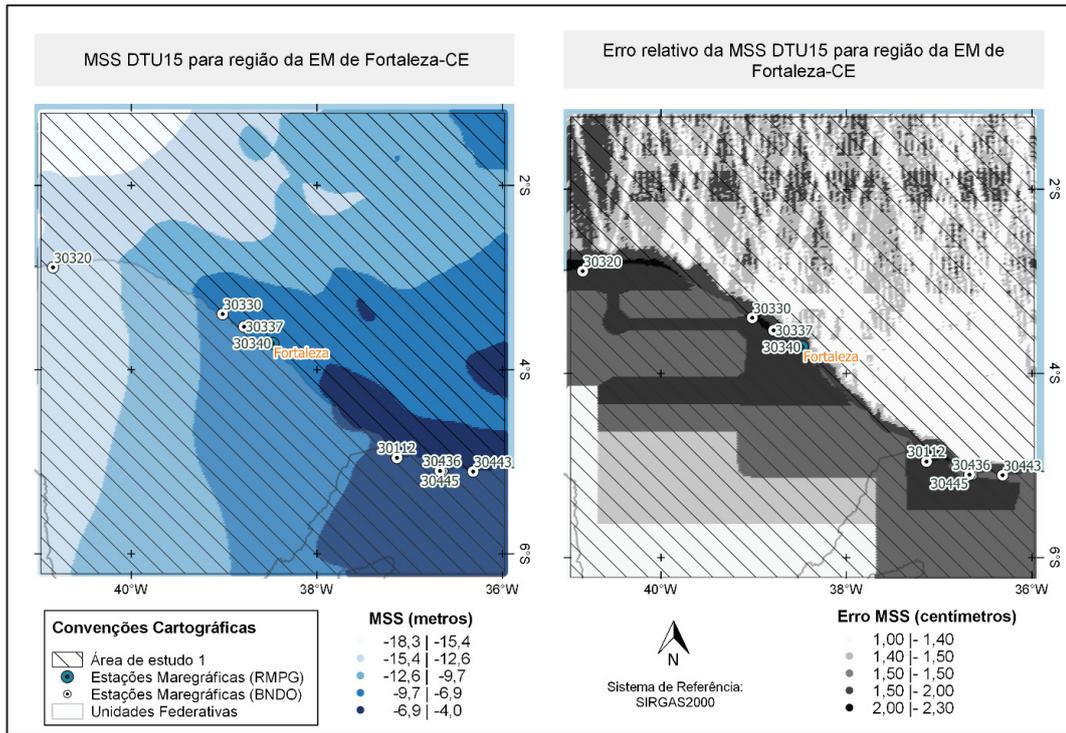
Já os modelos gerados pelo DTU *Space*, também fonte de dados, podem ser obtidos pelo endereço FTP da instituição com algumas possibilidades de extensão dos arquivos (DTU, 2019b). Este portal disponibiliza os modelos na íntegra, sem a possibilidade de extração de áreas de estudos desejadas. Diante disso, seria necessária uma manipulação extra do conjunto de dados para recorte das áreas de interesse. Como uma alternativa, foi realizado um contato com o responsável pelos modelos, e eles foram enviados por e-mail, com os recortes já realizados, para os modelos DTU o erro relativo é obtido considerando a geração das grades regulares e não pelas análises de *Crossovers* (ANDERSEN, 2019<sup>9</sup>).

Os modelos DTU apresentados na sequência, tiveram os mesmos procedimentos aplicados e os dados também foram espacializados no QGIS. Para o DTU 15 na área de estudo 1 a variação altimétrica da MSS é de -18,3 a -4,0 m e erro relativo de 1,0 a 2,3 cm e na área de estudo 2 a variação da MSS foi de -5,4 m a 7,5 m com erro relativo calculado em torno de 1,4 a 2,9 cm (FIGURAS 22 e 23). Valores semelhantes são vistos para o modelo DTU 18 para as duas áreas de estudo (FIGURAS 24 e 25). Os valores estão no sistema de maré média e o elipsoide de referência é o T/P.

---

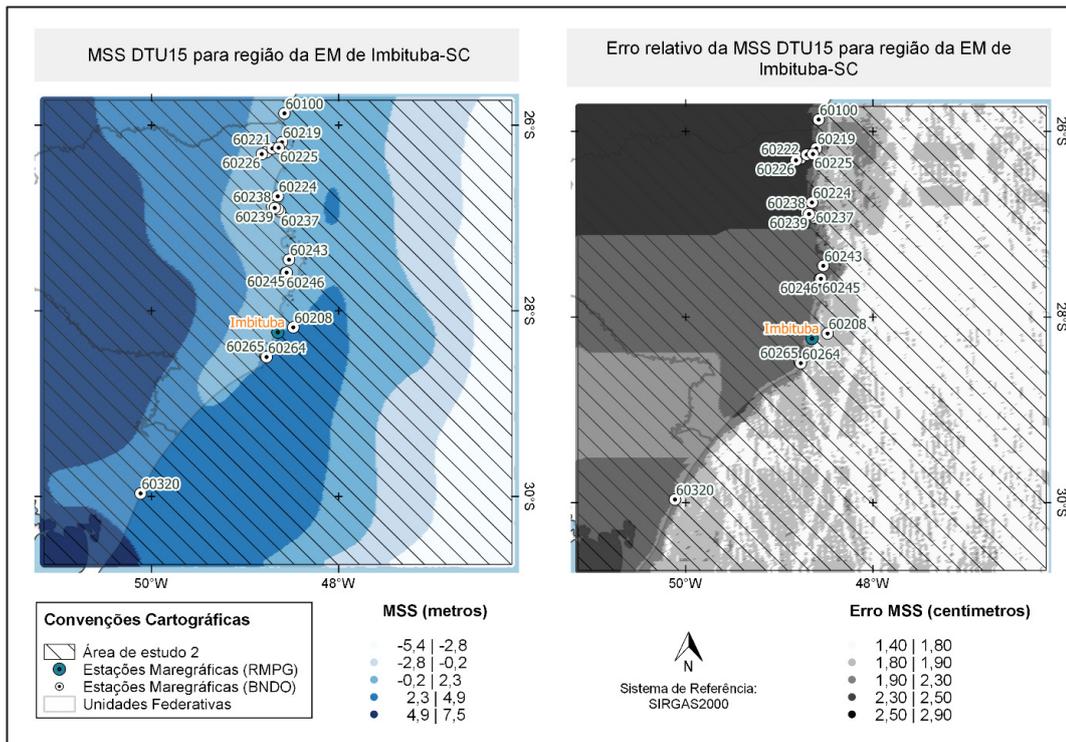
<sup>9</sup> ANDERSEN, O. B. **Guidance on using the DTU15MSS and DTU18MSS models.** [Contato por e-mail]. Mensagem recebida por: <oa@space.dtu.dk>. 11 jun. 2019.

FIGURA 22 – MAPA DA MSS DTU 15 PARA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA



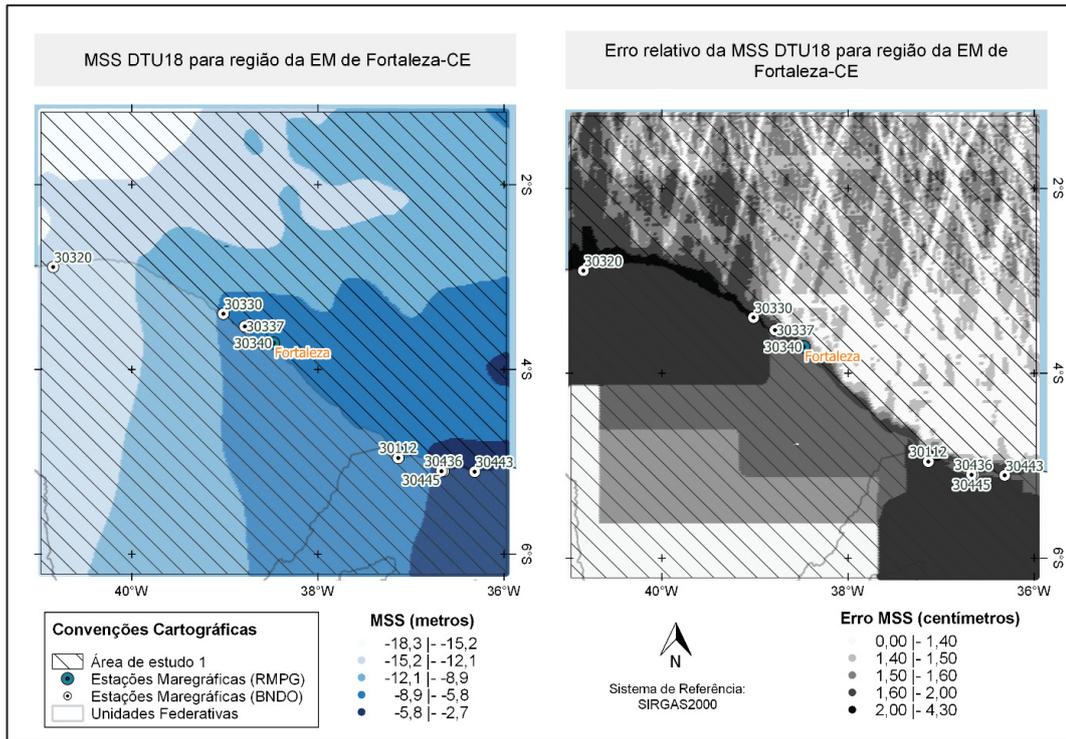
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 23 – MAPA DA MSS DTU 15 PARA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA



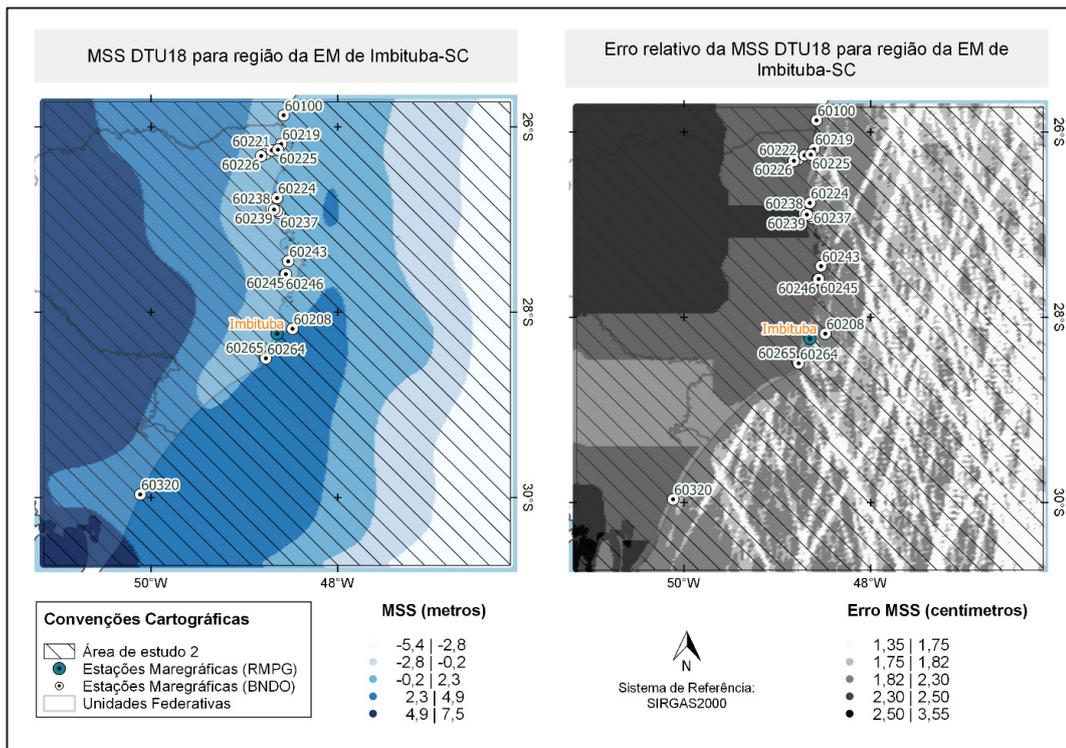
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 24 – MAPA DA MSS DTU 18 PARA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA



FONTE: O autor (2020).

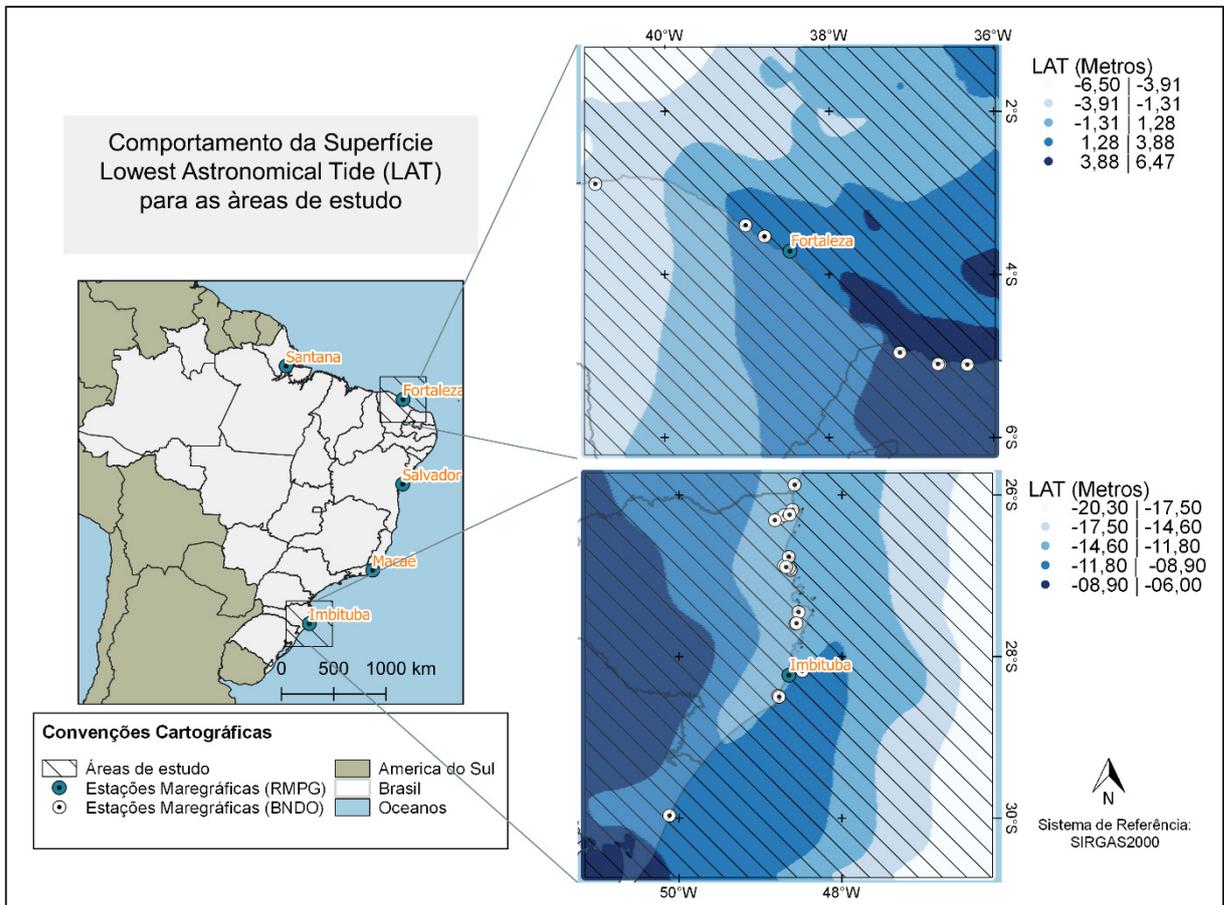
FIGURA 25 – MAPA DA MSS DTU 18 PARA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA



FONTE: O autor (2020).

Por último, o DTU\_15\_LAT (ANDERSEN et al., 2016), que ainda não se encontra disponível no FTP do DTU *Space*, foi cedido pelo Dr. Ole Baltazar Andersen em arquivos de texto contendo as grades regulares (ANDERSEN, 2019<sup>10</sup>). Os dados foram espacializados também no QGIS e apresentam variabilidade diferente para cada área de estudo. Na área de estudo 1, os valores das altitudes da superfície LAT variam de -6,50 a 6,47 m e na região de estudo 2, os valores das altitudes da superfície LAT variam de -20,30 a -6,0 m (FIGURA 26), para este modelo não há indicativo de erro relativo. O modelo encontra-se no sistema livre de maré e é referido ao elipsoide WGS84.

FIGURA 26 – MAPA DA SUPERFÍCIE LAT (DTU\_15\_LAT)



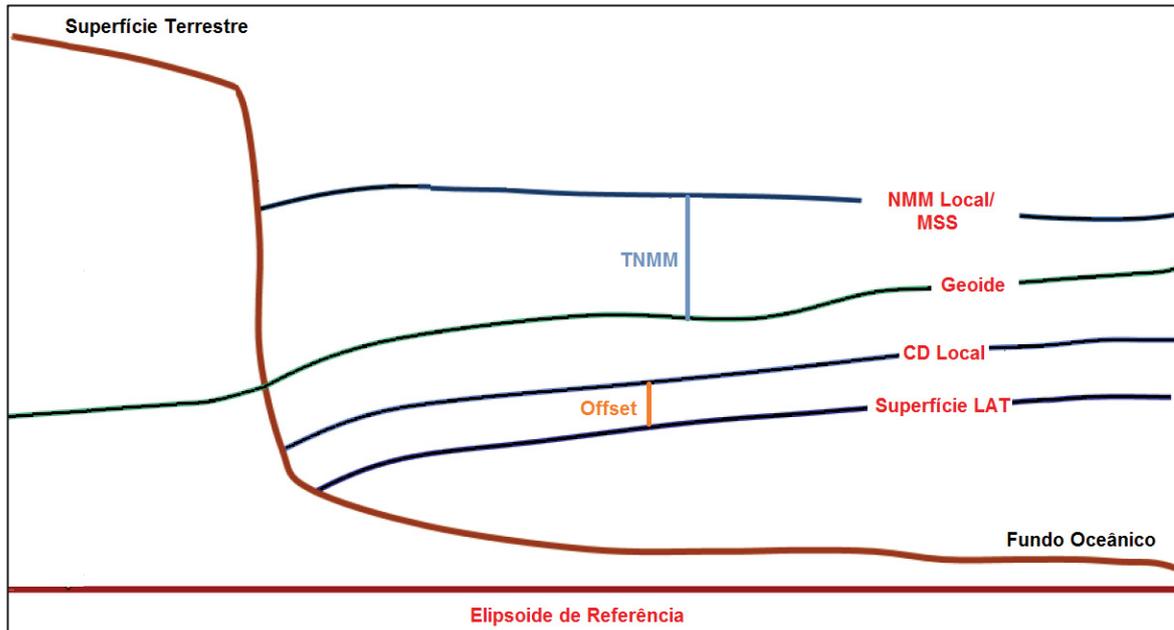
FONTE: O autor (2020).

<sup>10</sup> ANDERSEN, O. B. **DTU15LAT for study on coast of the Brazil**. [Contato por e-mail]. Mensagem recebida por: <oa@space.dtu.dk>. 07 mar. 2019.

### 3.3 MÉTODOS

Nesta seção são destacados os principais aspectos metodológicos que foram norteadores para o alcance dos objetivos desta pesquisa (citados na seção 1.5). O percorrer do texto perpassa pelas estratégias de cálculo, procedimento para as análises e a manipulação dos modelos, estações geodésicas, EMs e demais conjunto de dados essenciais para execução, desenvolvimento e consolidação desta investigação.

O estabelecimento, a análise e as discussões a respeito dos NREFs são os principais pontos para execução da pesquisa, sobretudo no estudo da adequação dos modelos globais às observações locais. A FIGURA 27 sintetiza as principais superfícies e níveis de referência que serão objetos de estudo e evidencia as relações envolvidas. Dentre as superfícies e planos de referência, tem-se o NMM local definido por observações do nível do mar local nas EMs, a MSS que fornece o NMM a partir de uma abordagem global com observações do nível do mar baseado na técnica de altimetria por satélite, o geóide como a superfície equipotencial do campo de gravidade terrestre, o CD definido localmente por observações maregráficas de EMs (para o Brasil, é definido como NRED) e a superfície LAT gerada a partir do DTU\_10\_GOT. Ademais, o *offset* entre o CD local e a superfície LAT representa um dimensionamento entre as abordagens locais e globais para definição do *Datum* vertical oceânico, já a TNMM corresponde à discrepância existente entre geóide e NMM, seja o NMM dado por modelos ou observações locais.

FIGURA 27 – SÍNTESE DAS PRINCIPAIS SUPERFÍCIES E NÍVEIS DE REFERÊNCIA<sup>11</sup>

FONTE: Adaptado de ANDERSEN (2018).

### 3.3.1 Métodos de interpolação

Quanto a manipulação dos modelos de MSS e LAT, optou-se por trabalhar com as grades regulares de 1'x1' que foram convertidas ao formato vetorial (*shapefile*) na primitiva gráfica ponto, e na sequência procedeu-se a interpolação dessas grades utilizando de três métodos distintos: *Spline*, *Natural Neighbor* e *Kriging*. Com estes interpoladores foi possível gerar superfícies em formato matricial (*raster*) de onde foram extraídos os valores pontuais para cada uma das EMs que fizeram parte do estudo. Esta etapa foi realizada no *ArcGIS desktop* em sua versão 10 com licença no SIGEO. A escolha dos interpoladores foi apoiada pelo uso deles em outros estudos científicos, a exemplo:

- a) *Spline*: o interpolador foi testado por Arana et al. (2018) para interpolação de grades regulares de altitudes geoidais do modelo MAPGEO2015. Dos resultados apresentados pelos autores intui-se que o interpolador demonstra uma boa resposta para interpolação de grades regulares;

<sup>11</sup> Para o Brasil o CD local é dado pelo NRED.

- b) *Natural Neighbor*: utilizado para interpolar altitudes e gerar superfícies para obtenção de modelos digitais de altitudes (AGARWAL; BEUTEL; MØLHAVE, 2016);
- c) *Kriging*: Com ampla aplicação em geociências, este interpolador é bem conhecido no Brasil como Krigagem e já foi utilizado para interpolação de grades regulares de altitudes geoidais de MGGs (SANTANA; RIBEIRO; GUIMARÃES, 2017) e para interpolação de valores de NMM proveniente de modelos de MSS (MONTECINO; CUEVAS; DE FREITAS, 2014);

Ao realizar o procedimento para todos os MGOs utilizados na pesquisa foi observado que os valores encontrados com a interpolação dos modelos para cada EM foram convergentes para todos os métodos testados, as diferenças calculadas para as EMs são todas menores que um milímetro e em sua maioria melhores que o décimo do milímetro, o que leva a entender que pela natureza dos modelos oceânicos o uso de qualquer método apresenta resultados satisfatórios. Tendo em vista a questão apresentada, foi tomada a decisão por utilizar o método *Kriging* para proceder as análises e discussões subsequentes. A escolha também foi ponderada pelo desempenho eficiente do método apontado por Ferreira et al. (2017) e pelo uso em pesquisa semelhante a esta que foi conduzida por Montecino, Cuevas e De Freitas (2014).

### 3.3.2 Sistemas de marés permanentes

Outra questão importante refere-se ao emprego de dados de diferentes fontes, este uso levou a necessidade de compatibilização dos dados para que as comparações, análises e discussões dos dados sejam alcançadas de maneira fidedigna. No que se refere ao sistema de maré permanente, a escolha foi pela utilização do sistema de maré médio. Tal decisão foi tomada considerando as recomendações internacionais para o estabelecimento do IHRS (IAG, 2015).

Faz-se necessário comentar algumas aplicações. Para a rede brasileira de altitudes, a RVRB, por ter sido concebida sem a consideração de correções quanto ao efeito de maré permanente, os valores de altitudes da rede estão no sistema de maré médio (FERREIRA; ZHANG; DE FREITAS, 2013). Por outro lado, na obtenção da altitude elipsoidal nos sistemas GNSS são totalmente eliminados os efeitos de

maré, configurando o sistema livre de maré. Os modelos de MSS se encontram no sistema de maré médio e o modelo da superfície LAT no sistema livre de maré. Já no cálculo de funcionais provenientes de MGGs o serviço de cálculo do ICGEM permite a escolha do sistema de maré de interesse. Assim torna-se necessária a compatibilização dos sistemas de marés permanentes antes que seja executada qualquer tipo de análise e comparação.

### 3.3.3 Elipsoides de referência

No que tange aos elipsoides de referência, a realização da transformação do referencial também foi efetuada. Os modelos de MSS estão referidos ao elipsoide T/P, o modelo da superfície LAT ao WGS84 e as coordenadas de estações geodésicas ao GRS80. Para a compreensão das discrepâncias existentes entre os elipsoides de referência, na TABELA 4, os parâmetros elipsoidais semieixo maior (a), semieixo menor (b), o achatamento (1/f) e a excentricidade (e) são visualizados para os elipsoides T/P, GRS80 e WGS84.

TABELA 4 – PARÂMETROS ELIPSOIDAIIS

Elipsoide	T/P	GRS80	WGS84
a (m)	6378136,3	6378137,0	6378137,0
b (m)	6356751,600563	6356752,314245	6356752,314245
1/f	298,257000000	298,257222101	298,257223563
e	0,081819221456	0,0818191910435	0,0818191910435

FONTE: IERS (2010), RIO (2009) e RENGANATHAN (2010).

Considerando o conjunto de dados inerentes a execução da pesquisa é evidente a necessidade de um tratamento adequado. Para compatibilizar as bases de dados foi realizada a conversão do elipsoide T/P para WGS84 ou GRS80 que para efeitos práticos são semelhantes. Seguindo o mesmo procedimento realizado por Carrión (2017), a conversão foi feita em função das latitudes advindas da posição das EMs que compreendem o estudo, utilizando a fórmula descrita em Renganathan (2010):

$$\delta_h = h_1 - h_2 = -((a_2 - a_1) * (\cos \Psi)^2 + (b_2 - b_1) * (\sin \Psi)^2) \quad (6)$$

Na equação (6),  $\delta_h$  corresponde à diferença das altitudes  $h_1$  e  $h_2$  referidas aos dois elipsoides,  $a_1$  e  $a_2$  são os semieixos maiores,  $b_1$  e  $b_2$  são os semieixos menores e  $\Psi$  a latitude geocêntrica do ponto de interesse para o qual se deseja realizar a conversão. Em amplitude, depois da compatibilização dos elipsoides os valores apresentaram uma diferença de aproximadamente setenta centímetros.

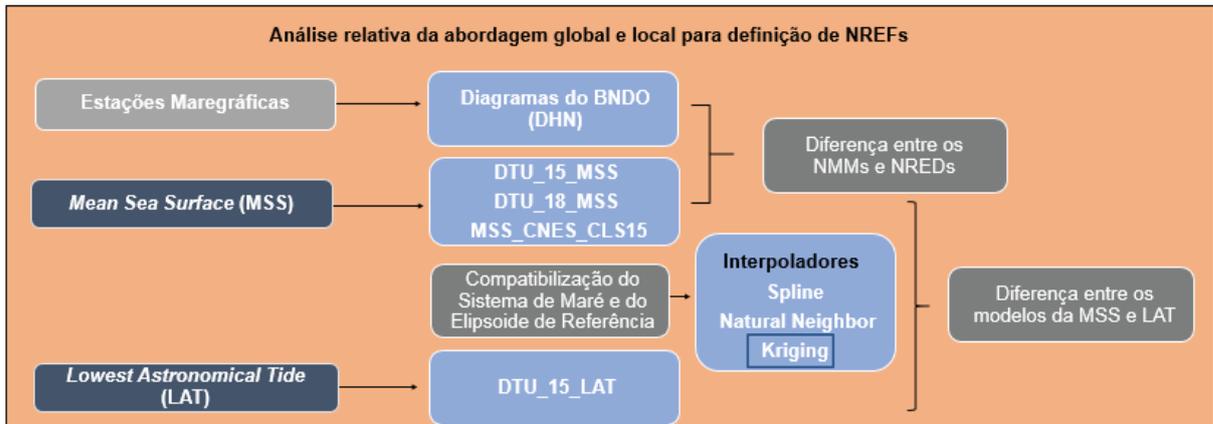
#### 3.3.4 Análise da abordagem global e local para definição do referencial oceânico

Em uma primeira etapa foram utilizadas as informações dos diagramas de EMs do BNDO, os modelos DTU\_15\_MSS, DTU\_18\_MSS, MSS\_CNES\_CLS15 e o modelo da superfície LAT, o DTU\_15\_LAT. Como mencionado anteriormente, três interpoladores foram testados para obtenção dos valores advindos dos modelos, porém, optou-se por aplicar apenas o método de *kriging*. Assim foram extraídas as informações de interesse de cada um dos modelos.

A análise foi baseada nos planos de referência estabelecidos pela DHN para 8 EMs na região de Fortaleza e 18 EMs na região de Imbituba. Uma dificuldade é que não foi possível estabelecer a posição geocêntrica dos NREDs e dos NMMs das estações da DHN porque as RNs primárias não apresentam valores de altitudes elipsoidais com precisão compatível, por isso a análise foi realizada de maneira relativa, considerando a diferença entre os NREDs e os NMMs (abordagem local), tido tradicionalmente como  $Z_0$ .

Em outra abordagem, foram calculadas as diferenças entre o modelo da superfície LAT e os modelos de MSS gerados por distintas instituições (abordagem global) para as regiões das EMs, essa abordagem apresenta uma vantagem quanto a resolução espacial e temporal condicionada pela técnica de altimetria por satélite. As discrepâncias entre as diferenças da abordagem local e global foram analisadas e trouxeram uma estimativa do impacto do uso de modelos globais e da definição da superfície LAT como CD, o esquema a seguir representa a organização dos dados para a consolidação da análise relativa (FIGURA 28).

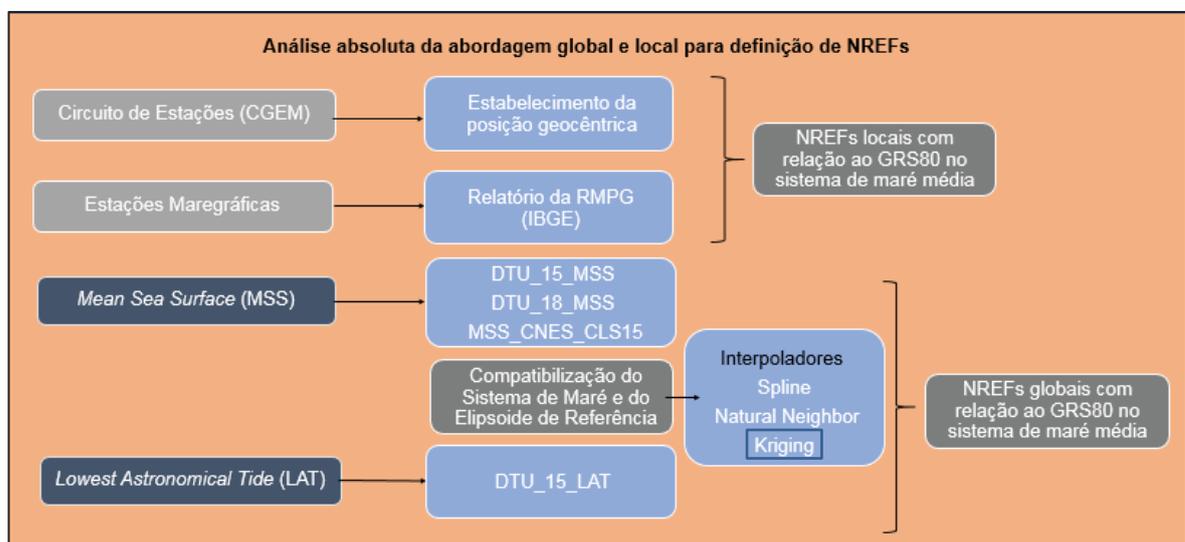
FIGURA 28 – ESTRATÉGIA DE AÇÃO PARA ANÁLISE RELATIVA



FONTE: O autor (2020).

Adicionalmente, para as EMs que compõem a RMPG, uma análise semelhante foi realizada, no entanto, considerando a posição geocêntrica dos níveis associados, sendo assim, designada neste estudo como uma análise absoluta (FIGURA 27). A realização deste procedimento é condicionada com as observações nas regiões das EMs, nesse sentido é importante mencionar que o IBGE mantém o Controle Geodésico de Estações Maregráficas (CGEM) que é composto por dezenas de estações no entorno das EMs da RMPG. Dados do CGEM possibilitaram a vinculação dos NREFs das EMs da RMPG que fazem parte do estudo a um referencial global. Com estratégia de ação representada pela Figura 29.

FIGURA 29 – ESTRATÉGIA DE AÇÃO PARA ANÁLISE ABSOLUTA

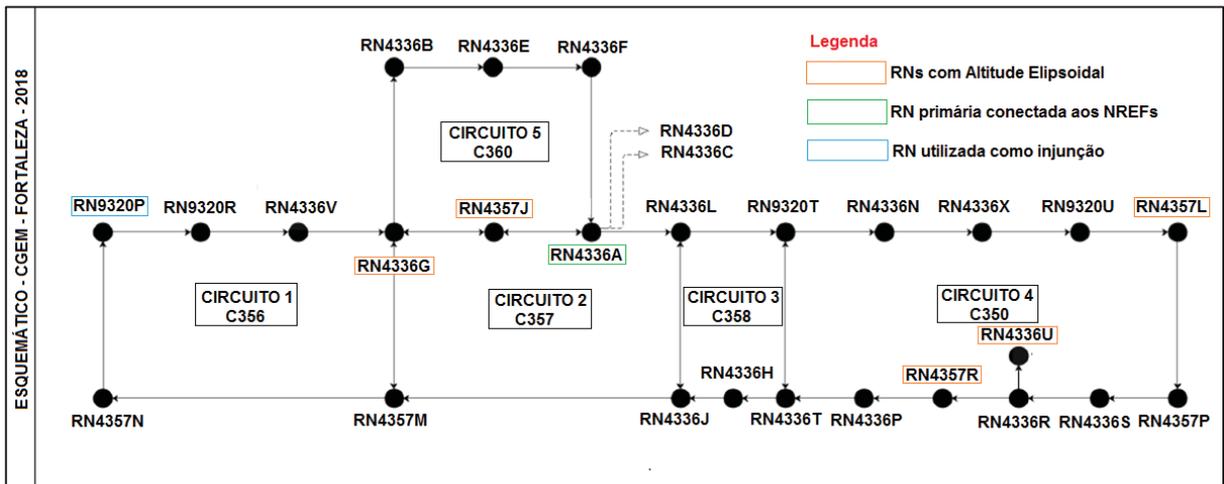


FONTE: O autor (2020).

As RNs 4336A e 3012X são RNs primárias vinculadas aos NREFs locais estabelecidos pela DHN para as EMs de Fortaleza e Imbituba, respectivamente. A partir destes vínculos o posicionamento geocêntrico dos níveis foi obtido. Além destas RNs, há na região algumas RNs vizinhas, tais como, RN-UFPR2, RN-CBD3A, RN-DHN4, RN-DHN5, RN3010A, RN-3012Z e RN-DHN1 para Imbituba e as RN-Petrobras1, RN-DHN3, RN-DHN4, RN4336G e demais para Fortaleza. Todas elas são apresentadas na ficha F-41 de cada estação com vinculação as RNs primárias, conforme Anexos 1 e 2.

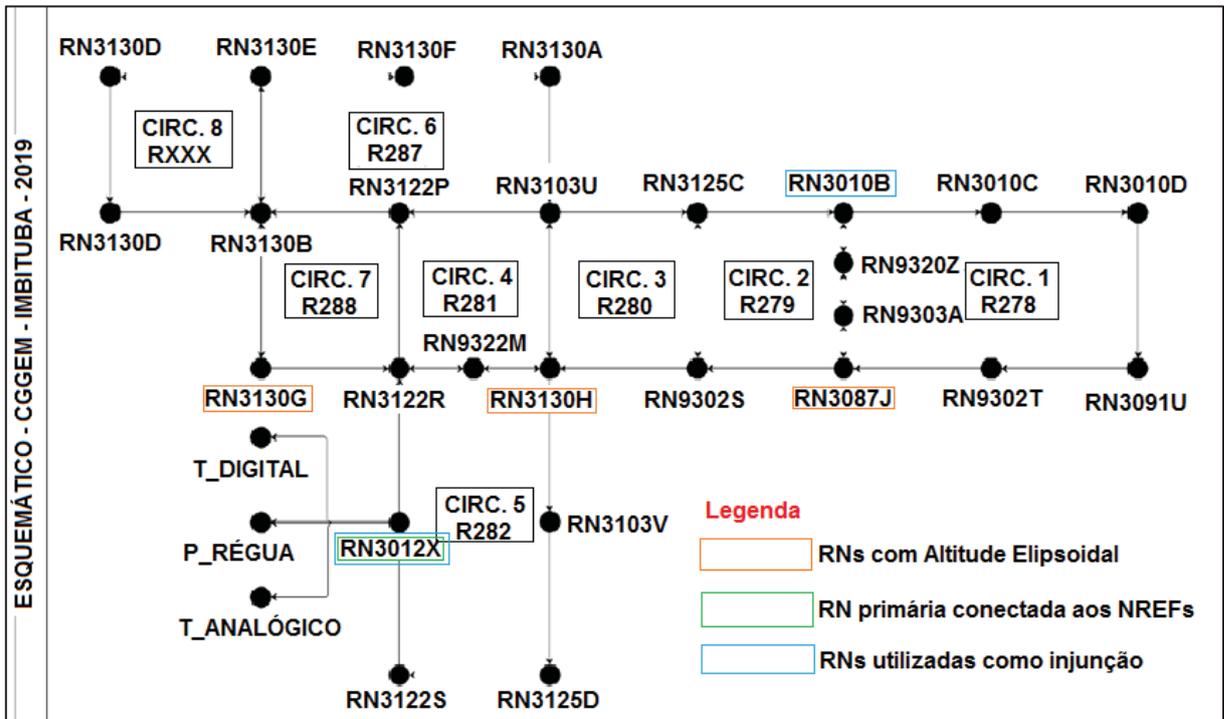
Um desafio adicional ao estudo aqui proposto é que os valores das altitudes elipsoidais das RNs primárias não são conhecidos, o que levou a investigação destes valores. Nos circuitos de RNs no entorno das EMs há algumas RNs que possuem valores de altitudes elipsoidais disponíveis e estes foram utilizados como fonte de informação para o transporte da altitude elipsoidal. Na área de estudo 1 - Fortaleza, são 5 RNs com altitudes elipsoidais conhecidas (FIGURA 30). Em contraponto, para a área de estudo 2 – Imbituba são 3 RNs com altitudes elipsoidais conhecidas (FIGURA 31).

FIGURA 30 – ESQUEMÁTICO DO CGEM NA REGIÃO DA EM DE FORTALEZA



FONTE: Adaptada de IBGE (2019c).

FIGURA 31 – ESQUEMÁTICO DO CGEM NA REGIÃO DA EM DE IMBITUBA



FONTE: Adaptada de IBGE (2019c).

A equação que possibilita inicialmente a obtenção da altitude elipsoidal das RNs parte da relação que existe entre a altitude geoidal ( $N$ ), altitude elipsoidal ( $h$ ) e altitude ortométrica ( $H$ ) que para a RN primária é expressada pela equação (7) e para uma RN vizinha qualquer é visto na equação (8). As equações são derivadas daquelas apresentadas em Jekeli (2000) e Gemael (1999). A aplicação das equações desta forma é tida como uma abordagem absoluta para determinações altimétricas (NICÁCIO; DALAZOANA,2018a).

$$h_{RN \text{ primária}} = N_{RN \text{ primária}} + H_{RN \text{ primária}} \quad (7)$$

$$h_{RN \text{ vizinha}} = N_{RN \text{ vizinha}} + H_{RN \text{ vizinha}} \quad (8)$$

Após a subtração das equações (7) e (8), além de algumas manipulações matemáticas obtém-se a equação (9) que torna possível o cálculo da altitude elipsoidal da RN primária. Na equação,  $N_{RN \text{ primária}} - N_{RN \text{ vizinha}}$  é o desnível geoidal e

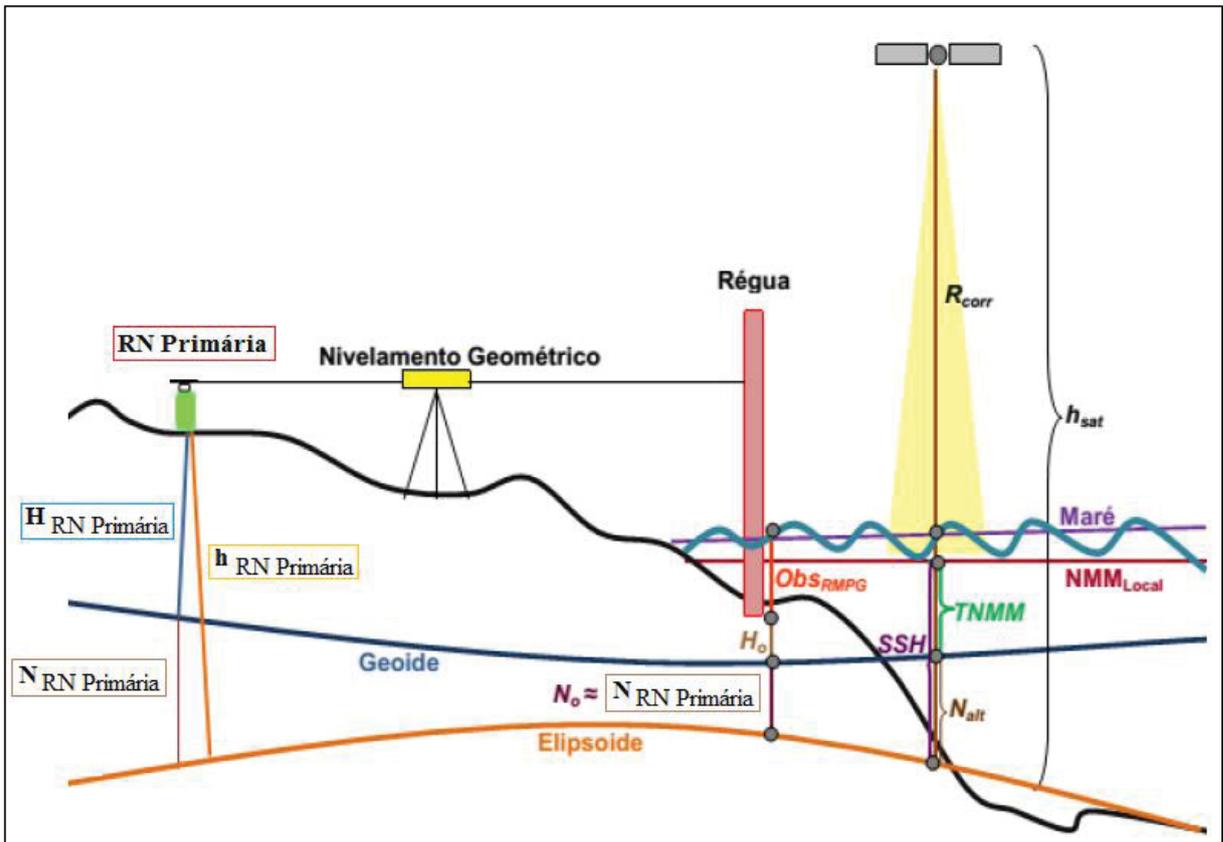
$H_{RN \text{ primária}} - H_{RN \text{ vizinha}}$  o desnível altimétrico entre as RNs. Devido ao não conhecimento do  $N_{RN \text{ primária}}$  em um primeiro momento considerou-se que o desnível geoidal era zero e estimativas foram obtidas para as altitudes elipsoidais das RNs primárias.

$$h_{RN \text{ primária}} = (N_{RN \text{ primária}} - N_{RN \text{ vizinha}}) + (H_{RN \text{ primária}} - H_{RN \text{ vizinha}}) + h_{RN \text{ vizinha}} \quad (9)$$

Em busca de uma solução que considerasse valores de  $N_{RN \text{ primária}}$ , mesmo que estimados, foi traçada uma estratégia com o uso de altitudes geoidais para as RNs primárias ( $N_{RN \text{ primária}}$ ) baseadas no MGG XGM2019 combinadas com altitudes geoidais locais das RNs vizinhas. Nesta alternativa, foi aplicada novamente a equação (9) e uma nova solução foi obtida. Ao analisar os desvios padrão encontrados, houve indicativos de melhoria na qualidade da estimativa.

Com o valor conhecido das altitudes elipsoidais das RNs primárias, as vinculações foram feitas com os valores do nivelamento geométrico que são obtidos com os NREFs disponíveis nas fichas F-41 de cada EM, as especificações técnicas de nivelamento são estabelecidas em DHN (2017). Além disso, é importante adicionar que para este caso, os valores das altitudes geoidais no local da RN primária e de onde os NREFs (posição da régua) são estabelecidos foram considerados aproximadamente iguais (FIGURA 32). Sem dúvidas, esta é uma etapa importante para que sejam integradas observações geodésicas locais, modelos geodésicos e observações geodésicas globais.

FIGURA 32 – VÍNCULOS ENTRE OS NÍVEIS DE REFERÊNCIA GEODÉSICOS IMPLÍCITOS NA INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES E MODELOS GEODÉSICOS



FONTE: Adaptada de DA SILVA (2017).

NOTA: As variáveis que são apresentadas na figura, correspondem a:  $R_{corr}$ : range corrigido,  $h_{sat}$ : altitude elipsoidal do satélite altímetro, H: altitudes referidas ao geoide e h: altitudes referidas ao elipsoide.

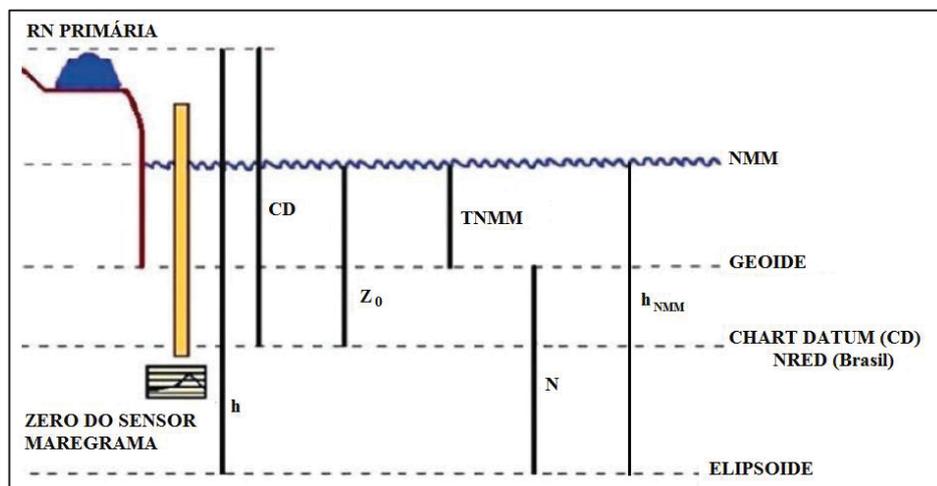
Em linhas gerais, a análise absoluta dos NREFs permitiu quantificar o *offset* entre o NRED e o modelo DTU\_15\_LAT. Estes resultados levam a uma estimativa em termos métricos do afastamento da superfície recomendada pela IHO em relação a um nível determinado localmente. Apesar das dificuldades inerentes ao modelo, porque ele é derivado de dados de altímetros que perdem precisão em região costeira, além de ser gerado por valores preditos do modelo de maré DTU\_10\_GOT, a compreensão das relações métricas entre os níveis e superfícies possibilita avanço científico.

### 3.3.5 Estratégias para estimativa da TNMM

Esta pesquisa também propõe a realização de estimativas da TNMM fundamentada em duas abordagens: a geométrica (HAYDEN et al., 2012; SILVA; GUIMARÃES, 2018) e a oceanográfica (MONTECINO; CUEVAS; DE FREITAS, 2014). Os resultados das etapas anteriores contribuíram para esta execução, como por exemplo, os valores de altitudes do NMM interpolados dos modelos de MSS nas EMs de Fortaleza e Imituba e os NREFs locais geocêntricos baseados em dados do IBGE e da DHN.

Na abordagem geométrica a estimativa da TNMM é feita em função da altitude elipsoidal ( $h$ ) da RN primária, a altitude geoidal ( $N$ ), o desnível ( $DN_{CD}$ ) entre o CD e a RN primária e o valor de  $Z_0$  (FIGURA 33). Sendo assim,  $TNMM = h - N - DN_{CD} + Z_0$ , com CD em função do NRED. No entanto, o uso desta fórmula somente é válida quando não há disponível o valor da altitude elipsoidal do NMM ( $h_{NMM}$ ), como em etapas anteriores do estudo os NMMs foram convertidos a valores referidos ao elipsoide GRS80 a fórmula pode ser reescrita como  $TNMM = h_{NMM} - N$ .

FIGURA 33 – ESTIMATIVA GEOMÉTRICA DA TNMM NA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA



FONTE: Adaptada de SILVA e GUIMARÃES (2018).

Como alternativa, foi também realizada a abordagem oceanográfica que é apoiada pelo uso de modelos da MSS e MGGs. Com altitudes da MSS ( $h_{MSS}$ ) dos

modelos DTU\_15\_MSS, DTU\_18\_MSS e MSS\_CNES\_CLS15 e as altitudes geoidais (N) de MGGs, este cálculo foi executado com a equação expressa em (10):

$$TNMM = h_{MSS} - N \quad (10)$$

Esta equação já foi aplicada em Montecino, Cuevas e De Freitas (2014) em um estudo para a rede de altitudes do Chile. Os valores de N para as duas estratégias de cálculo serão calculados a partir dos modelos EGM2008, EIGEN-6C4, XGM2016 e XGM2019 todos em seu grau máximo de desenvolvimento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo se destina a apresentação dos resultados e algumas discussões deste estudo. São explicitados: o inventário de dados geodésicos, as análises relativas e absolutas da adequação dos MGOs às observações locais obtidas nas EMs, são comparadas as diferenças da amplitude da variação do nível do mar a partir das informações de NMMs locais e aquelas relativas aos modelos de MSS com relação aos referenciais verticais. Para a abordagem global o referencial vertical é o modelo DTU\_15\_LAT e para a abordagem local os NREDs definidos em cada EM são utilizados. Na sequência, os NREFs são estabelecidos com relação ao elipsoide de referência o GRS80, a TNMM é estimada e uma representação com os NREFs utilizados neste estudo é apresentada.

Sobretudo, se faz mister mencionar que além das comparações e resultados alcançados, são apontados nas seções subsequentes a época de definição e o período das observações utilizado para a definição dos NREFs nas EMs do BNDO analisadas e dos demais níveis trabalhados. A ênfase é justificada pela evolução temporal do nível do mar constatada pelos resultados vistos em CLS (2018), Calado, Garnés e Jamur (2018), Da Silva (2017), Dalazoana (2006), além de outros. Cabe também ressaltar que a recomendação da IHO é que as definições de referenciais verticais oceânicos sejam baseadas nas análises de um período de pelo menos 18,6 anos de observações maregráficas. Por outro lado, a DHN (2017) aponta que a determinação dos NREFs locais seja dada pelo período de pelo menos 32 dias de observações maregráficas.

### 4.1 INVENTÁRIO DE DADOS GEODÉSICOS

Dados de estações gravimétricas terrestres e oceânicas foram obtidos no banco de dados do BGI. A solicitação dos dados foi feita na página online do BGI onde são requeridas informações do interessado nos dados, o tipo de dado (terrestre ou oceânico) e motivo da solicitação daquele conjunto de dados tendo que ser escrita uma justificativa detalhada informando a finalidade do uso. Algum tempo depois um link para download dos dados é encaminhado para o e-mail cadastrado (BGI, 2019).

O banco de dados do BGI é composto por um conjunto de levantamentos gravimétricos realizados por distintas instituições, projetos e épocas. Para o caso das

áreas de estudo nesta investigação é observado que os dados constituintes junto ao BGI são frutos de levantamentos entre as décadas de 50 e 80 do século XX, este fato configura uma necessidade de novos levantamentos para épocas mais atuais. Na região de Fortaleza-CE as datas de compilação dos dados variam de 1961 a 1986 (25 anos), já em Imbituba-SC a extensão temporal é de 1939 a 1985 (46 anos).

Outra fonte de dados deste estudo é o Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE. Ele é constituído por estações geodésicas do SGB que vem sendo implantadas desde 1939. As coordenadas, as altitudes e/ou a gravidade das estações são determinadas por meio da aplicação de procedimentos e modelos geodésicos de precisão compatível com a finalidade daquela observável, a discriminação destas informações se encontra nos relatórios das estações, também conhecido como monografia da estação (IBGE, 2019).

O SGB é composto pelas redes altimétrica, planialtimétrica e gravimétrica. A rede planialtimétrica pode ser subdividida nos conjuntos de Estações de Satélite (SAT), sendo GNSS ou DOPPLER, Estações de Poligonização (EP), e Vértices de Triangulação (VT). Além destas, ainda fazem parte do SGB as redes de monitoramento contínuo terrestre e oceânica: a RBMC e a RMPG, respectivamente. O QUADRO 6 apresenta a fonte dos dados, tipos e principais referências para conhecimento da concepção e evolução das estações geodésicas do IBGE.

QUADRO 6 – FONTE DOS DADOS DO BDG DO IBGE E PRINCIPAIS REFERÊNCIAS

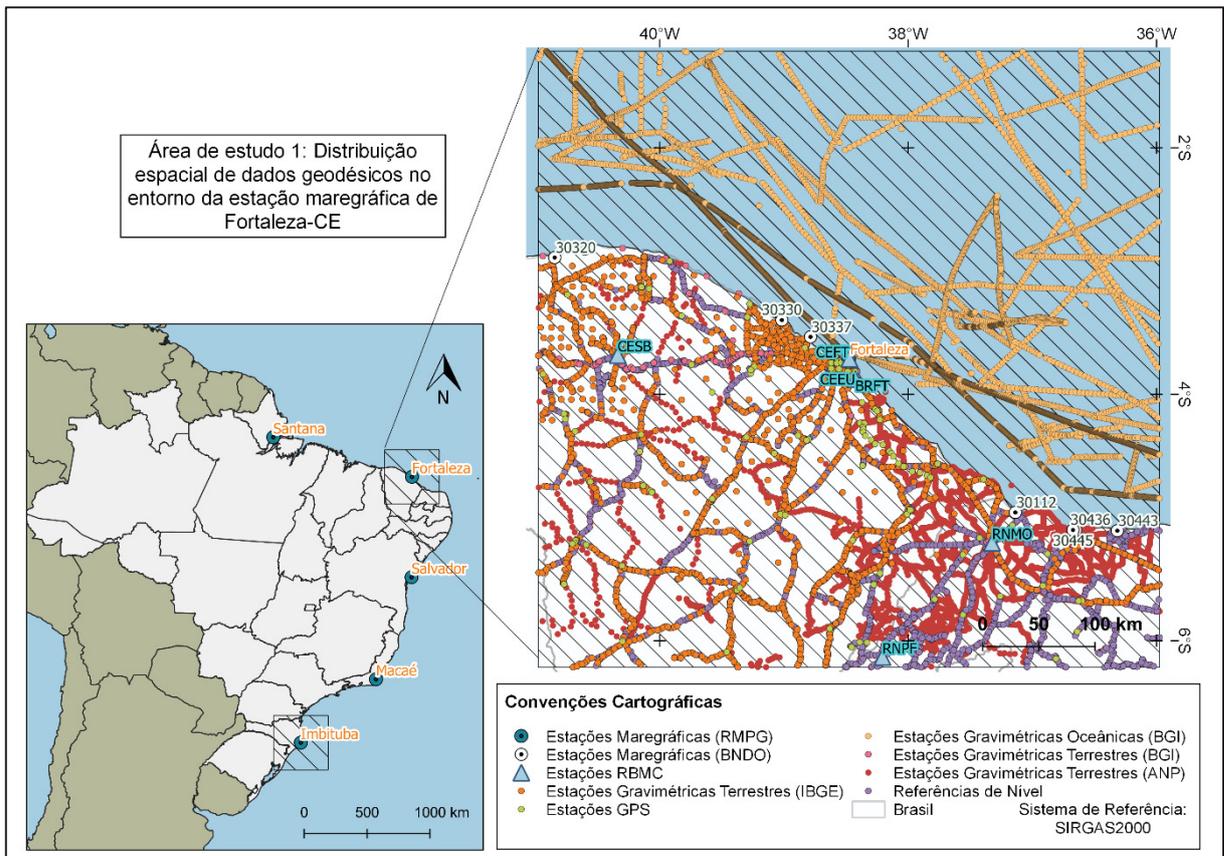
<b>Tipo de Estação</b>	<b>Fonte</b>	<b>Referência(s)</b>
Estações RBMC	IBGE	Fortes (1995). Fortes, Luz e Pereira (1998). Pereira, Fazan e Fortes (2003). Costa et al. (2008). Costa et al. (2018).
Estações RMPG	IBGE	Luz e Guimarães (2003)
Estações Gravimétricas	IBGE	Castro Junior (2005) e Castro Junior, Guimarães e Ferreira (2018).
Referências de Nível	IBGE	Alencar (1990). Ribeiro e Luz (1991). Luz e Guimarães (2001). Pina et al. (2006). Luz (2008). Luz (2016). IBGE (2018).
Vértices de Triangulação	IBGE	Costa (2000).
Estações GNSS	IBGE	Silva, Lima e Costa (2008).
Estações de Poligonização	IBGE	Costa (2000).
Estações Doppler	IBGE	Godoy et al. (1991).

FONTE: O autor (2020).

Foi consultado também o Banco Nacional de Dados Gravimétricos da Agência Nacional do Petróleo quanto à existência de dados gravimétricos nas áreas estudadas (ANP, 2020). Na área de estudos 1 - Fortaleza, 8211 estações gravimétricas terrestres estão disponíveis neste banco de dados, sendo que 16,3 % são originárias do BDG/IBGE e as demais estações foram calculadas pelo Observatório Nacional (6,8 %), empresa Petróleo Brasileiro S.A (46 %), Universidade Federal do Pará (7,6 %) e Universidade Federal do Rio Grande do Norte (23,3 %). Na área de estudos 2 – Imbituba, estão registradas no banco de dados 3103 estações gravimétricas terrestres, destas, 11,6 % foram calculadas pelo IBGE, 40,2 % pela Universidade de São Paulo, 7,9 % pelo Observatório Nacional, 40% pela empresa Petróleo Brasileiro S.A e 0,1 % pela Universidade Federal do Pará. Com exceção das estações gravimétricas que aparecem no banco de dados como calculadas pelo IBGE, por já constarem no BDG, todas as demais contribuem sobre maneira ao conjunto de estações gravimétricas terrestres.

Desconsiderando as estações geodésicas da rede clássica, foram espacializadas as Estações GNSS, RNs, RBMC, RMPG e Estações Gravimétricas nas Figuras 35 e 36, com o objetivo de quantificar as estações geodésicas disponíveis nas duas áreas de estudo. Para a área de estudo 1 - Fortaleza, a região apresenta uma quantidade relevante de estações geodésicas. Em uma análise visual é observada uma boa distribuição espacial, um equilíbrio em extensão da parte terrestre e oceânica, as 8 EMs estão bem distribuídas pela costa, os dados de gravimetria oceânica são pouco densos, regiões contíguas a linha de costa carecem de dados gravimétricos porque as baixas profundidades dificultam as medições (FIGURA 34).

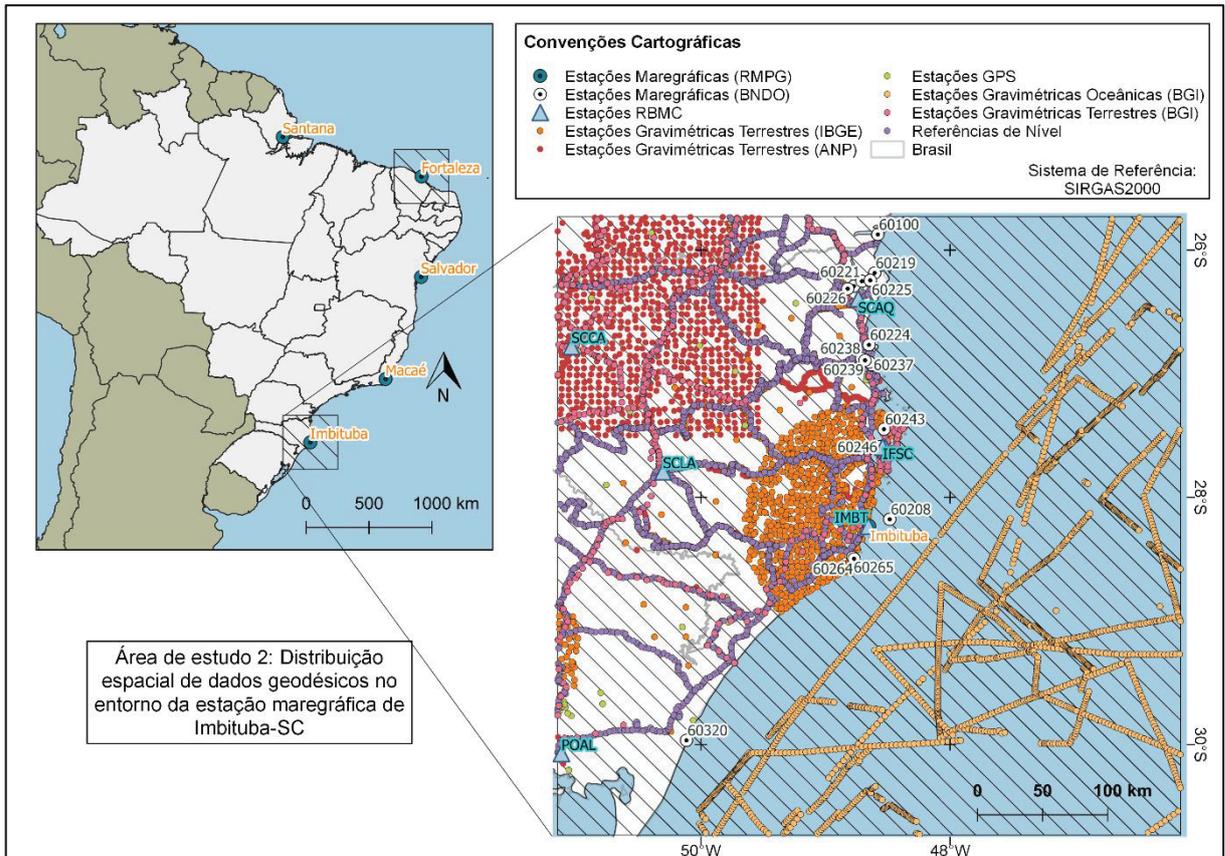
FIGURA 34 – DADOS DISPONÍVEIS DA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA



FONTE: O autor (2020).

Quanto a distribuição espacial das estações geodésicas na área de estudo 2 - Imbituba, é notado uma boa distribuição dos dados, com algumas ressalvas (FIGURA 35). Em comparação com a área de estudo 1 os dados de gravimetria oceânica estão muito afastados da linha de costa (30 a 170km aproximadamente), o que configura uma dificuldade para futuras modelagens no espaço do geopotencial. Existe na área de estudo, 18 EMs do BNDO, em grande parte concentradas ao norte da EM de Imbituba. Um destaque positivo que é visualizado são as Estações Gravimétricas Terrestres que se apresentam de maneira homogênea no entorno da EM de Imbituba, isso ocorre por esforços de diversas instituições para a densificação de informações de gravidade na região do Datum brasileiro, como a própria UFPR, por exemplo.

FIGURA 35 – DADOS DISPONÍVEIS DA ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA



FONTE: O autor (2020).

Um comentário comum as duas áreas de estudo é com relação as Estações RBMC, em regiões de costa poucas delas são vistas, o que dificulta a modelagem de movimentos verticais nestas regiões e a quantificação de valores de observações do nível do mar de maneira realista, consistente e vinculado a um referencial geocêntrico. Nas áreas de estudo são apenas quatro estações RBMC que estão próximas a costa. O estudo realizado por Montecino et al. (2017) que investiga movimentos verticais a partir da integração de observações maregráficas e de observações de satélites altímetros pode ser apontado aqui como uma solução para contornar a dificuldade encontrada na região costeira brasileira.

## 4.2 ANÁLISE RELATIVA DA ADEQUAÇÃO DOS MODELOS GLOBAIS OCEÂNICOS AS OBSERVAÇÕES LOCAIS

Na área de estudo 1 – Fortaleza, as oito EMs tiveram os NREFs definidos com distintos períodos de observação, a EM 30340 apresenta o maior período de observações para definição dos NREFs, com 731 dias de observações maregráficas, ao passo que as demais não extrapolam setenta dias. A época de definição também é distinta e a variação temporal é extensa: com a época da EM 30112 em 1961 e da EM 30436 em 2014, são aproximadamente 53 anos de variação temporal (QUADRO 7).

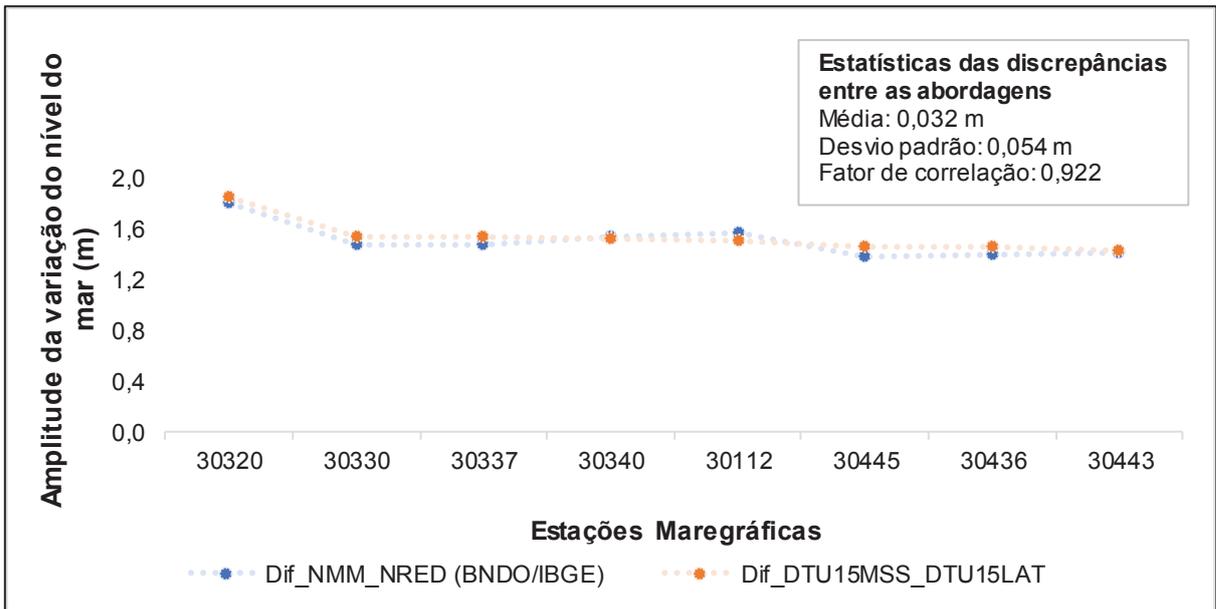
QUADRO 7 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS NA ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA

Número das estações	Nomes das estações	Período de observações		Ano de definição	Período de observações em dias
		Início	Fim		
30330	Paracuru I	22/05/1995	07/07/1995	1995	47
30337	Terminal Portuário de Pecém	27/07/2000	28/08/2000	2000	33
30340	Porto de Mucuripe	18/04/2008	18/04/2010	2010	731
30320	Camocim	06/04/1973	07/05/1973	1973	32
30436	Terminal Salinor	01/11/2014	01/12/2014	2014	30
30112	Areia Branca	04/03/1961	04/04/1961	1961	32
30443	Porto de Guamaré	05/08/1997	05/09/1997	1997	32
30445	Porto de Macau	18/08/2002	25/10/2002	2002	69

FONTE: O autor (2020).

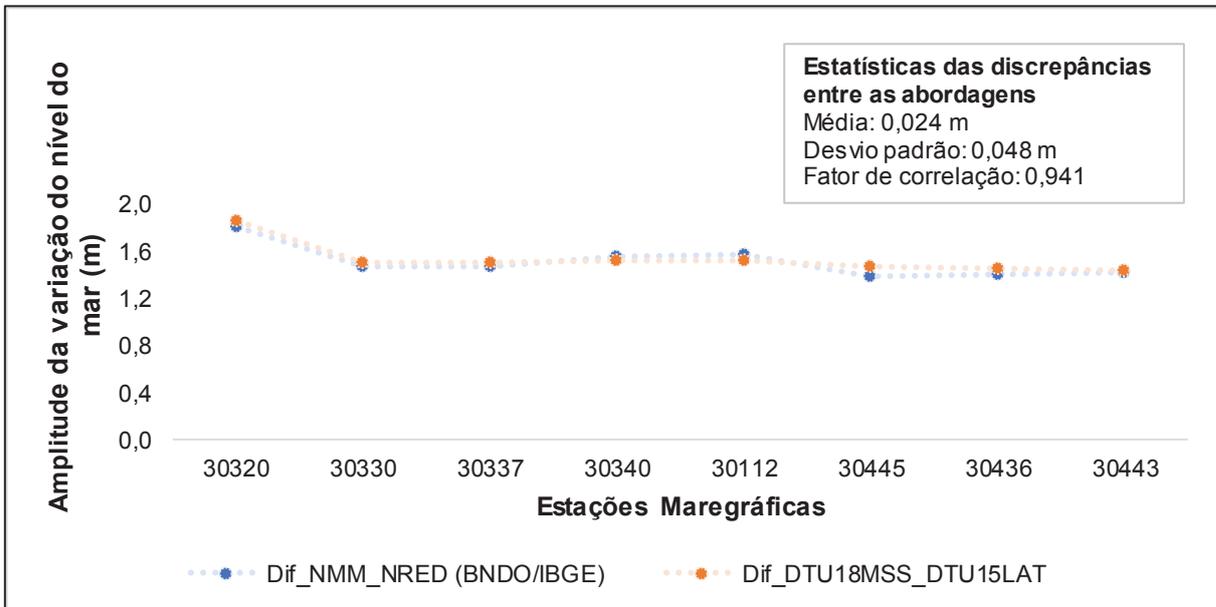
Para o conjunto de análises que foram realizadas na área de estudo 1 estão disponíveis três diferentes modelos de MSS que são fundamentais para a determinação do NMM, os resultados são apresentados no GRÁFICO 3, GRÁFICO 4 e GRÁFICO 5 para os modelos DTU\_15\_MSS, DTU\_18\_MMS e MSS\_CNES\_CLS15, respectivamente.

GRÁFICO 3 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU\_15\_MSS



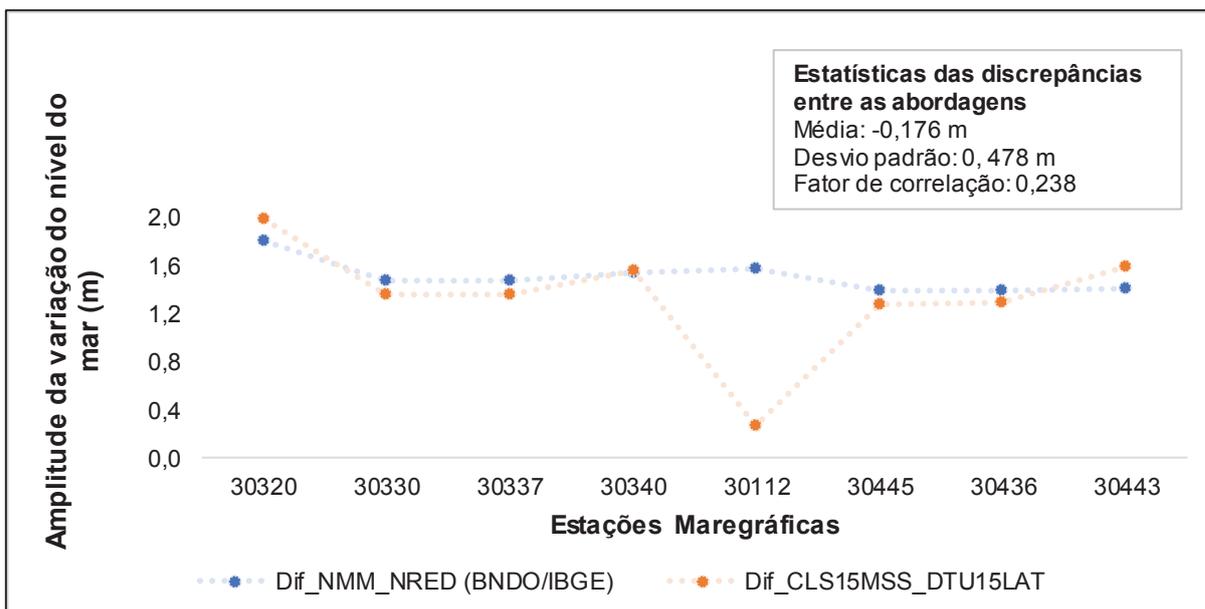
FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 4 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU\_18\_MSS



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 5 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO MSS\_CNES\_CLS15



FONTE: O autor (2020).

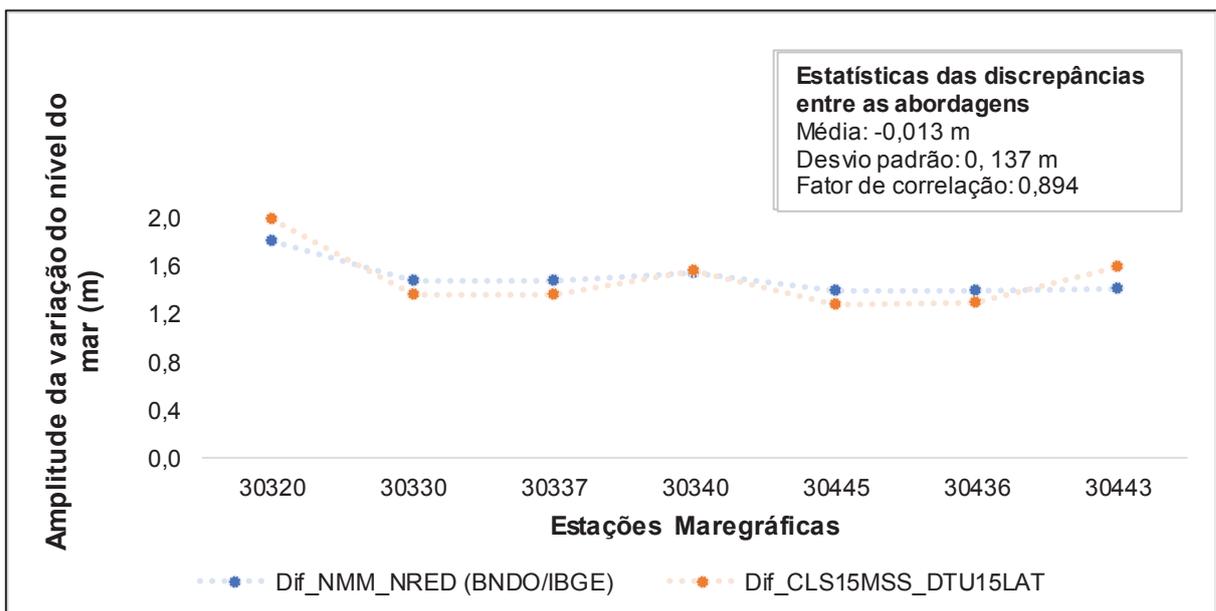
Em média, as diferenças entre os NMMs e NREDs locais das estações desta região são de aproximadamente 1,5 m com dispersão em torno de 13 cm. Isso é um indicativo de que o comportamento, pelo menos para as EMs analisadas, se apresenta homogêneo, sem grandes variações do NMM com relação ao referencial vertical. Ao comparar estas diferenças com as diferenças obtidas pelos modelos na abordagem global resultados compatíveis para alguns modelos foram visualizados.

Quando observado o fator de correlação entre as discrepâncias, as análises calculadas com o modelo DTU\_18\_MSS apresentam a maior correlação e também o menor desvio padrão, o que indica discrepâncias entre as abordagens (local e global) mais homogêneas. Analisando apenas os resultados obtidos com o DTU\_18\_MSS as menores discrepâncias encontradas entre as abordagens são para as EMs 30340 e 30443 que possuem o maior período de observações maregráficas na definição dos NREFs (GRÁFICO 4).

No GRÁFICO 5, para o modelo MSS\_CNES\_CLS15 a estação 30112 apresentou uma discrepância não esperada, levando em conta o comportamento das estações vizinhas. Para tentar justificar o ocorrido, foi investigado a localização da estação e o tempo de observação para a definição do NREF, porém estes fatores não justificam o valor de discrepância obtido. Ao se analisar o modelo de MSS

pontualmente, foi observado um ruído naquela região, ou seja, um padrão diferente para um modelo que tem comportamento relativamente homogêneo em toda a área de estudo. Isto leva a conclusão de que o resultado obtido para a estação 30112 é proveniente de um possível de erro na concepção do modelo de MSS. Por este motivo o GRÁFICO 6 foi gerado sem a estação 30112, para que os valores pudessem ser comparados com os demais modelos.

GRÁFICO 6 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 1 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO MSS\_CNES\_CLS15 SEM A ESTAÇÃO 30112



FONTE: O autor (2020).

Semelhante a área de estudo 1 - Fortaleza, na área de estudo 2 – Imbituba as 18 EMs tiveram os níveis de referência definidos com distintos períodos de observação, a EM 60219 apresenta o maior período de observações para definição dos NREFs, com 608 dias de observações mareográficas, as EMs 60235, 60225, 60264 e 60245 possuem período de observações de aproximadamente um ano e as demais não extrapolam oitenta dias. Da mesma forma, as épocas de definição distam uma das outras, por exemplo, a EM 60245 teve seus NREFs definidos em 1960 e a EM 60219, a mais recente, teve os NREFs definidos em 2018 (QUADRO 8).

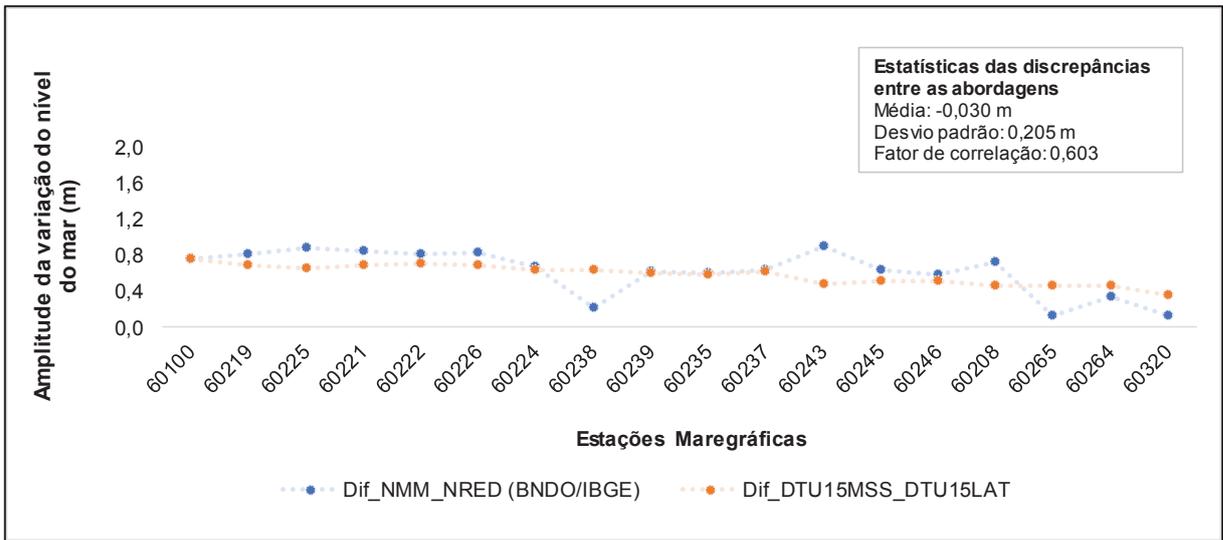
QUADRO 8 – DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS NA ÁREA DE ESTUDO 2 – IMBITUBA

Número das estações	Nomes das estações	Período de observações		Ano de definição	Período de observações em dias
		Início	Fim		
60219	Porto de Itapoá	01/01/2017	31/08/2018	2018	608
60238	Teporti	01/06/2012	01/07/2012	2012	31
60243	Jurerê	03/08/2015	06/09/2015	2015	33
60237	Iate Clube Cabeçudas	01/06/2012	01/07/2012	2012	31
60222	Joinville Iate Clube	13/11/2004	17/12/2004	2004	35
60235	Nova Del. Da Cap. Dos Portos em Itajaí	01/04/2010	01/04/2011	2011	365
60221	Ilha da Rita	03/11/2004	17/12/2004	2004	45
60226	Iate Clube Boa Vista	12/11/2004	17/12/2004	2004	36
60208	Ilha da Paz	06/10/1972	06/11/1972	1972	32
60225	Clube Náutico Cruzeiro do Sul	01/12/2009	01/12/2010	2010	366
60265	Delegacia de Laguna	18/09/2008	30/11/2008	2008	74
60224	Penha	20/08/1974	20/09/1974	1974	32
60264	Porto de Laguna	01/01/1923	04/01/1924	1924	369
60246	Capitania dos Portos de Santa Catarina	04/10/2007	31/01/2008	2008	120
60245	Porto de Florianópolis	02/01/1960	21/12/1960	1960	355
60239	Terminal Trocadeiros	03/04/2016	03/05/2016	2016	31
60100	Guaratuba Iate Clube	17/11/1995	15/12/1995	1995	29
60320	Tramandaí	07/10/1961	07/11/1961	1961	32

FONTE: O autor (2020).

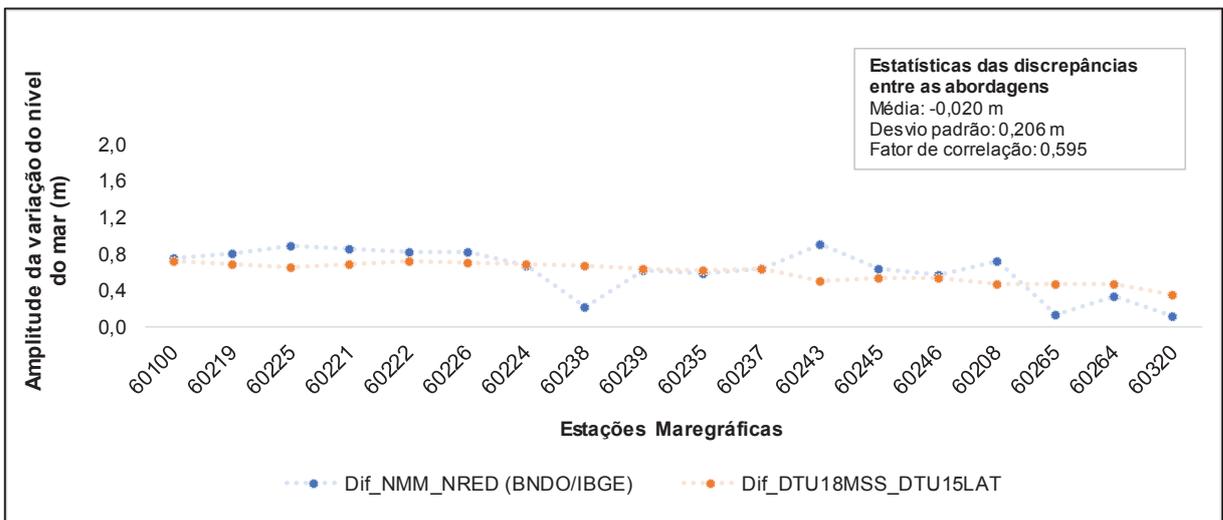
Os três modelos de MSS (DTU\_15\_MSS, DTU\_18\_MMS e MSS\_CNES\_CLS15) foram utilizados para as análises desta área de estudo, os GRÁFICOS 7, 8 e 9 apresentam os resultados encontrados.

GRÁFICO 7 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 2 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU\_15\_MSS



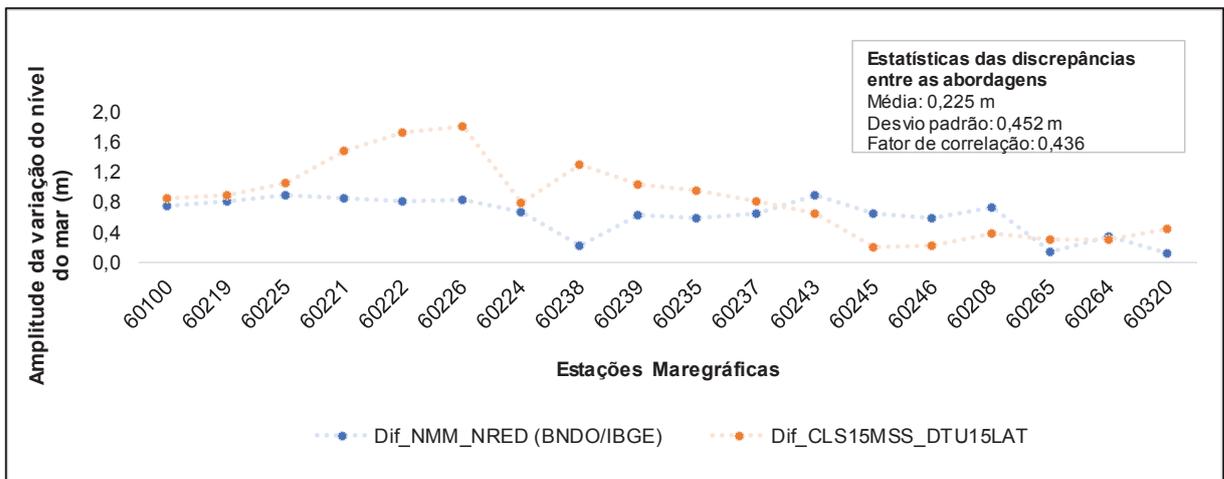
FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 8 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 2 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO DTU\_18\_MSS



FONTE: O autor (2020).

GRÁFICO 9 – ANÁLISE RELATIVA DO COMPORTAMENTO DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO 2 POR COMPARAÇÃO ENTRE A ABORDAGEM GLOBAL E LOCAL UTILIZANDO O MODELO MSS\_CNES\_CLS15



FONTE: O autor (2020).

Diferente da área de estudos 1 – Fortaleza, em média, as diferenças entre os NMMs e NREDs locais das estações desta região são de aproximadamente 60 cm, com dispersão em torno de 25 cm. Com amplitude menor e com a dispersão maior dos níveis é possível pontuar uma dinâmica diferente nesta região de estudo. Ao realizar a comparação das diferenças entre o NMMs e NREDs locais com as diferenças obtidas pelos modelos na abordagem global as discrepâncias apresentam menor adequação quando comparadas com as discrepâncias obtidas para a área de estudo 1 - Fortaleza.

O fator de correlação aponta para uma adequação ligeiramente melhor às observações locais dos modelos DTU\_15\_MSS e DTU\_18\_MSS, com relação ao modelo MSS\_CNES\_CLS15. Já a dispersão das discrepâncias não é mais homogênea para este modelo. De maneira geral, os dois modelos DTU apresentam valores bem similares. Analisando apenas os resultados obtidos com o DTU\_18\_MSS a EM 60237 apresenta menor discrepância, uma estação com 31 dias de observações maregráficas na definição dos NREFs, isso comprova que o período de observações não influenciou nas análises das discrepâncias das abordagens estudadas (GRÁFICO 8).

#### 4.3 ESTABELECIMENTO DA POSIÇÃO GEOCÊNTRICA DOS NREFS

A fim de proceder ao estabelecimento da altitude elipsoidal das RNs primárias, objetivando o vínculo dos NREFs com relação ao referencial global, as RNs com altitudes elipsoidais dos circuitos do CGEM foram organizadas, os valores dos desníveis brutos e ajustados com relação as RNs primárias foram calculados, as altitudes elipsoidais foram convertidas para o sistema de maré médio e a distâncias aproximadas também foram quantificadas conforme é apresentado nas Tabelas 5 e 6. Os desníveis brutos foram obtidos pela média do somatório dos trajetos de nivelamento e contranivelamento, de outra maneira, os desníveis ajustados originaram das diferenças de altitudes normais-ortométricas ajustadas na rede do CGEM.

TABELA 5 – DESCRIÇÃO DOS DESNÍVEIS, ALTITUDES E DISTÂNCIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DO CGEM COM RELAÇÃO A RN PRIMÁRIA 4336A - FORTALEZA

RNs	Desnível bruto	Desnível ajustado	Distância aproximada	Altitude elipsoidal <sup>12</sup>	Altitude Normal-Ortométrica
4336A	-	-	-	-	3,703 m
4336G	+0,031 m	+0,031 m	85,371 m	-5,567 m	3,671 m
4357J	-0,048 m	-0,048 m	88,071 m	-5,480 m	3,750 m
4336U	-10,357 m	-10,357 m	687,554 m	4,843 m	14,060 m
4357R	-8,617 m	-8,617 m	844,595 m	3,062 m	12,320 m
4357L	-0,163 m	-0,163 m	1085,125 m	-5,363 m	3,866 m

FONTE: O autor (2020).

NOTA: Observações geodésicas obtidas em IBGE (2019c).

TABELA 6 – DESCRIÇÃO DOS DESNÍVEIS, ALTITUDES E DISTÂNCIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DO CGEM COM RELAÇÃO A RN PRIMÁRIA 3012X - IMBITUBA

RNs	Desnível bruto	Desnível ajustado	Distância aproximada	Altitude elipsoidal <sup>12</sup>	Altitude Normal-Ortométrica
3012X	-	-	-	-	2,045 m
3130G	-4,458 m	-4,458 m	262,105 m	7,780 m	6,503 m
3130H	-4,892 m	-4,893 m	887,161 m	8,207 m	6,938 m
3087J	-8,499 m	-8,502 m	815,614 m	11,827 m	10,547 m

FONTE: O autor (2020).

NOTA: Observações geodésicas obtidas em IBGE (2019c).

Pela qualidade e critério dos levantamentos altimétricos de alta precisão do tipo científico que são realizados na região das EMs da RMPG (IBGE, 2017), os

<sup>12</sup> Valores de altitudes elipsoidais convertidos do sistema livre de maré para o sistema de maré médio.

desníveis brutos e ajustados não apresentaram diferenças significativas entre si. Mesmo assim, por entender que os desníveis ajustados passaram pelo controle do ajustamento das observações eles foram considerados nas estimativas das altitudes elipsoidais para as RN primárias. As altitudes das RNs primárias, em Fortaleza e Imituba, foram estimadas considerando diferentes trajetos do nivelamento, conforme possibilidades apresentadas anteriormente nas Figuras 31 e 32 (seção 3.3.4). Estas diferentes possibilidades, partindo de diferentes RNs vizinhas proporcionaram a estimativa de 5 valores de altitudes elipsoidais para a RN primária em Fortaleza e 3 valores para Imituba.

Para a primeira estimativa das altitudes elipsoidais, os valores de altitudes geoidais foram considerados iguais entre as RNs vizinhas e as RNs primárias, principalmente porque o valor da altitude geoidal das RNs primárias não era conhecido. Dado este fato, com o objetivo de investigar o comportamento geoidal nas regiões estudadas, altitudes geoidais locais foram calculadas para as RNs vizinhas, estes valores foram possíveis pelo conhecimento das altitudes nomais-ortométricas e elipsoidais destas RNs (TABELAS 7 e 8).

TABELA 7 – DIFERENTES SOLUÇÕES PARA O VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL DA RN4336A E A CORRELAÇÃO DOS VALORES COM A ALTITUDE GEOIDAL

Trajetos percorridos	Altitude Elipsoidal estimada para RN4336A	Altitudes Geoidais Locais
RN4336A/RN4336G	-5,536 m	-9,238 m
RN4336A/RN4357J	-5,528 m	-9,230 m
RN4336A/RN4336U	-5,514 m	-9,217 m
RN4336A/RN4357R	-5,555 m	-9,258 m
RN4336A/RN4357L	-5,526 m	-9,229 m
Média	-5,532 m	-9,234 m
Desvio Padrão	0,015 m	0,015 m

FONTE: O autor (2020).

TABELA 8 – DIFERENTES SOLUÇÕES PARA O VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL DA RN3012X E A CORRELAÇÃO DOS VALORES COM A ALTITUDE GEOIDAL

Trajetos percorridos	Altitude Elipsoidal estimada	Altitudes Geoidais Locais
RN3012X/RN3130G	3,322 m	1,277 m
RN3012X/RN3130H	3,314 m	1,269 m
RN3012X/RN3087J	3,325 m	1,280 m
Média	3,320 m	1,275 m
Desvio Padrão	0,006 m	0,006 m

FONTE: O autor (2020).

Considerando o comportamento geoidal com variações centimétricas, propõe-se trabalhar com MGGs na obtenção de altitudes geoidais para que o não conhecimento da altitude geoidal das RNs primárias seja solucionado. Foi escolhido o modelo XGM2019 com grau de desenvolvimento de 2190 para a estimativa de um valor de altitude geoidal para as RNs primárias. Para entender o comportamento do geoide local e o geoide baseado em MGG, os valores de altitudes geoidais locais e altitudes geoidais modeladas foram confrontados, conforme Tabelas 9 e 10. O RMS para a área de estudo 1 – Fortaleza foi de 0,193 m e para a área de estudo 2 – Imituba foi de 0,466 m.

TABELA 9 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ALTITUDES GEOIDAIIS OBTIDAS POR OBSERVAÇÕES LOCAIS E PROVENIENTES DO MGG XGM2019 PARA A ÁREA DE ESTUDO 1 - FORTALEZA

<b>RN</b>	<b>Altitude Geoidal das RNs - Locais</b>	<b>Altitude Geoidal das RNs – MGG</b>	<b>Diferença</b>
RN4336G	-9,238 m	-9,429 m	-0,191 m
RN4357J	-9,230 m	-9,429 m	-0,199 m
RN4336U	-9,217 m	-9,424 m	-0,197 m
RN4357R	-9,258 m	-9,425 m	-0,167 m
RN4357L	-9,229 m	-9,426 m	-0,207 m
Média	-9,234 m	-9,427 m	-0,192 m
RMS	-	-	0,193 m

FONTE: O autor (2020).

TABELA 10 – COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE ALTITUDES GEOIDAIIS OBTIDAS POR OBSERVAÇÕES LOCAIS E PROVENIENTES DO MGG XGM2019 PARA A ÁREA DE ESTUDO 2 - IMBITUBA

<b>RN</b>	<b>Altitude Geoidal das RNs - Locais</b>	<b>Altitude Geoidal das RNs - MGG</b>	<b>Diferença</b>
RN3130G	1,277 m	0,811 m	-0,464 m
RN3130H	1,269 m	0,804 m	-0,465 m
RN3087J	1,280 m	0,814 m	-0,466 m
Média	1,275 m	0,809 m	-0,466 m
RMS	-	-	0,466 m

FONTE: O autor (2020).

Os valores das altitudes geoidais para as RNs 4336A e 3012X obtidos pelo modelo XGM2019 foram de -9,429 m e 0,813 m, respectivamente. Descontando os valores de RMS calculados as altitudes geoidais das RNs 4336A e 3012X ficam estabelecidos como -9,236 m e 1,279 m, o que possibilita os cálculos para uma nova obtenção de altitudes elipsoidais para estas RNs primárias. A aplicação desta correção ao valor da altitude geoidal foi inspirada em Gruber e Willberg (2019) que consideraram a existência de erros sistemáticos entre os valores de altitudes geoidais

observadas e modeladas devido às definições locais dos sistemas de altitudes em cada região do globo, os autores também utilizaram os valores de RMS como correções a serem aplicadas aos valores de altitude geoidal provenientes dos modelos. A afirmação dos autores pode ser confirmada ao verificar que os valores da TNMM para Imbituba (seção 4.5) são muito próximos ao RMS apresentado na Tabela 10. Sendo assim, ao se atualizar os valores de altitudes elipsoidais das RNs por meio da adição desnível geoidal entre as RNs primárias e vizinhas, é notório o ganho de confiabilidade no valor pela análise do desvio padrão encontrado entre as soluções (TABELAS 11 e 12).

TABELA 11 – CÁLCULO DO VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL PARA RN4336A E A RESPECTIVA PRECISÃO

Trajetos percorridos	Altitude Geoidal estimada para RN4336A	Altitude Geoidal das RNs - Locais	Altitude Elipsoidal estimada para RN4336A	Desnível geoidal do trajeto	Valor atualizado da Altitude elipsoidal estimada para RN4336A
RN4336A/RN4336A	-9,236 m				
RN4336A/RN4336G		-9,238 m	-5,536 m	0,002 m	-5,534 m
RN4336A/RN4357J		-9,230 m	-5,528 m	-0,006 m	-5,534 m
RN4336A/RN4336U		-9,217 m	-5,514 m	-0,019 m	-5,533 m
RN4336A/RN4357R		-9,258 m	-5,555 m	-0,022 m	-5,533 m
RN4336A/RN4357L		-9,229 m	-5,526 m	-0,007 m	-5,533 m
Média		-9,234 m	-5,532 m	-0,002 m	-5,533 m
Desvio Padrão		0,015 m	0,015 m	0,015 m	0,001 m

FONTE: O autor (2020).

TABELA 12 – CÁLCULO DO VALOR DA ALTITUDE ELIPSOIDAL PARA RN3012X E A RESPECTIVA PRECISÃO

Trajetos percorridos	Altitude Geoidal estimada para RN3012X	Altitude Geoidal das RNs - Locais	Altitude Elipsoidal estimada para RN3012X	Desnível geoidal do trajeto	Valor atualizado da Altitude elipsoidal estimada para RN3012X
RN3012X/RN3012X	1,279 m				
RN3012X/RN3130G		1,277 m	3,322 m	-0,001 m	3,327 m
RN3012X/RN3130H		1,269 m	3,314 m	0,010 m	3,324 m
RN3012X/RN3087J		1,280 m	3,325 m	0,002 m	3,321 m
Média		1,275 m	3,320 m	0,004 m	3,324 m
Desvio padrão		0,006 m	0,006 m	0,006 m	0,003 m

FONTE: O autor (2020).

Determinadas as altitudes elipsoidais das RNs primárias, os NREFs das EMs podem ser representados com relação a um referencial global, que no caso é o GRS80 (TABELA 13). Tanto o NRED quanto o NMM são níveis estabelecidos pela DHN e os valores foram extraídos das respectivas fichas F-41 das EMs: F41 - Padrão - PORTO

DE MUCURIPE - 30340 - Versão 1/2018 para a EM de Fortaleza e F41 - Padrão - PORTO DE IMBITUBA - 60250 - Versão 1/2019.

TABELA 13 – NÍVEIS LOCAIS DA DHN REFERIDOS AO ELIPSOIDE GRS80

<b>Estação Maregráfica</b>	<b>Nível de Redução (NRED)</b>	<b>Nível Médio do Mar (NMM)</b>	<b>Época</b>
EM-Fortaleza (30340)	-10,322 m	-8,777 m	18/04/2008 a 18/04/2010
EM-Imbituba (60250)	0,873 m	1,282 m	01/01/1957 a 31/12/1957

FONTE: O autor (2020).

Em alternativa, dois conjuntos de observações maregráficas das duas estações da RMPG que compõem a pesquisa foram utilizados para a determinação do NMM para cada local. Para o estabelecimento da posição geocêntrica das observações, a conexão dos níveis existentes entre os zeros do sensor e as RNs primárias foi baseada nas correlações existentes em IBGE (2015). A conexão poderia ser realizada a partir da correlação do NRED ou do vínculo com o DVB-I, as duas estratégias foram testadas a fim de avaliar as duas opções. Os resultados apresentaram-se convergentes com diferenças de 1 mm (TABELA 14). O valor do NMM para as EMs foi obtido por média simples dos dados maregráficos disponíveis até 2015.

Para a EM de Fortaleza os dados maregráficos referem-se ao período de abril de 2008 a dezembro de 2015, os dados maregráficos são horários e foram identificadas 626 horas ( $\cong 1\%$ ) sem informações, em um total de 67533 horas que fizeram parte do cálculo do NMM. De maneira semelhante, para a EM de Imbituba também foram identificadas horas sem observações maregráficas, um total de 24352 horas ( $\cong 19\%$ ), para esta estação o NMM foi calculado com observações de 125865 horas compreendendo o período de agosto de 2001 a dezembro de 2015.

TABELA 14 – NMM DE ESTAÇÕES RMPG REFERIDOS AO ELIPSOIDE GRS80

<b>Estação Maregráfica</b>	<b>Nível Médio do Mar (NRED)</b>	<b>Nível Médio do Mar (DVB-I)</b>	<b>Época</b>
EM-Fortaleza (RMPG)	-8,756 m	-8,755 m	18/04/2008 a 31/12/2015
EM-Imbituba (RMPG)	1,352 m	1,353 m	22/08/2001 a 31/12/2015

FONTE: O autor (2020).

#### 4.4 ANÁLISE ABSOLUTA DA ADEQUAÇÃO DOS MODELOS GLOBAIS OCEÂNICOS AS OBSERVAÇÕES LOCAIS

Ao observar as diferenças entre a superfície LAT e o NRED é visto que para as duas EMs, Fortaleza e Imbituba, os NREDs se encontram abaixo da superfície LAT, 15,6 cm e 6 mm, respectivamente. Na comparação dos valores de NMMs com relação aos três modelos de MSS as diferenças são de 13,1 cm a 16,7 cm para a EM de Fortaleza e 2,3 a 8,3 cm para a EM de Imbituba (TABELA 15). Era esperado que a superfície LAT estivesse ligeiramente abaixo do NRED, no entanto, isso não foi notado, é provável que a precisão alcançada pelo modelo ainda não seja suficiente para modelar a superfície LAT de maneira fidedigna. As diferenças encontradas nos NMMs são explicadas pelo tipo de processamento que cada modelo possui, com relação aos níveis locais a época de definição e o período das observações também justificam as diferenças.

TABELA 15 – NÍVEIS GLOBAIS BASEADOS EM MODELOS E DIFERENÇAS COM RELAÇÃO AOS NÍVEIS LOCAIS

EM	LAT	Diferença com relação ao NRED	NMM (Modelos de MSS)	Diferença com relação ao NMM/DHN	Diferença com relação ao NMM/RMPG
Fortaleza	-10,166m (DTU_LAT_15)	-0,156 m	-8,610 m (CNES/CLS15)	-0,167 m	-0,145 m
			-8,642 m (DTU_15)	-0,135 m	-0,113 m
			-8,646 m (DTU_18)	-0,131 m	-0,109 m
Imbituba	0,879 m (DTU_LAT_15)	0,006 m	1,305 m (CNES_CLS15)	-0,023 m	-0,048 m
			1,350 m (DTU_15)	-0,068 m	-0,003 m
			1,365 m (DTU_18)	-0,083 m	-0,012 m

FONTE: O autor (2020).

#### 4.5 ESTIMATIVAS DA TNMM

Com os NREFs locais conectados ao referencial global a partir da obtenção de altitudes elipsoidais relativas ao GRS80 o cálculo da TNMM foi consolidado em função das altitudes elipsoidais do NMM local e aquelas provenientes de MGOs, isso porque, a TNMM pode ser calculada a partir do afastamento entre o geoide e o NMM. O valor médio encontrado para a EM de Fortaleza é de 77,2 cm com desvio padrão

de 7,3 cm. A TNMM apresenta variação de 65,2 a 87,7 cm para esta EM, com estimativas baseadas em cinco diferentes NMM e quatro MGGs distintos com relação ao GRS80 (TABELA 16). Na EM de Imbituba, o valor médio encontrado é de 51,9 cm com desvio padrão de 4 cm, os valores de TNMM variam entre 44,1 a 58,5 cm (TABELA 17). Para estas estimativas foram utilizados apenas os modelos globais do geopotencial no cálculo da altitude geoidal, por este motivo, o MAPGEO2015 não foi considerado.

TABELA 16 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA COM MGGs COM RELAÇÃO AO GRS80

	NMM (DHN)	NMM (RMPG)	CNES_CLS15	DTU_15	DTU_18	Média	Desvio Padrão
<b>EGM2008</b>	0,662 m	0,684 m	0,829 m	0,797 m	0,793 m	0,753 m	0,075 m
<b>EIGEN-6C4</b>	0,699 m	0,721 m	0,866 m	0,834 m	0,830 m	0,790 m	0,075 m
<b>XGM2016</b>	0,710 m	0,732 m	0,877 m	0,845 m	0,841 m	0,801 m	0,075 m
<b>XGM2019</b>	0,652 m	0,674 m	0,819 m	0,787 m	0,783 m	0,743 m	0,075 m
<b>Média</b>	0,681 m	0,703 m	0,848 m	0,816 m	0,812 m	0,772 m	-
<b>Desvio Padrão</b>	0,028 m	0,028 m	0,028 m	0,028 m	0,028 m	-	0,073 m

FONTE: O autor (2020).

TABELA 17 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE IMBITUBA COM MGGs COM RELAÇÃO AO GRS80

	NMM (DHN)	NMM (RMPG)	CNES_CLS15	DTU_15	DTU_18	Média	Desvio Padrão
<b>EGM2008</b>	0,441 m	0,512 m	0,464 m	0,509 m	0,524 m	0,490 m	0,036 m
<b>EIGEN-6C4</b>	0,502 m	0,573 m	0,525 m	0,570 m	0,585 m	0,551 m	0,036 m
<b>XGM2016</b>	0,469 m	0,540 m	0,492 m	0,537 m	0,552 m	0,518 m	0,036 m
<b>XGM2019</b>	0,469 m	0,540 m	0,492 m	0,537 m	0,552 m	0,518 m	0,036 m
<b>Média</b>	0,470 m	0,541 m	0,493 m	0,538 m	0,553 m	0,519 m	-
<b>Desvio Padrão</b>	0,025 m	0,025 m	0,025 m	0,025 m	0,025 m	-	0,040 m

FONTE: O autor (2020).

No estudo foi convencionado a adoção do sistema de maré permanente médio e como elipsoide de referência o GRS80, assim os primeiros resultados da TNMM foram calculados seguindo esta padronização. No entanto, foi notado uma diferença nas altitudes geoidais obtidas com relação aos elipsoides GRS80 e WGS84. Com os valores das altitudes geoidais para cada EM, MGGs e elipsoides apresentados na Tabela 18, foi constatada uma diferença aproximada de 93 cm entre as altitudes geoidais referidas aos distintos elipsoides.

TABELA 18 – ALTITUDES GEOIDAIS CALCULADAS PARA AS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS

<b>MGG</b>	<b>Altitude Geoidal com relação ao GRS80 - Fortaleza</b>	<b>Altitude Geoidal com relação ao WGS84 - Fortaleza</b>	<b>Altitude Geoidal com relação ao GRS80 - Imbituba</b>	<b>Altitude Geoidal com relação ao WGS84 - Imbituba</b>
EGM2008	-9,439 m	-8,505 m	0,841 m	1,774 m
EIGEN-6C4	-9,476 m	-8,542 m	0,780 m	1,713 m
XGM2016	-9,487 m	-8,553 m	0,813 m	1,746 m
XGM2019	-9,429 m	-8,495 m	0,813 m	1,746 m

FONTE: O autor (2020).

As diferenças apresentadas nas altitudes geoidais proporcionaram valores diferentes de TNMM, por esta questão também foram calculadas TNMMs a partir da altitude geoidal com relação ao elipsoide WGS84. Algo substancial na análise dos resultados é que neste caso os valores de TNMM foram negativos para as duas EMs estudadas, indicando geóide abaixo do NMM para todos os modelos de MSS e valores de NMM locais (TABELA 19 e 20).

TABELA 19 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE FORTALEZA COM MGGs COM RELAÇÃO AO WGS84

	<b>NMM (DHN)</b>	<b>NMM (RMPG)</b>	<b>CNES_CLS15</b>	<b>DTU_15</b>	<b>DTU_18</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>EGM2008</b>	-0,272 m	-0,250 m	-0,105 m	-0,137 m	-0,141 m	-0,181 m	0,075 m
<b>EIGEN-6C4</b>	-0,235 m	-0,213 m	-0,068 m	-0,100 m	-0,104 m	-0,144 m	0,075 m
<b>XGM2016</b>	-0,224 m	-0,202 m	-0,057 m	-0,089 m	-0,093 m	-0,133 m	0,075 m
<b>XGM2019</b>	-0,282 m	-0,260 m	-0,115 m	-0,147 m	-0,151 m	-0,191 m	0,075 m
<b>Média</b>	-0,253 m	-0,231 m	-0,086 m	-0,118 m	-0,122 m	-0,162 m	-
<b>Desvio Padrão</b>	0,028 m	0,028 m	0,028 m	0,028 m	0,028 m	-	0,073 m

FONTE: O autor (2020).

TABELA 20 – ESTIMATIVAS DA TNMM PARA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DE IMBITUBA COM MGGs COM RELAÇÃO AO WGS84

	<b>NMM (DHN)</b>	<b>NMM (RMPG)</b>	<b>CNES_CLS15</b>	<b>DTU_15</b>	<b>DTU_18</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>EGM2008</b>	-0,492 m	-0,421 m	-0,469 m	-0,424 m	-0,409 m	-0,443 m	0,036 m
<b>EIGEN-6C4</b>	-0,431 m	-0,360 m	-0,408 m	-0,363 m	-0,348 m	-0,382 m	0,036 m
<b>XGM2016</b>	-0,464 m	-0,393 m	-0,441 m	-0,396 m	-0,381 m	-0,415 m	0,036 m
<b>XGM2019</b>	-0,464 m	-0,393 m	-0,441 m	-0,396 m	-0,381 m	-0,415 m	0,036 m
<b>Média</b>	-0,463 m	-0,392 m	-0,440 m	-0,395 m	-0,380 m	-0,414 m	-
<b>Desvio Padrão</b>	0,025 m	0,025 m	0,025 m	0,025 m	0,025 m	-	0,039 m

FONTE: O autor (2020).

O afastamento entre os geóides com relação a cada elipsoide ocorre porque os elipsoides são geometricamente coincidentes, porém, fisicamente diferentes. De

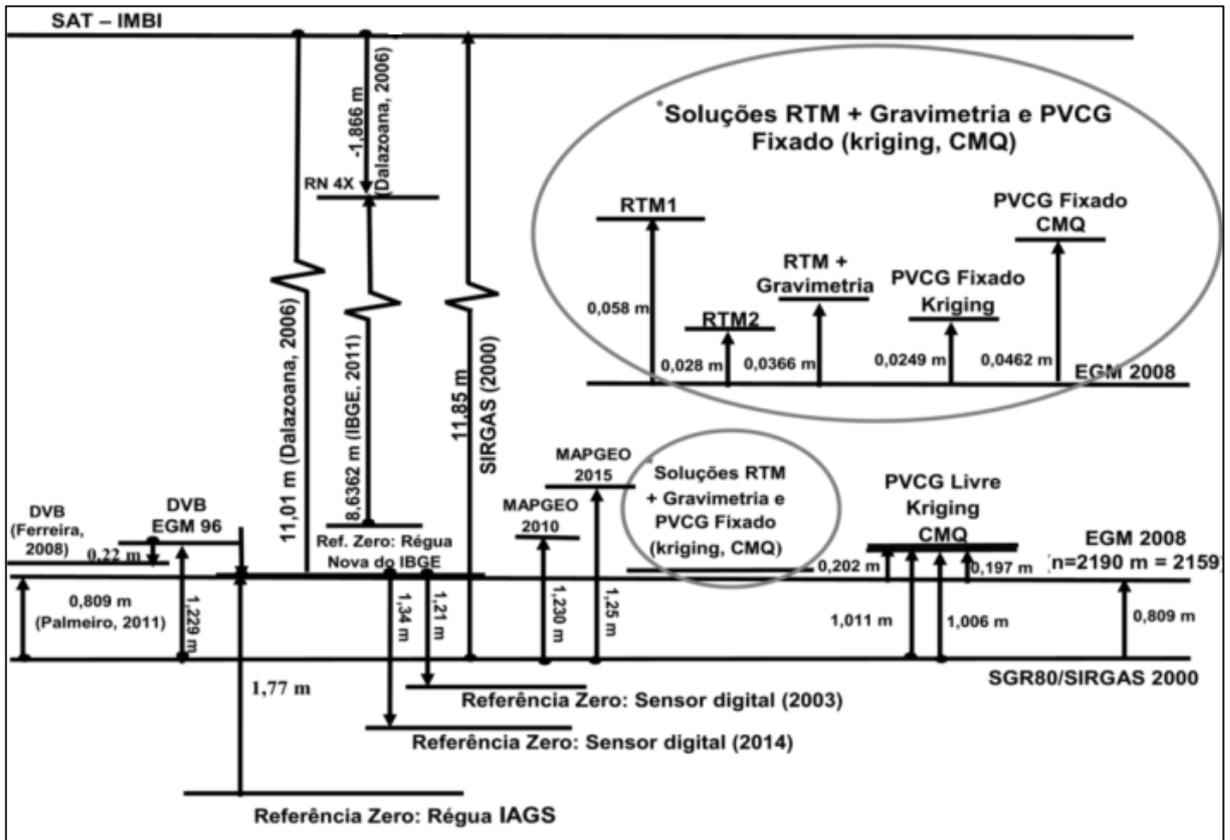
acordo com ICGEM (2019b), os parâmetros físicos dos elipsoides são divergentes, cada um deles apresenta valor não coincidente de Constante Gravitacional Geocêntrica (GM). GM é uma das constantes físicas inerentes as definições de elipsoides de referência e compõe o conjunto de variáveis para o cálculo do termo de grau zero, sendo este também o principal motivo para as diferenças das altitudes geoidais, já que o termo de grau zero foi considerado para o cálculo das funcionais. Neste ponto, é importante comentar que para o uso integrado de observações geodésicas e a compatibilização de distintos sistemas geodésicos de referência a sistematização e padronização de qual sistema de referência adotar em um projeto é uma tarefa primordial devido ao impacto que poderá ser gerado nas quantidades geodésicas envolvidas.

#### 4.6 ATUALIZAÇÃO, COMPLEMENTAÇÃO E ADEQUAÇÃO DOS NREFS

Os NREFs locais nas EMs no Brasil são definidos e estabelecidos pelo IBGE e a DHN. Estudos desenvolvidos por Dalazoana (2006), Ferreira (2008), Palmeiro (2011) e Da Silva (2017) resultaram em valores dos NREFs referidos a um sistema de referência global para a EM de Imbituba baseado em diferentes soluções (FIGURA 36). De posse dos resultados encontrados nas etapas anteriores já percorridas neste estudo, foi possível a atualização, complementação e adequação dos NREFs por meio de observações geodésicas, modelos e estratégias distintas daquelas dos estudos anteriores. Desta forma foram concluídos os objetivos essenciais do trabalho a partir dos NREFs apresentados na sequência.

Com os valores estimados da TNMM variando entre 44,1 a 58,5 cm na EM de Imbituba (seção 4.5), se torna importante acrescentar que alguns destes valores estão próximos do valor estimado por Sánchez e Sideris (2017) do afastamento entre o DVB-I e o  $W_0$  (geoide global), que para os autores é de 38,7 cm com precisão de 1,8 cm. No entanto, ao analisar os NREFs antecedentes apresentados na Figura 37, foi notado valores distantes aos encontrados na pesquisa. Por exemplo, o estudo de Ferreira (2008) apresentou um afastamento do DVB-I com relação ao EGM96 de 22 cm e o estudo de Palmeiro (2011) foram apresentados valores entre 2 a 6 cm a partir de distintas soluções para ao afastamento do DVB-I com relação ao EGM2008.

FIGURA 36 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA ANTECEDENTES ESTABELECIDOS PARA A REGIÃO DE IMBITUBA



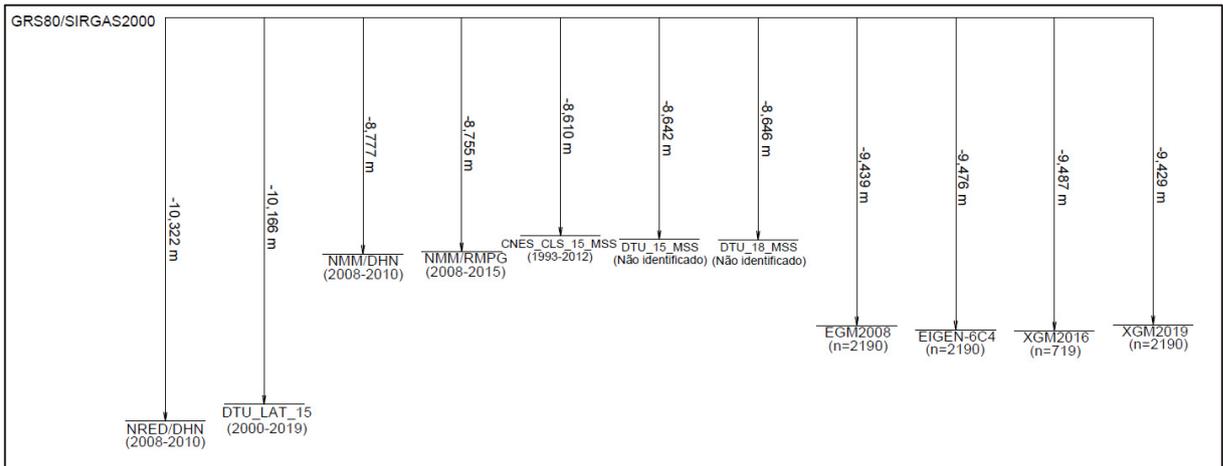
FONTE: DALAZOANA (2006), FERREIRA (2008), PALMEIRO (2011) e DA SILVA (2017).

As FIGURAS 37 e 38 apresentam os NREFs para as EMs de Fortaleza e Imbituba, eles são baseados em observações locais, MGGs e MSS para estas duas EMs da RMPG que tiveram os NREFs geocêntricos calculados neste trabalho. Primeiramente são apresentados os níveis relativos ao NRED e superfície LAT, depois os NMMs obtidos por observações maregráficas e por MGO e por fim os valores de altitudes geoidais para os quatro MGGs selecionados para este estudo.

Acredita-se que as diferenças encontradas entre os NMMs locais e aqueles baseados em modelos se devem a não aplicação de correções que levem em conta possíveis movimentos da crosta e evolução temporal do NMM, além claro, dos erros inerentes a obtenção das medidas de nível do mar pelo satélite altímetro. Nas figuras é possível observar ainda que para ambas as EMs os modelos DTU de MSS se aproximaram mais dos NMM locais. Quanto às altitudes geoidais dos MGGs: EGM2008 e XGM2019 apresentaram resultados mais próximos entre si e o mesmo

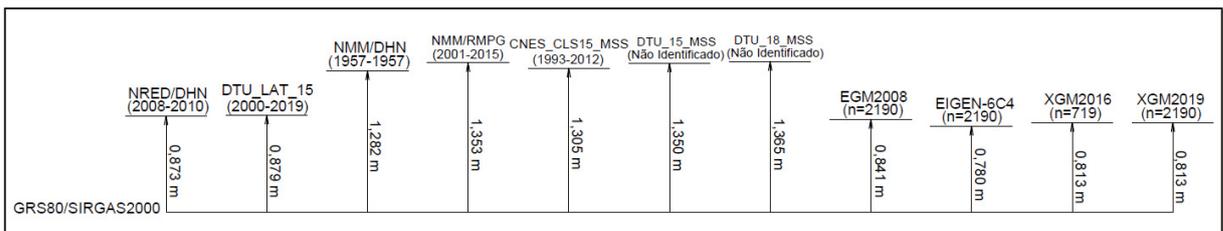
foi observado para os modelos EIGEN-6C4 e XGM2016 na EM de Fortaleza; já na EM de Imbituba, os modelos XGM2016 e XGM2019 apresentam resultados idênticos e o modelo EGM2008 é o que apresenta maior discrepância com relação aos demais.

FIGURA 37 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA REFERIDOS AO GRS80/SIRGAS2000 PARA A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA RMPG EM FORTALEZA



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 38 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA REFERIDOS AO GRS80/SIRGAS2000 PARA A ESTAÇÃO MAREGRÁFICA DA RMPG EM IMBITUBA



FONTE: O autor (2020).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação proposta e apresentada no estudo aponta para dificuldades com relação as estações geodésicas nas regiões costeiras, como por exemplo, a escassez de gravimetria oceânica, a necessidade de levantamentos gravimétricos mais atuais, a pouca quantidade de estações monitoramento contínuo GNSS em regiões próximas a costa, a pouca quantidade de EMs com períodos longos de observações e a necessidade do estabelecimento da posição geocêntrica das EMs para que possa ser estabelecida a integração com a técnica de altimetria por satélite para a futura consolidação de um referencial oceânico unificado.

Nos moldes do projeto BLAST, a escassez e a distribuição espacial heterogênea de observações gravimétricas terrestres e oceânicas precisam ser tratadas, tendo em vista a indispensabilidade para o cálculo de modelos geoidais e para a busca da solução do PVCG para a integração das componentes verticais de maneira consistente e já vinculada ao referencial global para altitudes. Uma alternativa, é a possibilidade de levantamentos aerogravimétricos para preenchimentos de vazios na parte terrestre e oceânica, e também, essencialmente nas linhas costeiras. A potencialidade positiva de observações aerogravimétricas para finalidades geodésicas foi discutida e validada por Jesus (2019). Além destas questões, o cálculo de modelos hidrodinâmicos de águas rasas para a realidade brasileira que possui dimensões continentais requer esforços e investimentos ainda não observados no país. Outro ponto é a necessidade de um maior conjunto de EMs, mesmo com os esforços apresentados pelo IBGE com a concepção e manutenção da RMPG, um maior conjunto de EMs será necessário para a execução da integração das componentes verticais na costa brasileira.

Os resultados analisados apontam para a melhor adequação do modelo DTU\_18\_MSS às observações locais para a área de estudo 1 – Fortaleza com relação aos demais modelos analisados, para a área de estudo 2 - Imbituba, os modelos DTU tiveram melhor adequação na comparação com o modelo CLS. Para o DTU\_18\_MSS, acredita-se que os 2 anos de observações advindos do Sentinel 3A contribuíram para a melhoria do modelo na região costeira. Ficou evidente que a menor variabilidade da maré na região de Fortaleza acarreta melhores resultados a aplicação dos modelos, já que para a região de Imbituba onde é visto uma dinâmica menos homogênea os coeficientes de correlação das análises foram menores. O que configura um desafio,

tendo em vista a grande extensão da costa brasileira é o comportamento heterogêneo da amplitude de maré ao longo do litoral brasileiro. Por exemplo, na região de São Luiz-MA (mais ao norte), a amplitude chega a ser nove vezes maior do que na região de Imbituba-SC (mais ao sul) (IBGE, 2009).

Quanto ao desempenho do modelo MSS\_CNES\_CLS15, ele foi o modelo que apresentou os piores resultados na análise relativa do comportamento dos níveis para as duas áreas de estudo e na análise absoluta foi o modelo com maior diferença com relação aos níveis locais. O sistema de maré considerado para o modelo foi o sistema de maré médio, a decisão pelo sistema foi tomada porque os demais modelos de MSS estão nele, porém, não foi possível identificar com certeza o sistema de maré deste modelo. Não se sabe se este fato influenciou os resultados e o desempenho apresentado pelo modelo.

Os NREFs com relação ao elipsoide de referência apresentados neste estudo somente foram possíveis porque nivelamentos geométricos são realizados na região das EMs pelo IBGE e pela DHN. Seja o nivelamento geométrico entre o zero do marégrafo até as RNs próximas (primária e vizinhas) que seguem a recomendação da DHN com realização de nivelamento e contranivelamento (duplo) com tolerância de fechamento entre os desníveis do nivelamento e contranivelamento de 8 mm para nivelamento de até 1 km e de  $8\text{ mm}\sqrt{k}$ , com  $k$  igual a distância nivelada em km (DHN, 2017). Ou os circuitos CGEM realizados pelo IBGE que seguem as especificações para nivelamento geométrico do tipo Científico para Controle Geodésico de Estações Maregráficas com diferença máxima aceitável no nivelamento duplo de  $1,5\text{ mm}\sqrt{k}$  e Vinculação entre Estações Maregráficas com tolerância de  $3\text{ mm}\sqrt{k}$  (IBGE, 2017).

Para melhor padronização e sistematização de metodologias de levantamentos em região costeira, recomenda-se que a DHN siga o conjunto de especificações para a Vinculação entre Estações Maregráficas para os nivelamentos realizados pela diretoria, seguindo a tolerância de pelo menos  $3\text{ mm}\sqrt{k}$  e que busquem calcular valores de altitudes elipsoidais das RNs primárias e vizinhas as EMs com rigor geodésico para vinculação dos NREFs a um elipsoide de referência de maneira precisa.

Na mesma linha, algo importante realizado no estudo foi a sistematização de uma metodologia para a determinação de altitudes elipsoidais para as RNs primárias próximas às EMs que estão em locais onde não é possível a realização de

levantamentos GNSS. A consideração da altitude geoidal, a partir de observações geodésicas locais e de MGGs, no cálculo da altitude elipsoidal trouxe resultados com precisão melhor que 3 mm. Para tanto, em quaisquer soluções, o correto é uma análise pontual do comportamento geoidal da região para a consideração dos desníveis geoidais na estimativa da altitude elipsoidal.

Quanto aos referenciais verticais, ao se quantificar o afastamento entre a superfície LAT baseada no modelo DTU\_15\_LAT e os NREDs locais foi observado que para as áreas de estudo 1 e 2 a superfície LAT está acima dos NREDs, ao analisar o *offset* entre os níveis. Este comportamento não era esperado tendo em vista a definição dos referenciais verticais oceânicos. Por isso, acredita-se que o fato do modelo DTU\_15\_LAT ser um modelo derivado de um modelo de maré (DTU\_10\_GOT), no qual foram realizadas previsões de altitudes para superfície LAT para os anos entre 2000 e 2019, pode ter ocasionado imprecisão ao modelo. Vale lembrar que o modelo DTU\_10\_GOT, foi obtido a partir de observações de satélites altímetros do período de 1993 a 2010.

De maneira geral, o trabalho desenvolvido e os resultados alcançados mostram que a altimetria por satélite é uma técnica promissora e de grande impacto para a realização de um referencial oceânico unificado, isto porque os MGOs possuem boa adequação as observações locais. É observado também que missões como a Sentinel 3A contribuem para minimizar a perda de precisão da altimetria por satélite em regiões próximas a costa por meio da combinação com outras missões satelitais.

Quanto a conexão das componentes verticais e o cálculo da TNMM, os MGGs com alta resolução, tornam possíveis a obtenção de estimativas. Para o futuro, o XGM2019 com grau de desenvolvimento de 5540 certamente contribuirá com soluções mais precisas (GRUBER et al., 2019) e também há a expectativa da divulgação do EGM2020 (PAIL et al., 2018), além claro, da estratégia de modelagem no espaço do geopotencial pela solução do PVCG (CARRION, 2017).

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- a) Investigação cuidadosa dos dados topogeodésicos do BNDO a partir das fichas F-21 visando a obtenção das altitudes elipsoidais das RNs primárias e vizinhas conectadas às EMs ao longo da costa brasileira.
- b) Levantamentos de campo para o cálculo das altitudes elipsoidais das RNs primárias das EMs contidas no BNDO para que possa ser possível a determinação dos NREFs com relação ao elipsoide GRS80.
- c) Investigação da altitude LAT em cada EM contida no BNDO a partir de análises harmônicas das séries de observações maregráficas do período de definição dos NREFs locais.
- d) Estimativa de um referencial vertical oceânico único para a costa brasileira baseado somente em observações obtidas a partir de satélites altímetros.
- e) Estimativa de uma referencial vertical oceânico único para a costa brasileira baseado em observações obtidas a partir de satélites altímetros e combinadas com observações maregráficas locais.
- f) Investigação da adequação de MGGs em região costeira com um *buffer* de pelo menos 210 km da linha de costa. Este valor é baseado nas recomendações de Sánchez et al. (2016) visando contribuições ao estabelecimento da Rede de Referência Internacional de Altitudes.
- g) Investigação da quantidade de população que vive nas ZCBE no Brasil a partir de informações de censos demográficos do IBGE, e do impacto de variações do NMM nessa população com uso combinado de combinação de Modelos Digitais de Altitudes, MGGs e altitudes da RVRB.
- h) Realização de levantamentos aerogravimétricos na região costeira.

## REFERÊNCIAS

- ABLAIN, M.; LEGEAIS, J. F.; PRANDI, P.; MARCOS, M.; FENOGLIO-MARC, L.; DIENG, H. B.; BENVENISTE, J. CAZENAVE, A. Satellite Altimetry-Based Sea Level at Global and Regional Scales. **Surveys In Geophysics**, [s.l.], v. 38, n. 1, p.7-31, 16 nov. 2017. DOI. 10.1007/s10712-016-9389-8.
- AGARWAL, P. K.; BEUTEL, A.; MØLHAVE, T. TerraNNI. **Acm Transactions On Spatial Algorithms And Systems**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.1-31, 21 jun. 2016. DOI. 10.1145/2786757.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLIO (ANP). **Banco Nacional de Dados Gravimétricos**. 2020. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/padroes-tecnicos-para-envio-de-dados-a-anp/bndg-banco-nacional-de-dados-gravimetricos>>. Acesso em: 10 jan. 2020.
- ALENCAR, J.C.M. *Datum* Altimétrico Brasileiro. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cadernos de Geociências**. 5 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. **Journal Of Geophysical Research: Solid Earth**, [s.l.], v. 121, n. 8, p.6109-6131, ago. 2016. DOI. 10.1002/2016jb013098.
- AMOS, M. J.; FEATHERSTONE, W. E. Comparisons of Recent Global Geopotential Models with Terrestrial Gravity Field Observations Over New Zealand and Australia. **Geomatics Research Australasia**. [S.l.], v. 79, p. 1-20, 2003.
- ANDERSEN, O. B. **DTU18 Mean Sea Surface for The Baltic**: Updated to DTU16MSS. Report and data prepared for FAMOS. [S.l.]. Novembro de 2018. Disponível em: <[https://ftp.space.dtu.dk/pub/Altimetry/FAMOS/DTU18MSS\(10B\)/MSS\\_DTU18.pdf](https://ftp.space.dtu.dk/pub/Altimetry/FAMOS/DTU18MSS(10B)/MSS_DTU18.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- ANDERSEN, O. B.; PICCIONI, G.; STENSENG, L.; KNUDSEN, P. The DTU15 MSS (Mean Sea Surface) and DTU15LAT (Lowest Astronomical Tide) reference surface. In: ESA LIVING PLANET SYMPOSIUM. Praga, CZ. Maio de 2016. Disponível em: <<<https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU15/DOCUMENTS/MSS/DTU15MSS+LAT.pdf>>>. Acesso em: 22 jul. 2019.
- ANDERSEN, O. B.; ROSE, S. K.; KNUDSEN, P.; STENSENG, L. The DTU18 MSS Mean Sea Surface improvement from SAR altimetry. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRAVITY, GEOID AND HEIGHT SYSTEMS - GRAVITY FIELD OF THE EARTH. Copenhagen, Denmark. September 12 - 21, 2018.
- ARANA, D.; PROL, R. S.; CARMARGO, P. O.; GUIMARÃES, G. N. Errors Measurement of Interpolation Methods for Geoid Models: Study Case in the Brazilian

Region. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.44-57, mar. 2018. DOI. 10.1590/s1982-21702018000100004.

AVISO. Satellite Altimetry Data. **How Altimetry Work**. 2019a. Disponível em: < <https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry/principe/basic-principe.html>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

AVISO. Satellite Altimetry Data. **Mean Sea Surface Description**. 2019b. Disponível em: < <https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry/principe/basic-principe.html>>. Acesso em: 08 ago. 2019.

BARTHELMES, F.; INCE, E. S.; REIBLAND, S. **International Centre for Global Earth Models (ICEGEM)**. 2017. Disponível em:< [http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM-Report\\_2015-2017.pdf](http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM-Report_2015-2017.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BIDEL, Y.; ZAHZAM, N.; BLANCHARD, C.; BONNIN, A.; CADORET, M.; BRESSON, D.; ROUXEL, D.; LEQUENTREC-LALANCETTE, M. F. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry. **Nature Communications**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.1-9, 12 fev. 2018. DOI. 10.1038/s41467-018-03040-2.

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; MACHADOM 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.

BOSCH, W. European Experiences on Refinement, Connection, and Unification of Vertical Reference Surfaces in Coastal Zones. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016a. Disponível em:< [https://www.concar.gov.br/temp/248@Report01final\\_Relat%c3%b3rio%20preliminar.pdf](https://www.concar.gov.br/temp/248@Report01final_Relat%c3%b3rio%20preliminar.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BOSCH, W. Analytical Report for Integrating Hydrodynamic and Elevation Models. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016b. Disponível em:< [https://www.concar.gov.br/temp/249@Analytical-Report\\_2016-07-18.pdf](https://www.concar.gov.br/temp/249@Analytical-Report_2016-07-18.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BOSCH, W. Evaluating Technical Issues for Reconciling Continental Altimetry and Ocean Bathymetry. In: DIALOGOS SETORIAIS: UNIÃO EUROPEIA BRASIL. Rio de Janeiro, jun. 2016c. Disponível em:< <https://www.concar.gov.br/temp/250@CLIM0009-EvaluationReport.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BRUINSMA, S.; FÖRSTE, C.; ABRIKOSOV, O.; LEMOINE, J-M.; MARTY, J-C.; MULET, S.; RIO, M-H.; BONVALOT, S. ESA's satellite-only gravity field model via the direct approach based on all GOCE data, **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 41, n. 21, p. 7508-7514, nov. 2014. DOI. 10.1002/2014GL062045.

BUREAU GRAVIMÉTRIQUE INTERNACIONAL (BGI). **Gravity Database**. 2019. Disponível em: <<http://bgi.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. dos A. Avaliação da acurácia do EGM2008 e MAPGEO2015 para a cidade do Recife/PE. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2017, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, p. 444-450, 2017.

Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/319347400\\_AVALIACAO\\_DA\\_ACURACIA\\_DO\\_EGM2008\\_E\\_MAPGEO2015\\_PARA\\_A\\_CIDADE\\_DO\\_RECIFEPE](https://www.researchgate.net/publication/319347400_AVALIACAO_DA_ACURACIA_DO_EGM2008_E_MAPGEO2015_PARA_A_CIDADE_DO_RECIFEPE)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. dos A. JAMUR, K. P. Análise da Estação Maregráfica de Fortaleza para Determinar as variações do Nível do Mar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2018, Recife. **Anais...** Recife: UFPE Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, p. 461-467, 2018. Disponível em: <

[https://www.researchgate.net/publication/329192260\\_ANALISE\\_DA\\_ESTACAO\\_MAREGRAFICA\\_DE\\_FORTALEZA\\_PARA\\_DETERMINAR\\_AS\\_VARIACOES\\_DO\\_NIVEL\\_DO\\_MAR](https://www.researchgate.net/publication/329192260_ANALISE_DA_ESTACAO_MAREGRAFICA_DE_FORTALEZA_PARA_DETERMINAR_AS_VARIACOES_DO_NIVEL_DO_MAR)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

CARRIÓN, J. L. S. **Vínculo do Datum Vertical Equatoriano ao International Height Reference system - IHRS**. 2017. 268 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

CASTRO JUNIOR, C. A. C. **Contribuição ao estabelecimento de um sistema gravimétrico para a América do Sul**. 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CASTRO JUNIOR, C. A. C.; GUIMARÃES, G. N.; FERREIRA, N. C. Evolução da Infraestrutura Gravimétrica no Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 2, p. 361-384, 2018.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). **Banco Nacional de Dados Oceanográficos**. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-bndo/download>>. Acesso em: 24 jul. 2019.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). **Estações Maregráficas**. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/estacoes-maregraficas>>. Acesso em: 19 fev. 2020.

CHENG, Y.; ANDERSEN, O. B. Multimission empirical ocean tide modeling for shallow waters and polar seas. **Journal Of Geophysical Research**, [s.l.], v. 116, n. 11, p.1-11, 1 nov. 2011. DOI. 10.1029/2011jc007172.

COLLECTE LOCALISATION SATELLITES (CLS). **SALP annual report (2017) of Mean Sea Level Activities**. 2018. Disponível em:< [https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/calval/validation\\_report/SALP-RP-MA-EA-23189-CLS\\_AnnualReport\\_2017\\_MSL.pdf](https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/calval/validation_report/SALP-RP-MA-EA-23189-CLS_AnnualReport_2017_MSL.pdf) >. Acesso em: 24 jul. 2019.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). **Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima**. 2018. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheEntidades.aspx?cod=25>>. Acesso em: 24 jul. 2019.

CORDINI, J. **Estudo dos Aspectos Geodinâmicos do Datum da Rede Altimétrica do SGB**. 1998. 183 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

COSTA, S. M. A.; LIMA, M. A. A.; MOURA JÚNIOR, N. J.; ABREU, M. A.; SILVA, A. L.; FORTES, L. P. S. RBMC em Tempo Real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2008, Recife. **Anais...** Recife: UFPE - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Não paginado, 2008. Disponível em: <[https://www3.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII\\_CD/Organizado/geo/202.pdf](https://www3.ufpe.br/cgtg/SIMGEOII_CD/Organizado/geo/202.pdf)>. Acesso em: 22 jul. 2019.

COSTA, S.M.A. Solução na Compatibilização de Diferentes Materializações de Sistemas de Referência. In: SEMINÁRIO SOBRE REFERENCIAL GEOCÊNTRICO NO BRASIL, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBGE, p. 1-12, 2000. Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/artigos/2000-Solucao\\_na\\_compatibilizacao\\_de\\_diferentes\\_materializacoes\\_de\\_sistemas\\_de\\_referencia.pdf](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/artigos/2000-Solucao_na_compatibilizacao_de_diferentes_materializacoes_de_sistemas_de_referencia.pdf)>. Acesso em: 22 jul. 2019.

DA SILVA, L. M. **Análise Da Evolução Temporal Do Datum Vertical Brasileiro De Imbituba**. 2017. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DA SILVA, L. M; DE FREITAS, S. R. C. Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. **Revista Cartográfica**, [s.l.], v. 98, n. 1, p.33-57, jan./jul. 2019. ISSN. 26633981.

DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2006. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET (DTU). **Read-me**: The DTU10 global ocean tide model. 2010. Disponível em: <[https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU10/DTU10\\_TIDEMODEL/DTU10\\_TideModel\\_readme.txt](https://ftp.space.dtu.dk/pub/DTU10/DTU10_TIDEMODEL/DTU10_TideModel_readme.txt)>. Acesso em: 20 ago. 2019.

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET (DTU). **DTU Space**. 2019a. Disponível em: <[https://www.space.dtu.dk/english/research/scientific\\_data\\_and\\_models](https://www.space.dtu.dk/english/research/scientific_data_and_models)>. Acesso em: 05 ago. 2019.

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET (DTU). **DTU Space**. 2019b. Disponível em: <<https://ftp.space.dtu.dk/pub/>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

DE FREITAS, S. R. C. de. **Marés gravimétricas**: implicações para a placa sul-americana. 264 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

DE FREITAS, S.R.C.; MARTÍNEZ, W.; MACKERN, M. V.; CIOCE, V. J.; RODINO, R. P.; SÁNCHEZ, L. Advances in the modernization of the height reference systems in Latin America and their integration to the International Height Reference System (IHRM). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRAVITY, GEOID AND HEIGHT SYSTEMS - GRAVITY FIELD OF THE EARTH. Copenhagen, Denmark. September 12 - 21, 2018.

DEUTSCHES GEODÄTISCHES FORSCHUNGSINSTITUT (DGFI). **OpenADB - Open Altimeter Database**. 2019. Disponível em: < <https://openadb.dgfi.tum.de/en/> >. Acesso em: 25 jul. 2019.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. 2º Revisão. 2017. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/266> >. Acesso em: 27 dez. 2019.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L. The varying surface kinematics in Latin America: VEMOS 2009, 2015, and 2017. In: SIRGAS SYMPOSIUM, 2017, Mendonça. Disponível em: < [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/44\\_Drewes\\_Sanchez\\_2017\\_Vemos\\_SIRGAS.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/44_Drewes_Sanchez_2017_Vemos_SIRGAS.pdf) >. Acesso em: 22 jul. 2019.

DREWES, H. The Changing Objectives in Geodetic Research. **Zeitschrift Für Geodäsie**: Information und Landmanagement, [s.l.], v. 131, n. 5, p.1-7, maio 2006.

EKMAN, M. Impacts of Geodynamic Phenomena on Systems for Height and Gravity. **Bull. Géod.**, v. 63, p. 281–296, 1989.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **The Changing Earth**: New Scientific Challenges for ESA's Living Planet Programme. 2006. Disponível em: < <https://earth.esa.int/web/guest/document-library/browse-document-library/-/article/the-changing-earth-ndash-new-scientific-challenges-for-esa-rsquo-s-living-planet-programme-5249> >. Acesso em: 24 jul. 2019.

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.

FENOGLIO, L. **Sea Surface Determination with Respect to European Vertical Datums**. Dissertationen, Reihe C, Heft Nr. 464. Deutsche Geodätische Kommission, München, 1996. 118 p.

FERREIRA, I. O.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R.; ROSA, L. M. F. In Bathymetric Surfaces: IDW or Kriging?. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 23, n. 3, p.493-508, set. 2017. DOI. 10.1590/s1982-21702017000300033.

FERREIRA, V. G. **Análise da Componente Anômala do Geopotencial no Datum Vertical Brasileiro com Base no Sistema Lagunar De Imarui, SC.** 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

FERREIRA, V. G.; ZHANG, Y.; FREITAS, S. R. C. de. Validation of GOCE gravity field models using GPS-leveling data and EGM08: a case study in Brazil. **Journal Of Geodetic Science**, [s.l.], v. 3, n. 3, p.209-218, 1 jan. 2013. DOI. 10.2478/jogs-2013-0027.

FLECHTNER, F.; SCHUH, W.-D.; SNEEUW, N. **Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions.** Berlin: Springer, 2014. 190 p. (GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 20).

FORTES, L. P. S.; LUZ, R. T.; PEREIRA, K. D. **The Brazilian Network For Continuous Monitoring of GPS (RBMC), an Active Geodetic Reference Network.** 1998. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

FORTES, L.P.S. Implantação da RBMC - Estágio Atual. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 1995, [S.I.]. **Anais...** [S.I.]:SBC, Não paginado, 1995. Disponível em: < <https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989/3117-implantacao-da-rbmc-estagio-atual.html> >. Acesso em: 22 jul. 2019.

FÖRSTE, C.; BRUINSMA, S. L.; ABRIKOSOV, O.; LEMOINE, J-M.; MARTY, J.; CHARLES, F. FRANK, B. BARTHELMES, F.; BIANCALE, R. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. **GFZ Data Services**, DOI: 10.5880/ICGEM.2015.1, 2014.

FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão.** 2º Edição. Niterói: DHN, 2009. 344 p.

GEMAEL, C. **Introdução a Geodésica Física.** Curitiba: UFPR, 1999. 312 p.

GILARDONI, M.; REGUZZONI, M.; SAMPIETRO, D. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. **Studia Geophysica Et Geodaetica**, [s.l.], v. 60, n. 2, p.228-247, 28 mar. 2016. DOI. 10.1007/s11200-015-1114-4.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). **About Global Geodetic Observing System.** 2016. Disponível em: < <http://www.ggos.org/en/>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

GODOY, R. A. Z.; PEREIRA, K. D.; SANTOS, J. L. R.; OLIVEIRA, P. M. G. Reprocessamento de estações Doppler no IBGE. In. XV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 1991, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], Não paginado, 1991. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989/3125-reprocessamento-de-estacoes-doppler-no-ibge.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

GONTIER, A. M.; MA, C.; ARIAS, E. F.; EUBANKS, T. M.; FEY, A. L.; JACOBS, C. S.; SOVERS, O. J.; ARCHINAL, B. A.; CHARLOT, P. Establishment of the ICRF. **Advanced Space Research**, [s.l.], v. 30, n. 2, p.185-193, jan. 2002.

GRUBER, T.; ZINGERLE, P.; PAIL, R.; OIKONOMIDOU, X. High resolution Gravity Field Models as Global Reference Surface for Heights. In: SIRGAS 2019. Rio de Janeiro, Brasil. Novembro, 2019. Disponível em: <  
[http://www.ggos.org/media/filer\\_public/d2/46/d246575b-370a-4a01-8b00-9b0c675fb498/ggosdays2019\\_day1\\_16\\_gruber-highresolutiongravityfield.pdf](http://www.ggos.org/media/filer_public/d2/46/d246575b-370a-4a01-8b00-9b0c675fb498/ggosdays2019_day1_16_gruber-highresolutiongravityfield.pdf) >. Acesso em: 30 dez. 2019.

GRUBER, T.; WILLBERG, M. Signal and error assessment of GOCE-based high resolution gravity field models. **Journal Of Geodetic Science**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.71-86, 1 jan. 2019. Walter de Gruyter GmbH. DOI. 10.1515/jogs-2019-0008.

GUIMARÃES, G. N.; BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; ALMEIDA, F. G. V.; BARBOSA, A. C. B. Analysis of the Crust Displacement in Amazon Basin. **Geodesy For Planet Earth**, [s.l.], p.885-891, 26 jul. 2011. DOI. 10.1007/978-3-642-20338-1\_111.

GUIMARÃES, G. N.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D.. An evaluation of recent GOCE geopotential models in Brazil. **Journal Of Geodetic Science**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.144-155, 1 jan. 2012. DOI. 10.2478/v10156-011-0033-8.

HECK, B.; RUMMEL, R. Strategies for Solving the Vertical *Datum* Problem Using Terrestrial and Satellite Geodetic Data. In: SÜNKELE, H.; BAKER, T. (Ed.). **Sea Surface Topography and the Geoid**. International Association of Geodesy Symposia 104, 10-11 de agosto de 1989, Edinburgo, Escócia. Berlim: Springer-Verlag, 1990. p. 116-128.

HAYDEN, T.; RANGELOVA, E.; SIDERIS, M. G.; VÉRONNEAU, M. Evaluation of W0 in Canada using tide gauges and GOCE gravity field models. **Journal Of Geodetic Science**, [s.l.], v. 2, n. 4, p.290-301, 1 jan. 2012. DOI.10.2478/v10156-012-0003-9.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. 2nd. ed. Graz, Austria: Spring-Verlag Wien, 2006.

IHDE, J.; MÄKINEN, J.; SACHER, M. Conventions for the Definition and Realization of a European Vertical Reference System (EVRS) – EVRS Conventions 2007. **IAG Sub-commission 1.3a EUREF**. 2019.

ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K.; TURNER, J. F.. A New Methodology for Incorporating Tide Gauge Data in Sea Surface Topography Models. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 30, n. 4, p.271-296, 7 nov. 2007. DOI. 10.1080/01490410701568384.

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**, [s.l.], v. 11, n. 2, p.647-674, 15 maio 2019. DOI. 10.5194/essd-11-647-2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Instruções técnicas para Controle Geodésico de Estações Maregráficas – CGEM e sua vinculação vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro – SGB**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <  
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/ManuaisdeGeociencias/Instrucoes%20tecnicas%20para%20controle%20geodesico%20de%20estacoes%20maregraficas-CGEM%20e%20sua%20vinculacao%20vertical%20ao%20Sistema%20Geodesico%20Brasileiro-SGB.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Ajustamento Simultâneo da rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: <  
[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_altimetrica/relatorio/relatorioajustamento.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorioajustamento.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais 2018**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em:  
<[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_altimetrica/relatorio/relatorio\\_REALT\\_2018.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf)>. Acesso em: 24 jul. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: <  
[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2013\\_GRRV.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <  
[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2015\\_GRRV.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados Geodésicos (BDG)**. 2019. Disponível em: <  
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16327-banco-de-dados-geodesicos.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**. 2020. Disponível em:<  
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Esclarecimentos sobre a relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e os Níveis de Redução e “Zeros” Hidrográficos no Litoral Brasileiro**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/rmpg/relacao\\_dvsgb\\_nr\\_zh.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/relacao_dvsgb_nr_zh.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2019.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG). **Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHR)**. München, Alemanha, 2015. Disponível em: <[https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf)>. Acesso em: 24 jul. 2019.

INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS (ICGEM). **Static Models**. 2019a. Disponível em: <[http://icgem.gfz-potsdam.de/tom\\_longtime](http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime)>. Acesso em: 09 dez. 2019.

INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS (ICGEM). **ICGEM Service Frequently Asked Questions (FAQs)**. 2019b. Disponível em: <[http://icgem.gfz-potsdam.de/icgem\\_faq.pdf](http://icgem.gfz-potsdam.de/icgem_faq.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2020.

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS). **IERS Bulletins**: Contains rapid determinations for earth orientation parameters. 2019. Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/Bulletins/bulletins.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS). **IERS Conventions**. 2010. Disponível em: <<http://iers-conventions.obspm.fr/content/chapter1/icc1.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2019.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Regulations of the IHO for International (INT) charts and chart specifications of the IHO**. 2017. Disponível em: <[https://www.iho.int/iho\\_pubs/standard/S-4/S-4%20Ed%204.7.0%20July%202017%20EN.pdf](https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-4/S-4%20Ed%204.7.0%20July%202017%20EN.pdf)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). **Resolution 3/1919, as amended – Draft Proposal**. 2008. Disponível em: <[https://www.iho.int/mtg\\_docs/com\\_wg/IHOTC/TWCWG1/TWCWG1-7.1.2b-Resolution\\_3-1919-Clean.pdf](https://www.iho.int/mtg_docs/com_wg/IHOTC/TWCWG1/TWCWG1-7.1.2b-Resolution_3-1919-Clean.pdf)>. Acesso em: 24 jul. 2019.

JAMUR, K. P. **Análise de Alternativas para a Determinação dos Efeitos Gravitacionais de Massas Anômalas na Região do DVB**. 2012. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

JEKELI, C. **Heights, the geopotential, and vertical datums**. The Ohio State University, Colimbus, USA: Departament of Geodetic Science, (Report 459). 34 p. 2000.

JESUS, R. M. L. **Potencialidade do uso, para aplicações geodésicas, de levantamentos aero geofísicos nos estados do Pará e Amapá**. 2019. 172 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

KVAS, A.; MAYER-GÜRR, T.; KRAUSS, S.; BROCKMANN, J. M.; SCHUBERT, T.; SCHUH, W-D.; PAIL, R.; GRUBER, T.; JÄGGI, A.; MEYER, U. The satellite-only gravity field model GOCO06s, **GFZ Data Services**. DOI. 10.5880/ICGEM.2019.002. 2019. Disponível em: <<http://dataservices.gfz-potsdam.de/icgem/showshort.php?id=escidoc:4081892>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

LIANG, W.; Xu, X.; Li, J.; Zhu, G. The determination of an ultra high gravity field model SGG-UGM-1 by combining EGM2008 gravity anomaly and GOCE observation data. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, Beijing, v. 47, n. 4, p. 425-434, 2018. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170269.

LUZ, R. T. Cálculo de altitudes científicas e sua aplicação no reajustamento da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 61, n. 1, p.79-97, jun. 2016.

LUZ, R. T. et al. **Proposta de locações para estações IHRF**. IBGE, Rio de Janeiro, Brasil. 2017.

LUZ, R.T.; GUIMARÃES, V.M. Dez Anos de Monitoramento do Nível do Mar no IBGE. In: III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR – Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Não paginado, 2003. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2004-2000.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

MARINHA DO BRASIL. Centro de Hidrografia da Marinha. **Sondagem Batimétrica**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica>>. Acesso em: 24 jul. 2019.

MATOS, A. C. O. C. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MAYER-GÜRR, T. BEHZADPUR, S.; ELLMER, M.; KVAS, A.; KLINGER, B.; STRASSER, S.; ZEHENTNER, N.; ITSG-Grace2018 - Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE. **GFZ Data Services**. 2018 DOI. 10.5880/ICGEM.2018.003. Disponível em: <<http://dataservices.gfz-potsdam.de/icgem/showshort.php?id=escidoc:3600910>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

MCGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. **Environment And Urbanization**, [S.l.], v. 19, n. 1, p.17-37, abr. 2007. DOI. 10.1177/0956247807076960.

MELO, L. F. S.; DE FREITAS, S. R. C. Avaliação de Modelos Globais do Geopotencial para os estados do Maranhão e Piauí. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 18, n. 2, p.203-224, abr/jun. 2012.

MERTZ, R.; SOUDARIN, L.; ROSMORDUC, V.; GUINLE, T.; NINO, F.; BIROL, F.; FLEURY, S.; SCHGOUNN, C.; SALSAC, A.; DRIEU LA ROCHELLE, C.; MAHEU, C. Aviso+ a wide range of altimetry products. In: EGU GENERAL ASSEMBLY 2019. Viena, Áustria, 7 a 12 de abril, 2019.

MIGUENS, A. P. Marés e correntes de maré; correntes oceânicas. In: **Navegação: a ciência e a arte – navegação costeira, estimada e em águas restritas**. Niterói: DHN-Marinha do Brasil, 1996.

MONTECINO, H. D. C.; FERREIRA, V. G.; CUEVAS, A.; CABRERA, L. C.; SOTO, J. C.; DE FREITAS, S. R. C. Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges. **International Journal Of Remote Sensing**, [s.l.], v. 38, n. 24, p.7551-7565, 14 fev. 2017. DOI. 10.1080/01431161.2017.1288306.

MONTECINO, H. D. C.; CUEVAS, A. C.; DE FREITAS, S. R. C. A study of the chilean vertical network through global geopotential models and the CNES CLS 2011 global mean sea surface. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s.l.], v. 20, n. 2, p.300-316, jun. 2014DOI. 10.1590/s1982-21702014000200018.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **What are tides?** National Ocean Service website. 2017. Disponível em:< <https://oceanservice.noaa.gov/facts/tides.html>>. Acesso em: 19 jan. 2020.

NEUMANN, B.; VAFEIDIS, A. T.; ZIMMERMANN, NICHOLLS, R. J. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. **Plos One**, [S.I.], v. 10, n. 3, p.1-34, 11 mar. 2015. DOI. 10.1371/journal.pone.0118571.

NICACIO, E. L. **Alternativa para Determinação de Altitudes Normais-Ortométricas na Amazônia Legal Brasileira**. 2017. 223 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

NICACIO, E. L. DALAZOANA, R. Passado e Presente dos Modelos Globais do Geopotencial: Uma abordagem Conceitual sobre sua evolução. **Revista Eletrônica Multidisciplinar – FACEAR**, [S.I.], v. 2, n. 6, p. 1-15, 2017.

NICACIO, E; DALAZOANA, R. Comparação entre abordagens absoluta e relativa em determinações altimétricas baseadas em observações GNSS e Modelos Globais do

Geopotencial. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 70, n. 1, p.1-39, 31 mar. 2018a. DOI. 10.14393/rbcv70n1-45188.

NICACIO, E.; DALAZOANA, R. A New Estimate for Brazilian Vertical *Data Offset* Based on Global Geopotential Models and Height Determinations Through Relative Approach. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 24, n. 3, p.335-350, ago. 2018b. DOI. 10.1590/s1982-21702018000300022.

NICACIO, E.; DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. R. C. de. Evaluation of recent combined global geopotential models in Brazil. **Journal Of Geodetic Science**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.72-82, 1 jul. 2018. DOI. 10.1515/jogs-2018-0008.

PAIL, R.; FECHER, T.; BARNES, D.; FACTOR, J. F.; HOLMES, S. A.; GRUBER, T.; ZINGERLE, P. Short note: the experimental geopotential model XGM2016. **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 92, n. 4, p.443-451, 7 out. 2017. DOI. 10.1007/s00190-017-1070-6.

PAVLIS, N. K.; HOLMES, S. A.; KENYON, S. C.; FACTOR, J. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. B04406, p. 1–38, 2012. DOI. 10.1029/2011JB008916.

PALMEIRO, A. S. **Análise do Vínculo do Datum Vertical Brasileiro a um Sistema Global De Altitudes com Base em Soluções Fixadas e Livres do PVCG**. 2011. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PEREIRA, K.D.; FAZAN, J.A.; FORTES, L.P.S. RBMC: Sete anos fornecendo referência a posicionamentos GPS no Brasil e Exterior. In: XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBC, Não paginado, 2003. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2004-2000.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

PINA, W. H.; PINHEIRO, R. R.; SANTOS, C. C. C.; PEREIRA, N. R. M.; GOLDANI, D. Reajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Brasil – RAAP. In: IV CONFERÊNCIA NACIONAL DE GEOCIÊNCIAS, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: [s.n.], Não paginado, 2006. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2008-2005/3079-reajustamento-global-da-rede-altimetica-de-alta-precisao-do-brasil-raap.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

PINEAU-GUILLOU, L.; DORST, L. Creation of Vertical Reference Surfaces at Sea Using Altimetry and GPS. **Reference Frames For Applications In Geosciences**, [s.l.], p.229-235, 27 nov. 2012. DOI. 10.1007/978-3-642-32998-2\_33.

PLAG, H-P.; BEUTHER, G.; GROSS, R.; HERRING, T. A.; RIZOS, C.; RUMMER, R.; SAHAGIAN, D.; ZUMBERGE, J. Introduction. In: Plag, H-P. Pearlman, M. **The Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020**. New York: Springer, 2009. p. 1-13. DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4.

PLAG, H-P.; ALTAMIMI, Z.; BETTADPUR, S.; BEUTHER, G.; BEYERLE, G.; CAZENAVE, A.; CROSSLEY, D.; DONNELLAN, R.; FORSBERG, R.; GROSS, R.; HINDERER, J.; KOMJATHY, A.; MA, C.; MANNUCCI, J.; NOLL, C.; NOTHNAGEL, A.; PAVLIS, E. C.; PEARLMAN, M.; POLI, P. SCHREIBER, U.; SENIOR, K.; WOODWORTH, P. L.; ZERBINI, S.; ZUFFADA, C. The goals, achievements, and tools of modern geodesy. In: Plag, H-P. Pearlman, M. **The Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020**. New York: Springer, 2009. p. 15-88. DOI: 10.1007/978-3-642-02687-4.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System 3.6** . Open Source Geospatial Foundation Project. 2019. Disponível em: <[https://www.qgis.org/pt\\_BR/site/forusers/download.html](https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html)>. Acesso em: 25 jul. 2019.

RAPP, R. H. Past and future developments in Geopotential Modeling. In: FORSBERG, R.; FEISSEL, M. DIENHARD, D. **Geodesy on the Move**. Berlin New York: Springer-Verlag, 1998. p. 58-78.

RASMUSSEN, D. J.; BITTERMANN, K; BUCHANAN, M. K.; KULP, S.; STRAUSS, B. H.; KOPP, R. E.; OPPENHEIMER, M. Extreme sea level implications of 1.5 °C, 2.0 °C, and 2.5 °C temperature stabilization targets in the 21st and 22nd centuries. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v. 13, n. 3, p.1-42, 1 mar. 2017. DOI. 10.1088/1748-9326/aaac87.

RENGANATHAN, V. **Arctic sea ice freeboard heights from satellite altimetry**. 2010. 216 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Engenharia Geomática, Schulick Escola de Engenharia, Calgary, 2010.

RIBEIRO, G.P.; LUZ, R.T. Resultados preliminares do Ajustamento Global da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 1993, São Paulo. **Anais...** São Paulo: [s.n.], Não paginado, 1993. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989.html> >. Acesso em: 22 jul. 2019.

RIO, M. H. **GOCE User Toolbox (GUT): GUT Implementation and Supporting Scientific Studies**. ESA, 3 de abril de 2009. 62 p. Disponível em: <[https://earth.esa.int/documents/10174/15547/GUT\\_Tutorial.pdf/f1c3df3c-d16b-4fdf-8871-185757f5fb63;jsessionid=B4FD19223347A6B828F06E01F3B4462F.eodisp-prod4040?version=1.0](https://earth.esa.int/documents/10174/15547/GUT_Tutorial.pdf/f1c3df3c-d16b-4fdf-8871-185757f5fb63;jsessionid=B4FD19223347A6B828F06E01F3B4462F.eodisp-prod4040?version=1.0)>. Acesso em: 18 ago. 2019.

SÁNCHEZ, L.; CUNDERLÍK, R.; DAYOUB, N.; MIKULA, K.; MINARECHOVÁ, Z.; SÍMA, Z.; VATRT, V. VOJTÍSKOVÁ, M. A conventional value for the geoid reference potential  $W_0$ . **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 90, n. 9, p.815-835, 23 maio 2016. DOI.10.1007/s00190-016-0913-x.

SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. Vertical *datum* unification for the International Height Reference System (IHRM). **Geophysical Journal International**, [s.l.], p.570-586, 21 jan. 2017. DOI. 10.1093/gji/ggx025.

SANSÒ, F.; SIDERIS, M. G. **Geoid Determination: Theory and Methods**. New York Dordrecht London: Springer, 2013. 733 p.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; GRAVELLE, M.; DANGENDORF, S. MARCOS, M.; SPADA, G.; WOPPELMANN, G. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. **Earth And Planetary Science Letters**, [s.l.], v. 473, p.24-32, set. 2017. DOI. 10.1016/j.epsl.2017.05.038.

SANTANA, T. A.; RIBEIRO, L. C.; GUIMARÃES, G, N. Comparação da Altura Geoidal do MAPGEO2015 e GNSS/Nivelamento com a Ondulação Geoidal Derivada da Missão GOCE. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2017, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro:SBC, 115-119, 2017. Disponível em: < <http://www.cartografia.org.br/cbc/2017/trabalhos/2/487.html> >. Acesso em: 12 Ago. 2019.

SANTOS, J. C.; CERQUEIRA, J. A. C.; JAMUR, K. P. Avaliação Estatística dos Modelos Geopotenciais EGM2008 e MAPGEO2004 no Município de Maceió – Alagoas. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFPE - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, p. 001-008, 2010. Disponível em: < [https://www3.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO\\_CD/artigos/Cad\\_Geod\\_Agrim/Geodesia%20e%20Agrimensura/A\\_70.pdf](https://www3.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/Cad_Geod_Agrim/Geodesia%20e%20Agrimensura/A_70.pdf) >. Acesso em: 22 jul. 2019.

SAYÃO, L. F.; MARCONDES, C. H. O desafio da interoperabilidade e as novas perspectivas para as bibliotecas digitais. **TransInformação**, Campinas, v. 2, n. 20, p.133-148, ago. 2008.

SEEBER, G. **Satellite geodesy**. 2nd completely rev. and extended ed Berlin; New York: Walter de Gruyter, 2003. xix, 589 p.

SILVA, V. C.; GUIMARÃES, G. N. Analysis of the Gravity Potential in the Stations of the Permanent Tide Gauge Network for Geodesy Obtained with Different Geoid Models. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, p.605-613, 4 dez. 2018. DOI. 10.11137/2018\_3\_605\_613.

SILVA, A. L.; LIMA, M. A. A.; COSTA, S. M. A. Redes Estaduais GPS: Situação Atual e Perspectiva Futura. In: II SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2008, Recife. **Anais...** Recife: UFPE - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Não paginado, 2008. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2008-2005/3069-redes-estaduais-gps-situacao-atual-e-perspectiva-futura.html>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

SLOBBE, D. C.; KLEES, R. **Establishing a consistent vertical reference frame for the North Sea area**. Relatório. ago. 2012. Disponível em:< <http://blast-project.eu/media.php?file=623> >. Acesso em: 25 jul. 2019.

SLOBBE, D.C.; VERLAAN, M.; KLEES, R.; GERRITSEN, H. Obtaining instantaneous water levels relative to a geoid with a 2D storm surge model. **Continental Shelf Research**, [s.l.], v. 52, p.172-189, jan. 2013. DOI. 10.1016/j.csr.2012.10.002.

SOARES, S. Rede Geodésica de Referência Costeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. Rio de Janeiro, Brasil. 2017.

SOARES, S.; SANTOS, E. G. LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como Insumo para Integração de Altitudes e Profundidades: Resultados Preliminares. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2018, Recife. Anais... Curitiba: UFPE Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, p. 742-751, 2018. Disponível em: < <https://www.ufpe.br/decart>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

TENZER, R.; VATRT, V.; ABDALLA, A.; DAYOUB, N. Assessment of the LVD offsets for the normal-orthometric heights and different permanent tide systems—a case study of New Zealand. **Applied Geomatics**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.1-8, 7 dez. 2010. DOI. 1007/s12518-010-0038-5.

TORGE, W. **Geodesy**. 4th ed. Berlin; Boston: de Gruyter, 2012. x, 433 p.

TURNER, J. F.; ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K.; JONES, C. Global Ocean Tide Models: Assessment and Use within a Surface Model of Lowest Astronomical Tide. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.123-137, jan. 2013. DOI. 10.1080/01490419.2013.771717.

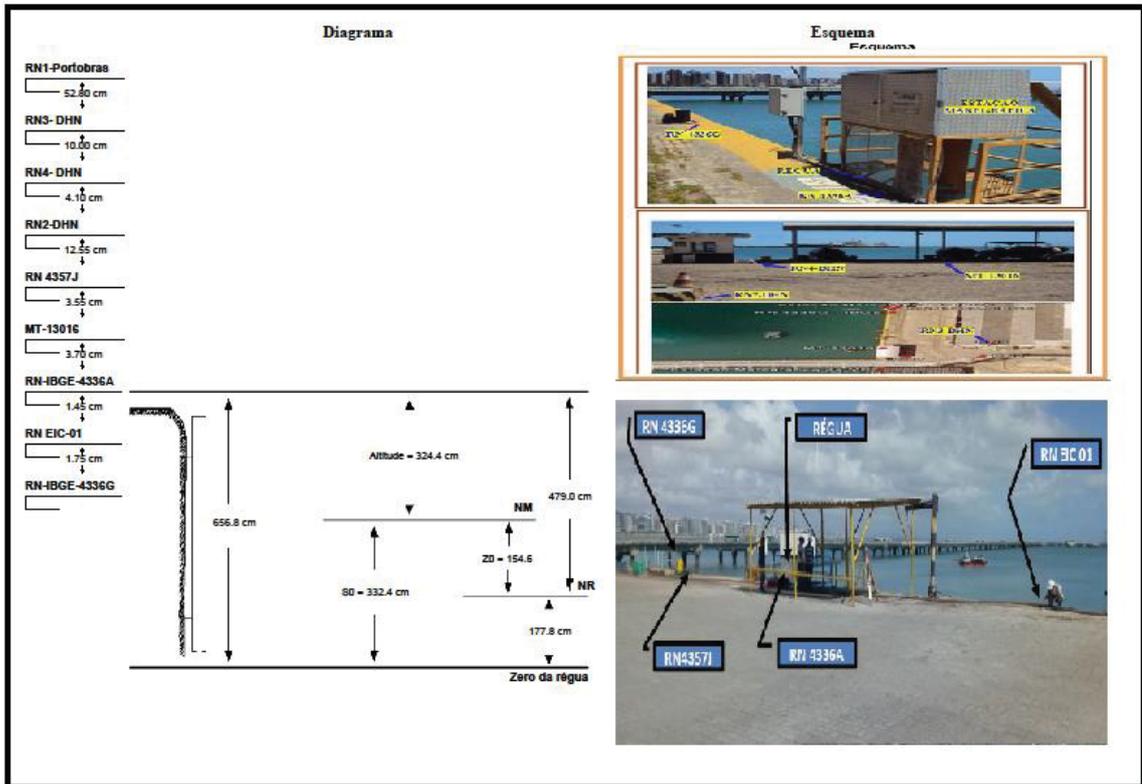
TURNER, J. F.; ILIFFE, J. C.; ZIEBART, M. K. WILSON, C.; HORSBURGH, J. Interpolation of Tidal Levels in the Coastal Zone for the Creation of a Hydrographic Datum. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, [s.l.], v. 27, n. 3, p.605-613, mar. 2010. DOI. 10.1175/2009jtecho645.1.

UNITED NATIONS - GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT (UN-GGIM). **Global Geodetic Reference Frame**: Note by the Secretariat. 2016. Disponível em:<<https://digitallibrary.un.org/record/830544>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

UNITED NATIONS - GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT (UN-GGIM). **Global Geodetic Reference Frame**: Note by the Secretariat. 2018. Disponível em:< <https://digitallibrary.un.org/record/1628263?ln=en>>. Acesso em: 22 jul. 2019.

## ANEXO 1 – FICHA F-41 DA ESTAÇÃO PORTO DE MUCURIBE (30340)

 <p>30340</p> <p>F - 41</p>	<p><b>TÁBUAS DAS MARÉS</b></p>	<p>F41 - Padrão - PORTO DE MUCURIBE - 30340 - Versão 1/2018</p> <p>F-41-701-001/95</p>
<p><b>DESCRIÇÃO DE ESTAÇÃO MAREGRÁFICA</b></p>		
<p>Estação: PORTO DE MUCURIBE      Estado: CE      Localidade: Fortaleza</p> <p>LH    Carta: 701 - Porto de Mucuribe      Navio: NHI SIRIUS      Ano: 1995</p>		
<p><b>Coordenadas geográficas</b></p> <p>Lat: 03° 42' 9 S</p> <p>Long: 038° 28' 6 W</p> <p>Datum</p> <p>Fuso: +03</p>	<p>O nível de redação está 177,80 centímetros acima do zero da régua.</p> <p>Fonte de informação: Análise estatística e harmônica de 731 dias de observação da maré</p> <p>Tipo de mareógrafo: Hidrologia</p> <p>Zero do mareógrafo: Corresponde a 1 metro do zero da régua</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Descrição da régua de marés</b></p> <p>Régua de madeira com 6 metros de comprimento, dividida de 10 cm em 10 cm, pintada de preto e branco, fixada ao lado do mareógrafo.</p> <p>Esta ficha foi compilada das F-41-701-001/91, F-41-701-001/95, F-41-701-001/11, Ficha do IBGE-2008 e da F-41-701-001/12. Atualizada em 08/10/2018.</p>		<p style="text-align: center;"><b>Descrição das referências de nível</b></p> <p>RN-IBGE-4336G - Instalada em frente ao cabeço do calis próximo ao mareógrafo do IBGE. Citada a partir de 2011.</p> <p>RN EIC-01 - Materializada a direita da régua maregráfica.</p> <p>RN-IBGE-4336A - Instalada em frente ao mareógrafo do IBGE. Citada a partir de 2011.</p> <p>MT-13016 - Instalada abaixo da garagem de barcos. Citada a partir de 2011.</p> <p>RN 4357J - Instalada em frente ao cabeço próximo da RN 4336G.</p> <p>RN2-DHN - Instalada junto ao 1º par de colunas de sustentação dos dutos a 22 metros, perpendiculares a borda do calis. Lat. 03° 42'54",9533 S - Long. 038° 28'37",3054 W, processo clássico Interferométrico. Implantada em 1991.</p> <p>RN4- DHN - Instalada ao lado da nova casa do vigia. Citada a partir de 2011.</p> <p>RN3- DHN - Instalada junto a parede lateral do armazém A-1. Implantada em 1991.</p> <p>RN1-Portobras - Padrão Portobras, instalada no jardim em frente ao prédio da Administração. Cia. Docas do Ceará, entre os armazéns A2 e A3. Citada a partir de 1985.</p>
<p><b>DHN-6016-A</b></p> <p>Arquivo Técnico a ser preenchida no CHM</p> <p>Documento de referência:</p> <p>LH-014/91</p> <p>LH-002/95 - RA-028/95</p> <p>LH-018/11 - RA-359/11</p> <p>Comissão CHM311/12 - RA-448/12</p> <p>RA 298/16</p>	<p style="text-align: center;"><b>Observações</b></p> <p>1. Período de observação para obtenção dos elementos de maré: 18/04/2006 a 18/04/2010.</p> <p>2. A análise foi efetuada usando o método Harmônico, sendo os dados processados pelo BNDO.</p>	



## ANEXO 2 – FICHA F-41 DA ESTAÇÃO PORTO DE IMBITUBA (60250)

	60250 F - 41	<b>TÁBUAS DAS MARÉS</b>	F41 - Padrão - PORTO DE IMBITUBA - 60250 - Versão 1/2019
DESCRIÇÃO DE ESTAÇÃO MAREGRÁFICA		F-41-1908-001/57	
Estação: PORTO DE IMBITUBA		Estado: SC	
Localidade: Imbituba		Navio: L.A.G.S	
LH Carta: 1908 - Porto de Imbituba		Ano: 1957	
<b>Coordenadas geográficas</b> Lat: 28° 13' 8 S Long: 048° 39' 0 W Datum Fuso: +03	O nível de redação está 183,80 centímetros acima do zero da régua. Fonte de informação: Análise com o critério de Balay de 365 dias de observação da maré Tipo de mareógrafo: Zero do mareógrafo: Coincide com o zero da régua		
<b>Descrição da régua de marés</b> Não há descrição de régua de marés. Esta ficha foi compilada do Modelo DHN-5503 de 1957 e das F-41-1908-001/00, F-41-1908-001/03, F-41-1908-001/06 e da F-41-1908-001/18. Atualizada em 13/03/2019. <b>ATENÇÃO USUÁRIOS:</b> Esta não é necessariamente a régua do IBGE instalada atualmente na estação. Para adotar a régua do IBGE, esta deverá ser nivelada e deverão ser seguidos os mesmos procedimentos caso fosse instalada nova régua. Para adotar os dados de maré do sensor de pressão instalado (IBGE), deverá ser obtida a cota deste sensor em relação ao zero da régua, para que sejam feitos os ajustes dos dados em relação à régua.	<b>Descrição das referências de nível</b> RN-2 UFPR - Fixada na costa das pedras na extremidade sul do cais, aproximadamente 25 m da RN-3A da CBD. Citada a partir de 2006. RN-3012X IBGE - Fixada na galeria sob o cais, entre o 3º par de colunas de sustentação no sentido sul-norte, próximo à régua. Citada a partir de 2006. RN-3012Z IBGE - Fixada na galeria sob o cais, entre o 6º par de colunas de sustentação no sentido sul-norte. Citada a partir de 2003. RN-1 DHN - Cravada no trilho do pilar de concreto, próximo ao marco nº. 3012 Z do IBGE. Citada a partir de 2000. RN-5 DHN - Fixada junto à parede frontal, na extremidade norte do armazém trigonômico (ao norte do cais). Implantada em 2006. RN-3A CBD - Fixada no extremo sul do cais, próxima à subestação "Serra-Morena". Lat: 28-23-53,4312S - Long: 048-39-01,4333W - (F-21-1908-001/06). Citada a partir de 2003. RN-3010A IBGE - Fixada na extremidade norte do cais. Citada a partir de 2006. RN-4 DHN - Fixada ao lado do topo do 1º cabeço na extremidade sul do cais. Implantada em 2006.		
DHN-6016-A	<b>Arquivo Técnico a ser preenchido no CHM</b> Documento de referência: LH-002/06 - RA-016/07 LH-035/18 - RA-025/19		<b>Observações</b> 1. Período de observação para obtenção do Z0: 01/01/1956 a 31/12/1957. 2. As cotas desta ficha podem não ser as mesmas utilizadas pelo IBGE como referência para o Datum Altimétrico de Imbituba. 3. A RN-3A-CBD foi rastreada em 2006. 4. Posição da estação foi ajustada para Lat.: 28° 13' 51,70"S/ Long.: 048° 39' 01,62"W. 5. Em 2018, verificou-se uma cota de 1,1 cm entre a RN-4-DHN e a RN-3A-CBD. Deve-se confirmar esta informação em uma próxima comissão.

